



Title	三自由度球面電磁アクチュエータとその位置センシングに関する研究
Author(s)	前田, 修平
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52191
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

三自由度球面電磁アクチュエータと
その位置センシングに関する研究

前田 修平

2015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

従来、ロボット関節部に代表される多自由度駆動機構は、複数のモータの組み合わせによって構成されている。そのため、構造の大型化を避けることができない上、重量の増加、効率の低下などの問題も懸念されている。そこで、近年、一台で多自由度駆動が可能な多自由度アクチュエータが注目され、開発が進められている。多自由度アクチュエータの実現によってアクチュエータ数の削減が可能になれば、多自由度駆動システムの小型化、省エネルギー化が期待できる。現在、国内の消費電力の 50% 以上をモータの駆動電力が占めている状態であり、駆動機構の省エネルギー化に貢献できる多自由度アクチュエータは重要な技術である。

我々は、これまでに、三軸の回転運動が可能な球面電磁アクチュエータの開発を進めてきた。数値シミュレーションによる特性解析、試作機による実験検証を行い、その有用性を明らかにしてきた。しかし、アクチュエータの構造上の問題により、三軸を同時に駆動させるために複雑な制御を必要とするという問題があった。

本研究では、球面電磁アクチュエータの三軸同時駆動をより簡単な制御で実現するため、三軸駆動を独立して制御可能な新構造の提案を行い、電磁界解析により静トルク特性、動作特性を求める。そして、実験検証を通して三軸同時駆動を複雑な制御無しで実現可能であることを確認する。またこの様な駆動に必要な不可欠となる球面アクチュエータ可動子の角度測定技術として、光学センサを用いた手法の提案を行い、シミュレーションおよび実験を通してその有効性を確認する。

三自由度球面電磁アクチュエータとその位置センシングに関する研究

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 球面アクチュエータとは.....	1
1.1.2 球面アクチュエータおよびその周辺技術の課題.....	3
1.2 研究の目的・方針.....	5
1.2.1 研究目的.....	5
1.2.2 研究方針.....	5
1.3 本論文の構成.....	6
第2章 新構造球面アクチュエータの提案.....	8
2.1 新構造の設計方針.....	8
2.2 提案アクチュエータの構造・動作原理.....	13
2.2.1 アクチュエータ基本構造.....	13
2.2.2 アクチュエータ動作原理.....	15
2.3 静トルク特性解析.....	18
2.3.1 解析条件・解析諸元.....	18
2.3.2 解析結果・考察.....	20
2.4 動作特性解析.....	25
2.4.1 解析条件・解析諸元.....	25
2.4.2 解析結果・考察.....	27
2.5 実験検証.....	31
2.5.1 実験条件.....	31
2.5.2 実験結果・考察.....	32
2.6 結言.....	34

第3章	イメージセンサを用いた球面アクチュエータ角度センシング	36
3.1	センシング法の検討	36
3.1.1	各センシング法の比較	36
3.1.2	イメージセンサの測定原理	38
3.2	提案手法	39
3.2.1	センシングシステムの構成	39
3.2.2	センサ出力から回転角度への変換	41
3.3	実験検証	46
3.3.1	オープンループ駆動時の回転角測定	46
3.3.2	クローズドループ駆動時の回転角測定	48
3.4	結言	51
第4章	カラーセンサを用いた球面アクチュエータ角度センシング	52
4.1	提案手法	52
4.1.1	センシングシステム	52
4.1.2	着色パターン	54
4.1.3	一致探索手法	56
4.2	シミュレーションによる提案手法検証	58
4.2.1	シミュレーション方法	58
4.2.2	シミュレーション結果・考察	59
4.3	一致探索手法の改良	63
4.3.1	探索の高速化	63
4.3.2	シミュレーション結果・考察	66
4.3.3	センサ信号ノイズの影響	70
4.3.4	2センサの利用	74
4.4	実験検証	76
4.4.1	測定装置	76
4.4.2	色情報取得実験	79
4.4.3	角度測定実験	82
4.5	結言	87
第5章	結論	88
	謝辞	90
	研究業績一覧	92
	参考文献	94
	付録 三次元有限要素法によるアクチュエータ特性解析手法	96

第 1 章

緒論

1.1 研究背景

1.1.1 球面アクチュエータとは

近年、産業用ロボットやヒューマノイドロボットをはじめとするロボット技術の発展が著しい速度で進んでおり、一般的にそれらロボットの駆動システムには多自由度駆動が必要不可欠となっている。また、ロボットのみならず、機械駆動部に現在一般的に使用されているアクチュエータ（駆動装置）は、回転駆動を実現する回転モータと直線状の駆動を実現するリアモータであるが、これらはいずれも単体では一自由度の駆動のみが可能なアクチュエータである。したがって現在の多自由度駆動機構の大部分はこれらのアクチュエータを複数組み合わせることによって実現されている。しかし、このような機構においてはアクチュエータ数の増加によってシステム全体の大型化や重量の増加を招くことになり、それに加えて駆動方向を変換するためにギアなど機構を介する必要があるため、さらなる重量の増加や効率および位置決め精度の低下などの問題が懸念されている。

将来的にはさらにロボット技術が進歩していき、国際的に普及率が拡大していくことが予想されており、駆動方向の変換メカニズムを必要とせず一台で多自由度駆動が可能であるアクチュエータ（多自由度アクチュエータ）への期待が高まっている^{1),2)}。その中でも球状の可動子を有する球面アクチュエータ^{3),4)}は、球の中心を通る任意の軸での回転運動が可能であるため、Fig. 1.1 で示すように人間の手首や肩関節のような三自由度回転運動を一台で実現することができる。そのため、Fig. 1.2 に示すように従来機構と同様の駆動に必要なアクチュエータ数を削減することが可能となり、システムの小型化、軽量化が期待できる。特に人間の腕のような機構では手首関節のアクチュエータの重量が大きくなると、それを支えるために肘関節アクチュエータを大きく重たいものに変更する必要がある、同様の理由で肩関節にはさらに大きなアクチュエータを用いることになる。したがって、このような機構ではアクチュエータの軽量化は単体での軽量化分以上の効果がある。

国内の消費電力の 50% 以上がモータによるものであると言われており、多自由度駆動機構のモータ数を大幅に削減可能な球面アクチュエータは省エネルギー化に大きく貢献できるとも考えられており、国内外の様々な研究機関で開発が進められている。

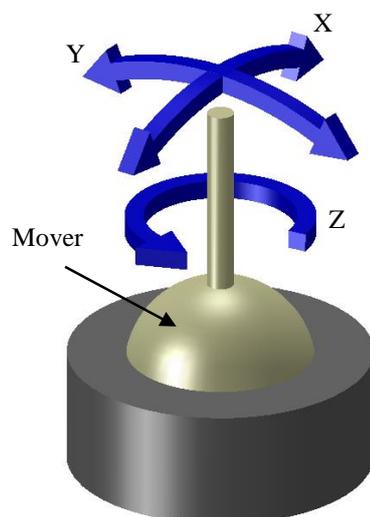


Fig. 1.1. Driving direction of spherical actuator

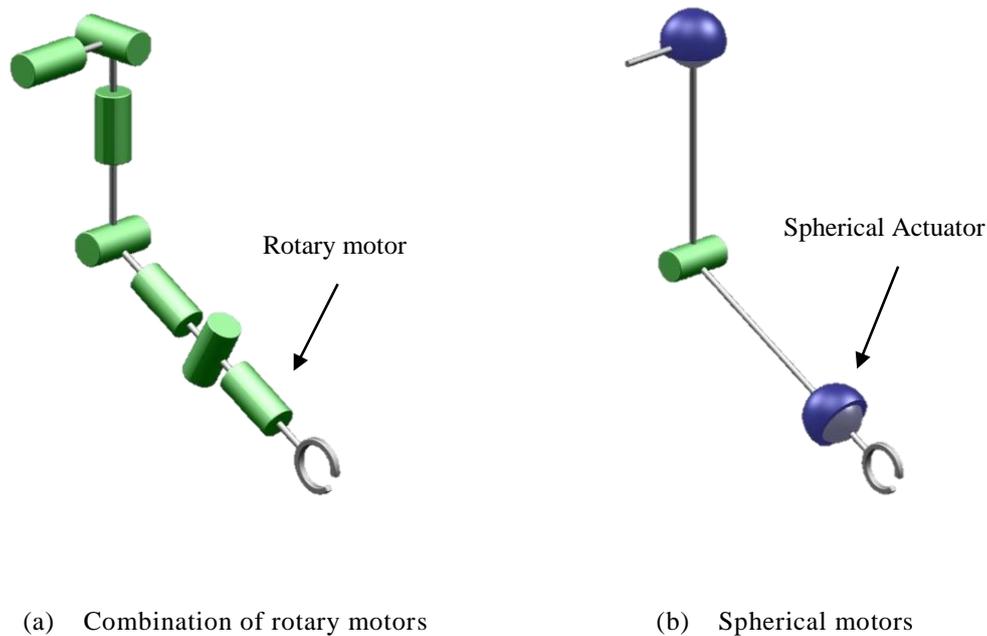


Fig. 1.2 Multi-degree of freedom driving mechanism

1.1.2 球面アクチュエータおよびその周辺技術の課題

前項で述べたように、従来の多自由度駆動機構と比較して多くのメリットが考えられる球面アクチュエータであるが、実用化のために解決しなければならない課題も多く残されている。まず課題として挙げられるのは、高トルク密度化である。一台で回転モータ三台分の回転運動が可能になる球面アクチュエータであるが、従来のモータと同じ大きさ、重量で同等の出力トルクを得ることは困難である。これまでの多自由度機構を置換するために、さらなる出力の向上が必要不可欠となっている。

次に挙げられる課題点は、制御の複雑化である。従来のアクチュエータにおいては駆動が一方向に限定されているため、可動部がそれ以外の方向に動くことは無いが、球面アクチュエータは駆動させたい方向以外には駆動しないよう制御する必要がある。また一般的なモータのように電磁力によって駆動する球面電磁アクチュエータにおいては内部に多くのコイルが配置されており、各コイルへの入力信号は三軸の駆動を実現するために非常に複雑なものとなる。また、このために制御機器に関しても従来のモータ用インバータを用いることができず、多数のコイルに複雑な波形を出力可能な大型のものが必要となる。

三つ目に、可動部の回転角度や速度情報のセンシング方法が確立していないという点である。多自由度アクチュエータはその性質上、一自由度の回転モータのような連続した回転運動をさせる用途ではなく、ロボットの関節部やカメラの駆動装置など、位置決め制御が重要になる場所での使用が予測される。そのことを考慮した場合、フィードバック制御が必要不可欠であり、そのための可動部位置のセンシング技術が求められる。これまで、Fig. 1.3 で示すようなジンバル機構の交差部に一軸のセンサを設置し、間接的に位置を測定する方法などが用いられていたが、構造が大型化してしまうという欠点があった。また、球面アクチュエータの可動部は形状が球体であり、回転しても周囲の物体との距離が変化しない。そのため可動部の位置を直接測定する場合、センサと測定物の距離を測定する Fig. 1.4 (a)で示すギャップ型センサの構成は困難であり、Fig. 1.4 (b)のように物体との相対位置関係を測定するスケール型センサに限られてしまうこともセンシングを困難にする理由の一つとなっている²⁾。Fig. 1.4 はリニアモータを例としたものである。

その他には、球状の可動子を高精度に支持する方法の確立、アクチュエータ駆動角度の広角化などが課題として考えられる。

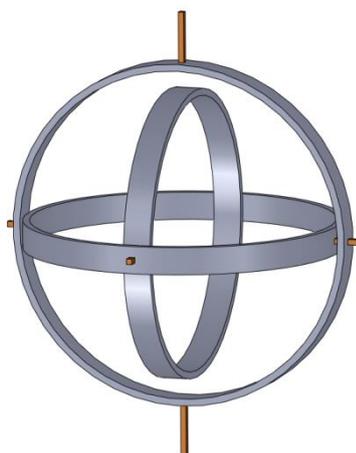


Fig. 1.3 Gimbal structure

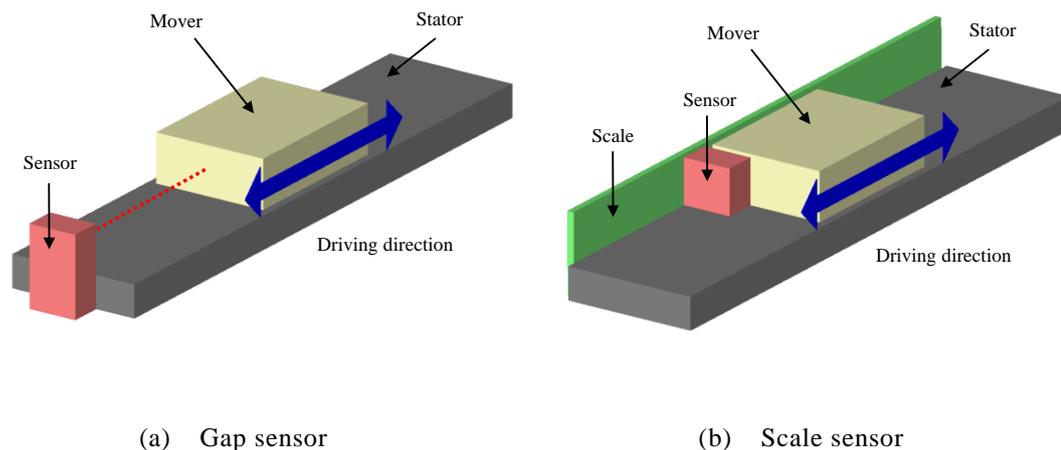


Fig. 1.4 Configuration image of position sensing system

1.2 研究の目的・方針

1.2.1 研究目的

本研究では、前項で述べた球面アクチュエータ実用化への課題の中で、「制御の複雑化」に焦点をあてている。新しい球面アクチュエータ構造およびその制御に必要な角度測定技術を提案することで、「球面アクチュエータによる複雑な制御を必要としない三自由度駆動の実現」を目指す。

また、本研究ではヒューマノイドロボットの手首関節部を球面アクチュエータの適用先として想定している。そのためには高トルク化も重要になるが、本研究ではその前段階として「複雑な制御を必要としない三自由度駆動の実現」までを目標と定めている。

1.2.2 研究方針

「球面アクチュエータによる複雑な制御を必要としない三自由度駆動の実現」を目的と

し、アクチュエータ新構造および角度センシング手法の各要素技術に対し原理検証を行う。

アクチュエータ新構造の提案については、比較的大きな出力を得やすい電磁アクチュエータを対象とし、複雑な制御を必要とせずに三軸の回転駆動を制御可能な構造提案を行う。その後、実機検証によって提案構造の有効性を示す。

センシング手法開発については、先行研究例から現状の課題点を明らかにし、それらを改善可能な手法の提案を行う。専用の測定装置を製作しての実験検証により、提案手法の有効性確認を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は全5章から成る。その構成を以下に示す。

第1章では、球面アクチュエータと複数のモータを組み合わせた従来の多自由度機構を比較し、球面アクチュエータのメリットおよび開発の意義を明らかにした。また「球面アクチュエータによる複雑な制御を必要としない三自由度駆動の実現」という本研究の目的を示し、研究方針について述べた。

第2章では、球面アクチュエータの新構造提案について述べる。最初に球面アクチュエータの先行研究例を示し、現状の課題点から設計方針を決定する。次に提案アクチュエータの構造およびその動作原理の説明を行い、シミュレーションによって各特性を求める。その後、提案アクチュエータの試作機を製作し実験による検証を行うことで、これまでの球面アクチュエータに対し制御性の面で利点があることが確認し、提案アクチュエータの有効性を明らかにする。

第3章では、球面アクチュエータの角度測定手法としてイメージセンサを用いた手法の

提案を行う。最初に球面アクチュエータの角度測定に関する先行研究例を示し、それらの手法において残される課題点を明らかにする。その後提案手法の説明を行い、実験によりその有効性を検証する。

第 4 章では、第 3 章で提案した手法で明らかになった課題の解決のために、球面アクチュエータの絶対角度を検出可能な、カラーセンサを用いた手法の提案を行う。最初に提案手法の測定原理を説明し、実験により処理速度に関する課題点を明らかにする。次に課題を解決するために、新しい測定アルゴリズムによる提案手法の高速化を行い、シミュレーションによってその効果を確認する。最後に実験により各測定手法の挙動を確認し、その有効性および課題点についての考察を行う。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章までの内容を要約し、本研究で得られた成果および今後の課題として残される事柄についてまとめる。

第2章

新構造球面アクチュエータの提案

2.1 新構造の設計方針

第1章で述べたように，球面アクチュエータは様々な利点を有するため，その実現への期待は高く研究も盛んに行われている。本節ではまず球面アクチュエータの先行研究例として駆動原理ごとに代表的なものを示し，既存のアクチュエータ構造に残される課題を明らかにする。その後，提案アクチュエータの設計方針について述べる。

一つ目に，東京農工大学遠山研究室で開発されている球面超音波モータ⁵⁾を Fig. 2.1 に示す。これは球体の可動子とそれを取り囲む複数の固定子から構成されており，各固定子に搭載されている圧電素子に高周波電圧を印加することにより，通常の超音波モータのように回転力を得るアクチュエータである。複数の固定子によって発生する回転力の合力によって三自由度の回転を可能にしている。低速高トルク特性に優れ，無通電時に保持トルクを有するといった利点があるが，外部負荷による圧電効果で逆起電圧が発生し，さらに接触による摩擦力が駆動源であるため，摩擦が発生するという課題を抱えている。

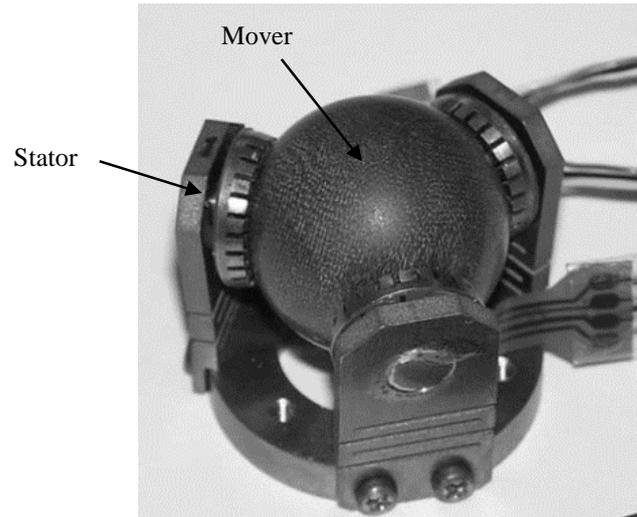


Fig. 2.1 Spherical ultrasonic motor

二つ目に、小型ロボットに適用するためにシェフィールド大学で研究が行われている球面同期モータ⁶⁾を Fig. 2.2 に示す。球面同期モータの動作原理は一般的な同期モータと同様であり、可動子に永久磁石、固定子に電磁石が設置されている。固定子の電磁石の電流を制御することで、可動子の永久磁石が作る磁束に同期するような回転磁界を作り出す。それにより、磁石同士の吸引反発力から、可動子に回転力が生じる。

可動子は球状で4極の永久磁石を有し、また固定子は8個4相のコイルを有する。コイルは内部に鉄心を有さない空芯コイルとなっているため、可動子にコギングトルクが発生しない。しかし、コイルが生成する磁束は小さいため、出力トルクは低くなり、各コイルへの入力電流波形も複雑なものになる。最大トルクは0.4Nm、外径は120mm、可動範囲は傾き方向に45度、回転方向に360度である。

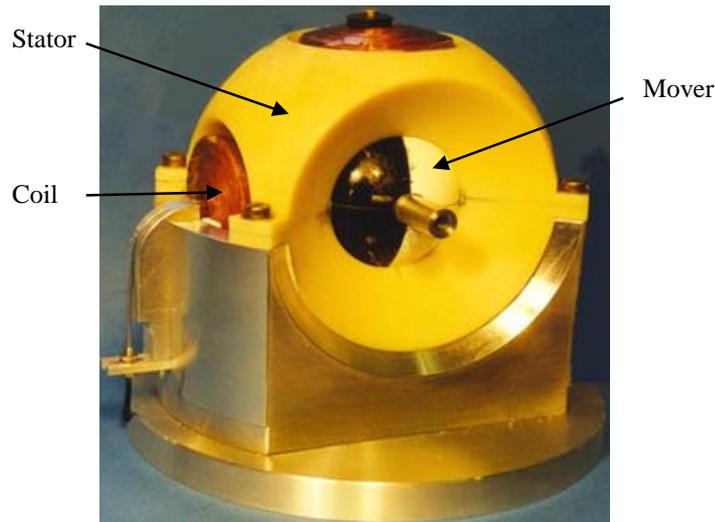


Fig. 2.2 Spherical synchronous motor

最後にアーヘン工科大学で研究が進められている球面ステッピングモータ⁷⁾を Fig. 2.3 に示す。外側の固定子には 112 個の電磁石が等間隔に配置され、可動子表面には多数の永久磁石が等間隔に極が交互になるように配置されている。球面ステッピングモータは、電磁石と永久磁石の数が異なっていることが重要であり、励磁する電磁石を切り替えるたびに可動子が磁氣的に安定な位置へと回転する。非常に多くの磁極を有するため高い出力トルクが得られるが、制御すべき電流相数が多く、制御装置の大型化はもちろん、コイルに入力する電流を決定するために、複雑な演算を必要とする。最大トルクは 40Nm, 外径は 400mm, 可動範囲は傾き方向に 60 度, 回転方向に 360 度である。

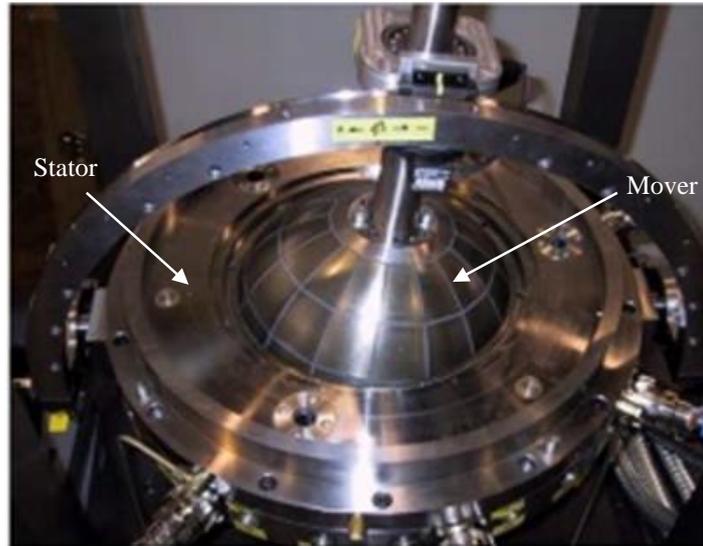


Fig. 2.3 Spherical stepping motor

先行研究例からも分かるように、球面電磁アクチュエータは複数のコイルへの入力を複雑に制御することで三次元の回転運動を実現している。そのため、制御負荷が大きくなるだけでなく、制御機器自体の大型化も避けられず、ヒューマノイド等の制御機器を限られたスペースに搭載しなければならないアプリケーションにおいては、特に問題となる。

Fig. 2.4 に示す球面アクチュエータ^{8),9),10)}は当研究室でこれまでに開発が進められてきたものであるが、このアクチュエータについても三軸同時駆動の困難さが問題となっていた。本アクチュエータは、Fig. 2.5 に示す動作原理によって各軸の駆動を実現しているが、三軸同時駆動の際にはそれぞれの磁極と対向する可動子の極が、回転とともに入れ替わってしまうため、Z 軸回転角度に応じて各磁極の励磁電流に対して複雑な制御が必要になる。その他にも高トルク化を目指したアウターロータモデル^{11),12)}などのアクチュエータ開発も行ってきたが、複雑な制御が必要になる課題点は全モデルに共通するものとなっている。

そこでこの問題解決のために、各軸を独立に制御可能であることを目的とした新構造の球面アクチュエータを提案する。具体的には各軸を単独で駆動させる際の入力電流を各コイルに重畳して入力することにより複数軸の同時駆動が可能になることを指す。提案アク

アクチュエータの構造および動作原理については次節で説明する。

駆動可能角度の目標値として、X 軸および Y 軸まわりの傾き方向（チルト方向）の駆動角度を -25 度 ~ 25 度以上と設定した。これは目標とする適用アプリケーションがロボットの手首関節であることを考慮した値である。人間の手首関節はさらに広角に駆動することができるが、 -25 度 ~ 25 度という駆動角度が、人が日常生活を送る上で大きな不自由のない角度であることと、アクチュエータの構造上の制約を考慮に入れ、現段階での目標値と定めている。アクチュエータ外径は 100 mm 以下であることを目標値としており、これもロボットの手首関節への搭載を考慮した値となっている。

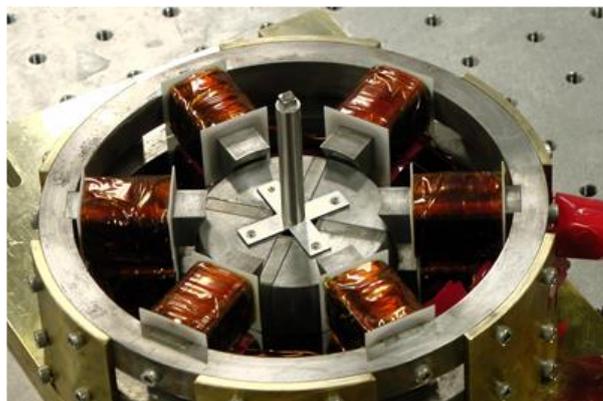


Fig. 2.4 Basic model

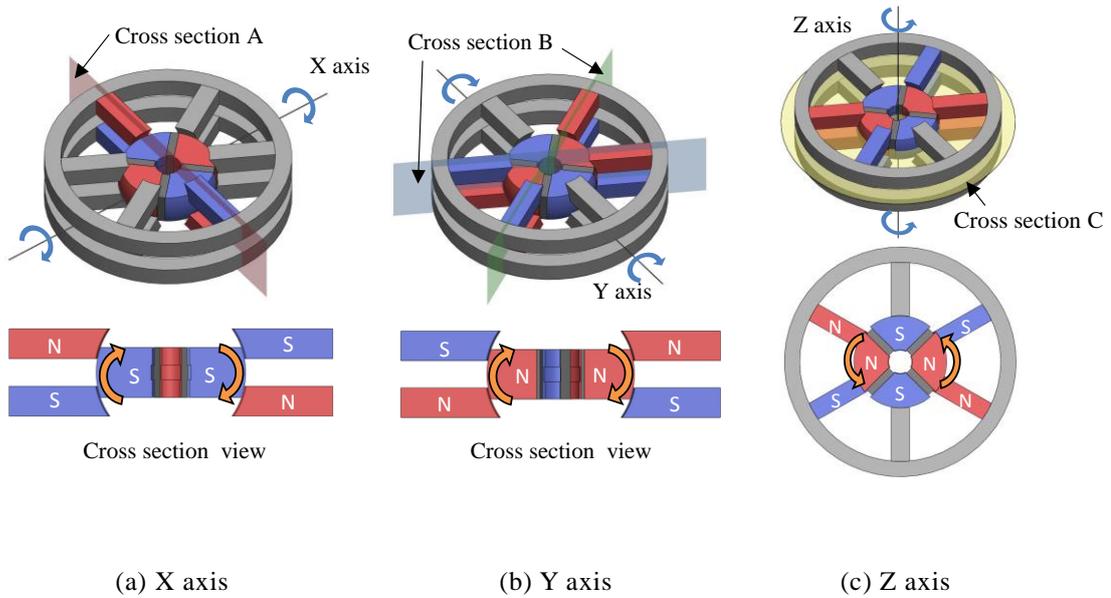


Fig. 2.5 Operating principle

2.2 提案アクチュエータの構造・動作原理

2.2.1 アクチュエータ基本構造

本論文で提案するアクチュエータは、チルト（傾き）方向の駆動機構と回転方向の駆動機構を独立させることにより、独立した制御を可能にすることを目的としている。単に機構を独立にするだけでは、回転モータのような一自由度アクチュエータを組み合わせることと変わらないが、本アクチュエータは永久磁石により生じる磁束を二つの機構で共有しており、永久磁石形状の簡素化およびアクチュエータの小型化を実現している。

提案アクチュエータの基本構造を Fig. 2.6 および Fig. 2.7 に示す。Fig. 2.6 で示すように、アクチュエータは大きく分けて内側の可動子と外側の固定子から構成される。固定子はさらに 12 個の磁極を有する上部の回転駆動用と 4 つの磁極を有する下部のチルト駆動用とに分けられ、各磁極にはコイル（上部 170 Turns, 下部 340 Turns）が巻かれている。なお、材質は強磁性体である電磁軟鉄である。

一方、可動子は Fig. 2.7 の断面図で示すように、対向した二枚の永久磁石（残留磁束密度 1.25 T）と強磁性体（電磁軟鉄）により構成されており、単純な形状の永久磁石により実現可能な構造となっている。ここで、可動子上部はクローポール型モータのような構成で、周方向に N 極と S 極が交互に現れる構造になっている。

回転駆動機構の磁極数は、X 軸方向と Y 軸方向へのチルト駆動の特性を同一とするため、対称性を考慮し、8 極 12 スロットの組み合わせになっている。また、アクチュエータ寸法は直径 100 mm、高さ 70 mm であり、可動子は固定子とのエアギャップが 0.7 mm となるように支持されている。

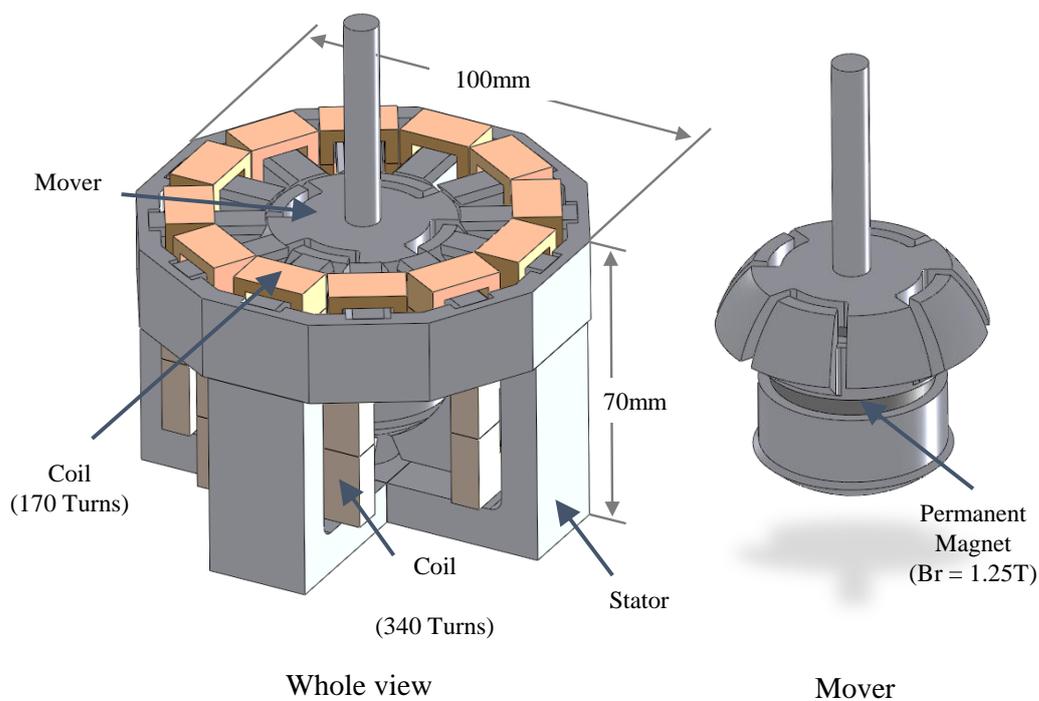


Fig. 2.6 Basic structure of the actuator

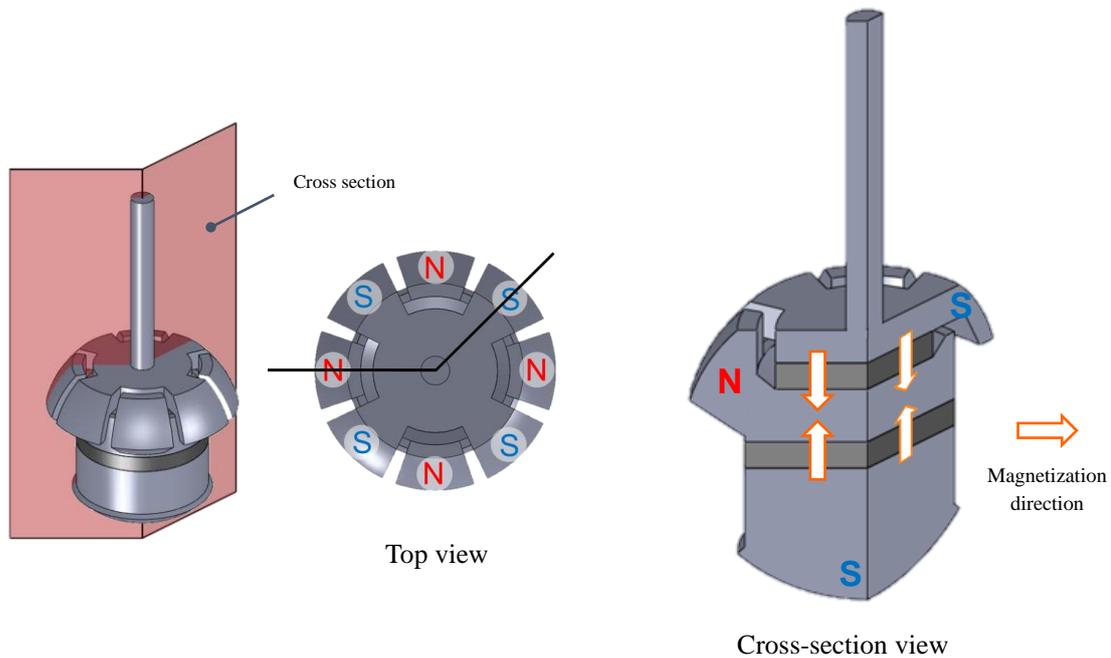


Fig. 2.7 Detail view of the mover

2.2.2 アクチュエータ動作原理

本項では、提案アクチュエータの回転方向およびチルト方向の動作原理について述べる。まず、回転方向への駆動を行う際の動作原理について述べる。可動子上部には Fig. 2.8 の上面図に示すように、45 度間隔で異なる極が交互に表れる構造となっているため、固定子上部の磁極を三相交流で励磁することにより回転磁界が発生し、可動子が回転する。これは、永久磁石同期モータと同様の動作原理である。なお、固定子上部のコイルはそれぞれ三相に分類され、同相のコイルは直列に接続されているため、常に電流値が等しくなる。また、可動子が傾いている状態においてもトルクを得ることができ、チルト可能角度（-30 度～30 度）全範囲でチルト+回転の同時駆動が可能である。

次に、チルト方向への駆動を行う際の動作原理について述べる。チルト方向（X 軸、Y 軸）への駆動の際には、可動子の下部および固定子下部の磁極を使用する。Fig. 2.9 で示すように、永久磁石により発生した磁束が上部磁極から固定子を通り、再度、永久磁石へと

向かうループを構成している。ここで、図に示す2つの下部コイルに直流電流を与えると、電磁石により生じる磁束のループが構成されることになり、これら二つの磁束が互いに強め合う部分と弱めあう部分が生じる。電流を与えていない状態では可動子と下部磁極との吸引力が釣り合っているが、この現象により吸引力に差が生じる。その結果、可動子には図で示す矢印方向にトルクが発生し、チルト方向に駆動する。以上がチルト方向への動作原理であるが、X軸方向とY軸方向は同様の構造で、動作原理も同じであり、それぞれ電流の向きを逆にすることで、反対方向へ可動子を駆動させることができる。

また、可動子下部はZ軸に対して軸対称な構造となっており、可動子が回転方向に駆動した際も固定子下部磁極との位置関係に変化が生じない。そのため、チルト方向駆動へ影響を与えずに回転させることが可能である。

このように、永久磁石によって発生する磁束は2つの動作で共有しつつ、それぞれの駆動原理で使用する電磁石を分離することで、制御の簡易化、永久磁石形状の簡素化、アクチュエータの小型化を同時に実現する構造となっている。

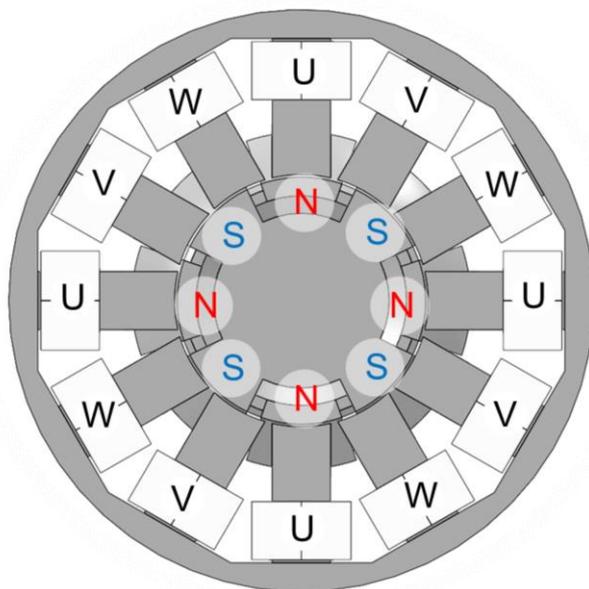


Fig. 2.8 Operating principle (Rotation)

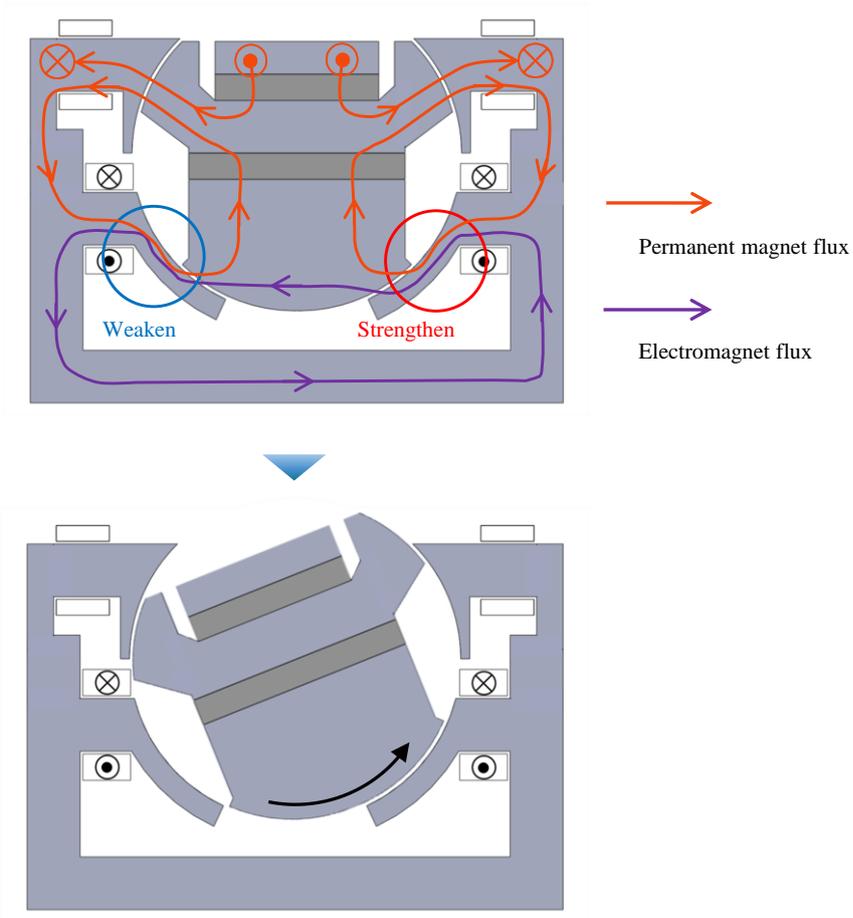


Fig. 2.9 Operating principle (Tilt)

2.3 静トルク特性解析

2.3.1 解析条件・解析諸元

本アクチュエータの各軸まわりのトルク特性を明らかにするため、三次元有限要素法を用いた電磁界解析を行った。単軸駆動時の特性に加え、各軸間の干渉の影響を確認するため、以下に示す4つの場合に対するトルク特性を求めた。

- ① チルト方向単軸駆動（X軸駆動）
- ② 45度方向へのチルト駆動（X+Y, 二軸同時駆動）
- ③ 回転方向単軸駆動（Z軸駆動）
- ④ チルト+回転駆動（回転軸が15度傾いた状態での回転）

チルト方向に関しては、駆動可能角度を考慮し、機械角 -30 度 ~ 30 度の範囲での解析を行い、Z軸駆動については、90度の周期性を有するため、機械角 0 度 ~ 90 度の範囲内における静トルク特性の解析を行った。また、固定子下部のチルト駆動用のコイルにはチルト方向駆動の解析の際にそれぞれ直流電流 $1A$ を与え、磁極を励磁している。固定子上部の回転駆動用のコイルには回転駆動の解析の際に、振幅 $1A$ の三相交流を想定して、可動子の角度に応じてステップごとに変化させた直流電流を入力している。

複数軸同時駆動の際にはこれらの電流を各々のコイルに与えており、さらに各々の解析において、電流を入力しない場合のコギングトルク特性についても併せて解析を行った。

これらの特性解析に用いたアクチュエータの三次元有限要素分割モデルを Fig. 2.10 に示す。なお、コイルおよび空気領域は表示されていない。また、解析諸元、解析条件を Table 2.1 に示す。

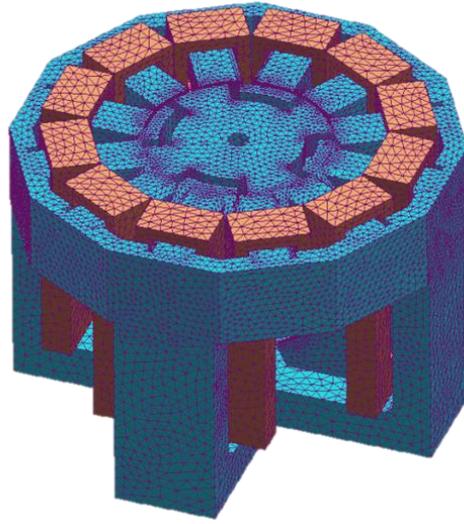


Fig. 2.10 3D mesh model

Table 2.1 Discretization data and analysis conditions

Rotation angle	Tilt	$-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$
	Rotation	$0^{\circ} \sim 90^{\circ}$
Number of steps	Tilt	31
	Rotation	31
Input current	Tilt	1A DC
	Rotation	1A 3-phase AC
Number of elements	1,313,852	
Number of nodes	229,098	
Total CPU time	Tilt	4 [h]
	Rotation	6 [h]

2.3.2 解析結果・考察

本項では、前項で述べた各解析の結果を示す。まず、チルト方向単軸駆動時の解析結果を Fig. 2.11 に示す。

解析結果より、コギングトルクが最大値で約 0.1 Nm となっており、比較的小さく制御性が良好な特性となっていることが確認できる。また、機械角 0 度の位置でコギングトルクの値が 0，かつグラフの傾きが負になっていることから、中心が磁気的な安定点になっていることも確認できる。

電流入力時の出力トルクは、平均 0.30 Nm，最大 0.60 Nm となっている。また、出力トルクに関しては、全範囲で正の値であることが駆動可能になる条件となるが、本結果はその条件を満たしており、-30 度～30 度の範囲で駆動可能であることがわかる。

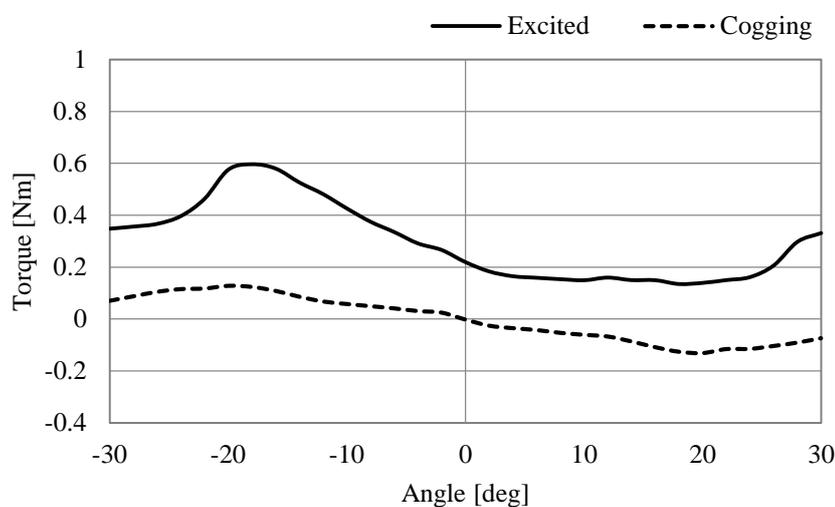


Fig. 2.11 Torque characteristic (Uniaxial tilt drive)

次に、X+Y 軸同時駆動時の解析結果を Fig. 2.12 に示す。固定子下部の 4 つのコイルにそれぞれ X 軸まわりに駆動させるための電流と Y 軸まわりに駆動させるための電流を与え、

その合成トルクで 45 度方向へチルト駆動させる駆動方法である。

解析結果より、コギングトルク特性が単軸駆動時に近く、角度の小さい範囲ではほぼ等しい値となっていることがわかる。この結果より、任意の方向に対するチルト駆動においても同様のコギングトルク特性を有していることになり、制御の際にこの特性変化を考慮に入れる必要がないことがわかる。

なお、出力トルクが単軸駆動時と比較して大きくなっているが、これは電流を与えるコイル数が異なっており、X 軸方向へのトルクと Y 軸方向へのトルクが合成されたものであるからである。

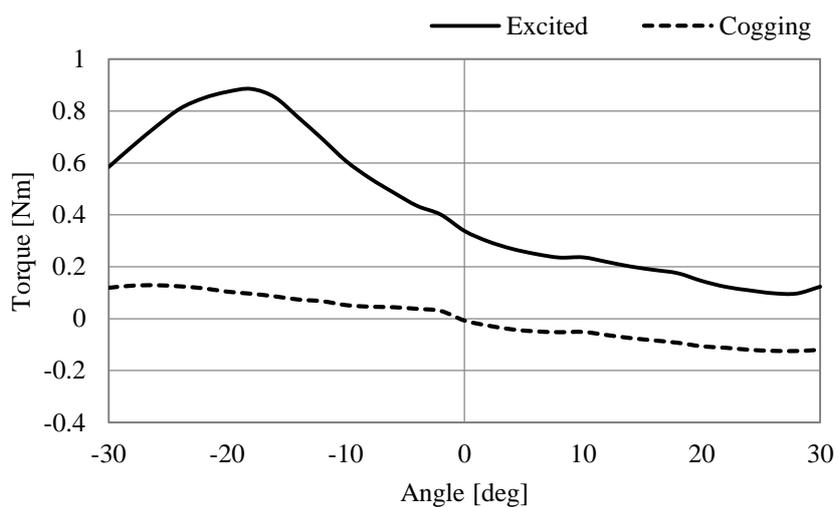


Fig. 2.12 Torque characteristic (Biaxial tilt drive)

次に回転方向 (Z 軸) 単軸駆動時のトルク特性を Fig. 2.13 に示す。コギングトルクはチルト駆動時と同様に、最大値で 0.1 Nm 以下と低くなっているが、回転角度によるトルクの脈動が発生し、出力トルクにもそれに起因する脈動が見られる。また、出力トルクは平均 0.41 Nm, 最大 0.51 Nm となっている。なお、30 度の周期性が見られるが、これは固定子の磁極間隔が 30 度であるためである。

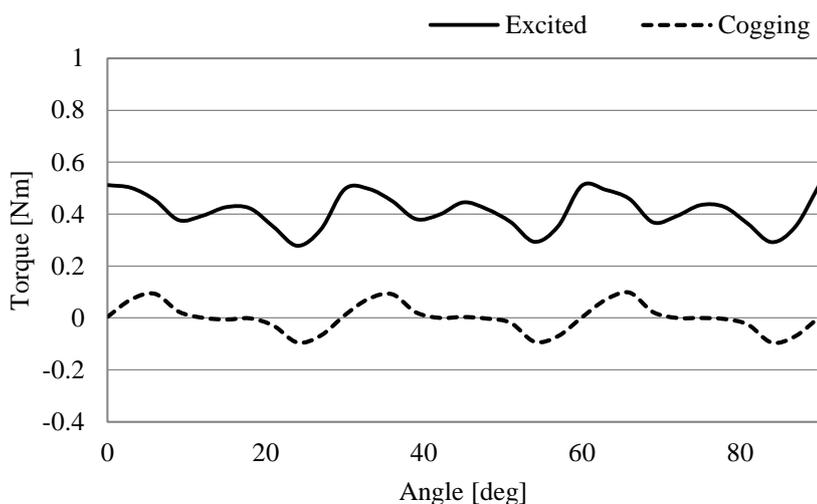


Fig. 2.13 Torque characteristic (Uniaxial rotation drive)

次に、チルト+回転駆動時の解析結果として、X軸まわりに15度傾いた出力軸(Z'軸)を中心に可動子が回転する駆動を示すが、まず、その駆動をFig. 2.14に示す。解析結果はコギングトルクおよび出力トルクに分け、それぞれFig. 2.15およびFig. 2.16に示しており、グラフ中にTorque Z'として示すグラフがそれぞれ回転方向に働くトルクを表している。これらの解析結果からは、各駆動間でのトルク相互干渉の影響を確認することができる。

コギングトルク特性の解析結果からは、Y軸およびZ'軸まわりにはほぼトルクが発生しておらず、X軸まわりに約0.1 Nmのトルクが発生していることが確認できる。これは可動子が傾いた状態から中心に戻ろうとするトルクであり、チルト方向単軸駆動時の15度におけるコギングトルクに相当する。

出力トルク特性を見ると、Z'軸まわりに約0.3 Nmのトルクが発生しており、これは回転方向の単軸駆動時と比較して小さくなっているが、これは傾きによって可動子と固定子の回転機構の位相がずれることと、固定子と可動子磁極の対向面積が減少することが主な原因だと考えられる。また、コギングトルク特性の解析結果と同様、X軸まわりには中心

に戻ろうとするトルクが発生しており、構造の対称性から、Y 軸まわりにはほぼトルクが発生していない。

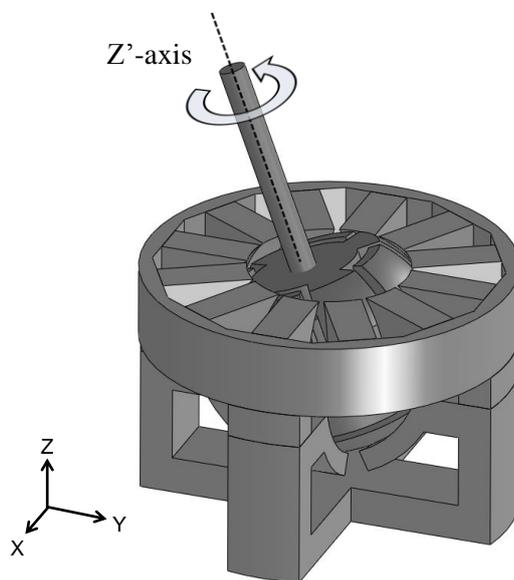


Fig. 2.14 Simultaneous rotation and tilt drive

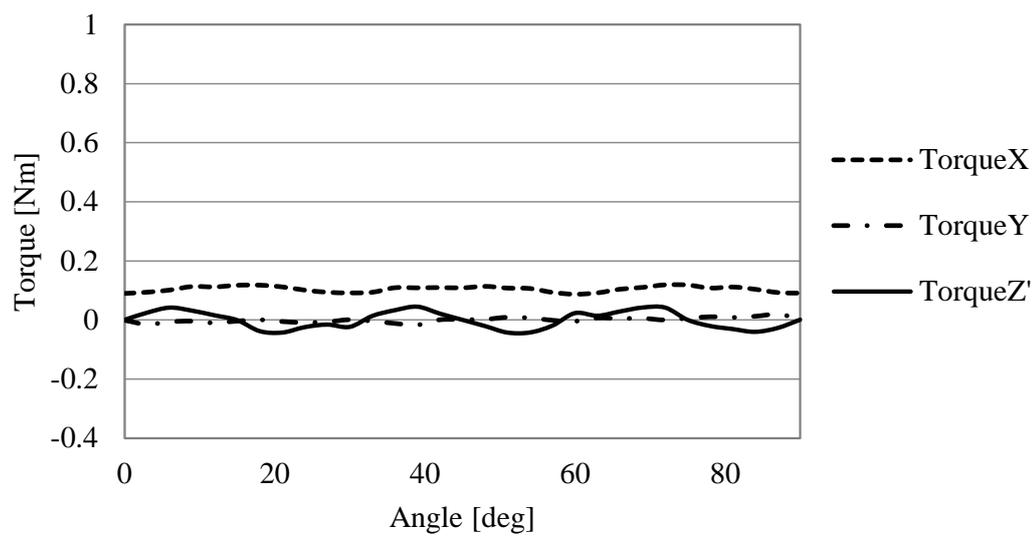


Fig. 2.15 Cogging torque characteristic (Simultaneous rotation and tilt drive)

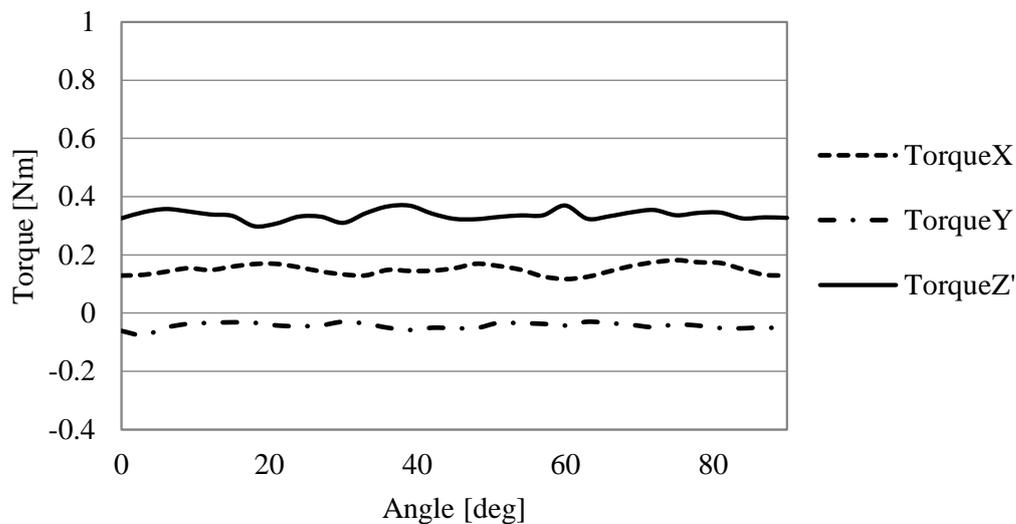


Fig. 2.16 Output torque characteristic (Simultaneous rotation and tilt drive)

ここまで、四つの駆動方式についての静トルク特性結果について述べたが、これらの解析結果から確認できる重要な情報は、各駆動方向ともに出力トルクが全範囲で正の値となっていることである。これは、本アクチュエータが各駆動方式において想定駆動角度内で駆動が可能であることを示している。さらに重要な情報は、チルト+回転駆動時の X 軸方向の出力トルク（Fig. 2.16 中の破線）に大きな脈動が見られないということである。この出力トルクに大きな脈動があれば、可動子の傾きを維持するために、チルト方向のトルクを常に調整し続けなければならないが、本アクチュエータではその必要がない。つまり、チルト駆動と回転駆動をそれぞれ独立に制御できることになり、多自由度駆動の制御を容易にできる。

このように、本節で述べた各トルク特性解析より、本アクチュエータが想定する駆動を行うことが可能で、複数軸同時駆動時のトルク相互干渉が小さいことを確認することができた。次節では、電流入力時のアクチュエータ挙動確認のために行った動作特性解析について述べる。

2.4 動作特性解析

2.4.1 解析条件・解析諸元

アクチュエータ駆動時の可動子の挙動を明らかにするため、三次元有限要素法を用いた動作解析により、各時間ステップでの可動子の回転角を求めた。トルク特性解析と同様、単軸駆動時の特性に加え、各軸間の干渉の影響を確認するため、複数軸駆動を含めた以下の5つの場合に対する動作特性を求めた。

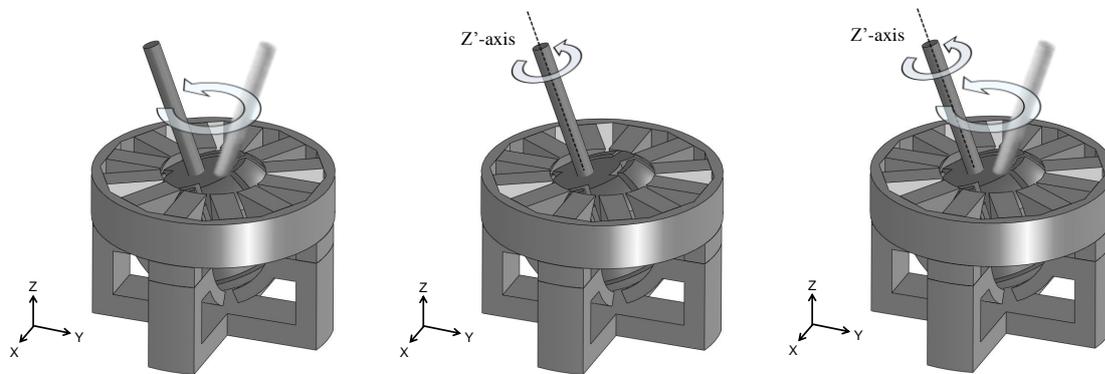
- ① チルト方向単軸駆動（X軸まわり往復運動）
- ② 回転方向単軸駆動（Z軸駆動）
- ③ チルト+チルト駆動（円軌道，X軸往復運動+Y軸往復運動）
- ④ チルト+回転駆動（回転軸が傾いた状態での回転）
- ⑤ 三軸同時駆動（上記③+④，回転軸が移動しながら回転）

解析に用いた有限要素分割モデルは、静トルク特性解析の際と同じである。チルト方向往復運動の解析では、固定子下部の磁極をそれぞれ振幅1A、周波数2Hzの交流で励磁することで、アクチュエータに往復運動を行わせている。回転方向への解析では、固定子上部の12個の磁極をそれぞれ振幅1A、周波数2Hzの三相交流で励磁している。さらに、回転軸が傾いた状態での回転の解析においては、回転軸を傾けるために、下部磁極を直流電流1Aで励磁する。また、複数軸同時駆動の際にもこれらの電流を各々のコイルに与えている。

解析諸元、解析条件を以下のTable 2.2に、複数軸同時駆動時の各駆動の様子をFig. 2.17に示す（上記③～⑤の解析）。

Table 2.2 Discretization data and analysis conditions (Operating characteristic analysis)

Number of steps	Uniaxial Rotation	80
	Other analyses	160
Input current	Tilt (Reciprocation)	1A AC
	Tilt (Fixity)	1A DC
	Rotation	1A 3-phase AC
Moment of inertia	Tilt	$1.62 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
	Rotation	$1.25 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Number of elements	1,313,852	
Number of nodes	229,098	
Total CPU time	Uniaxial Rotation	10 [h]
	Other analyses	20 [h]



(a) Biaxial tilt drive

(b) Simultaneous rotation and tilt drive

(c) Triaxial drive

Fig. 2.17 Multi-degree of freedom drive

2.4.2 解析結果・考察

本項では、前項で述べた各解析の結果を示す。まず、チルト方向単軸駆動時の解析結果を Fig. 2.18 に示す。なお、本解析では X 軸方向の変位のみ運動方程式により計算しており、Y 軸方向、Z 軸方向については回転角 0 度で固定している。

解析結果より、可動子が正常に往復運動している様子を確認することができる。一周目で大きな振幅が発生しているが、これは可動子磁極と磁界変化が同期するまでの過渡的な挙動である。そして、その後は約±20度の振幅で安定した往復運動となっている。

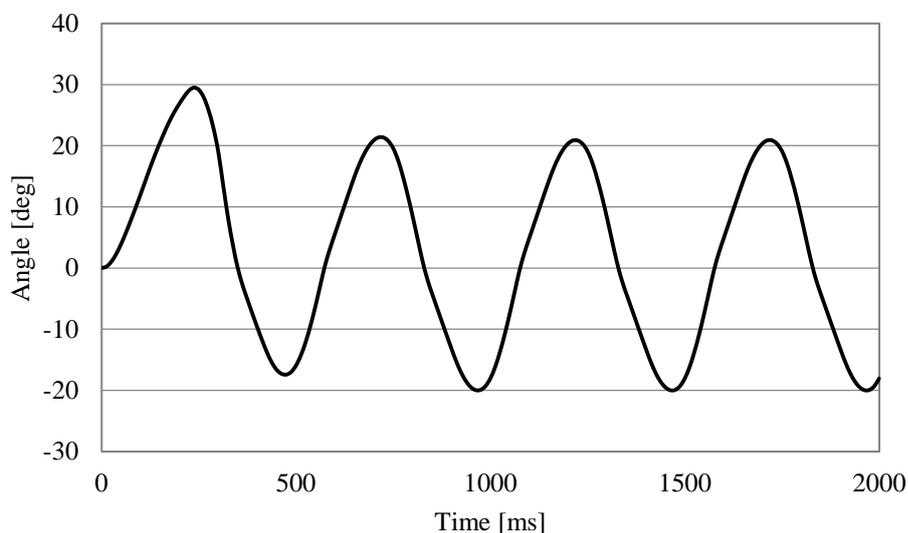


Fig. 2.18 Operating characteristic (Uniaxial tilt drive)

次に、回転方向単軸駆動時の解析結果を Fig. 2.19 に示す。本解析では、Z 軸方向の変位のみ運動方程式により計算しており、X 軸方向、Y 軸方向については回転角 0 度で固定している。周波数 2Hz の三相交流電流で上部コイルを励磁しているため、可動子は理論上、毎秒 180 度の等角速度で回転するはずである。

解析結果から、理論値との良好な一致を示し、可動子が回転磁界と同期して回転していることが確認できる。小さな脈動が見られるが、これは回転方向のコギングトルク脈動が主な原因だと推測される。これらの結果より、チルト方向、回転方向ともに単軸での駆動が可能であることが確認された。

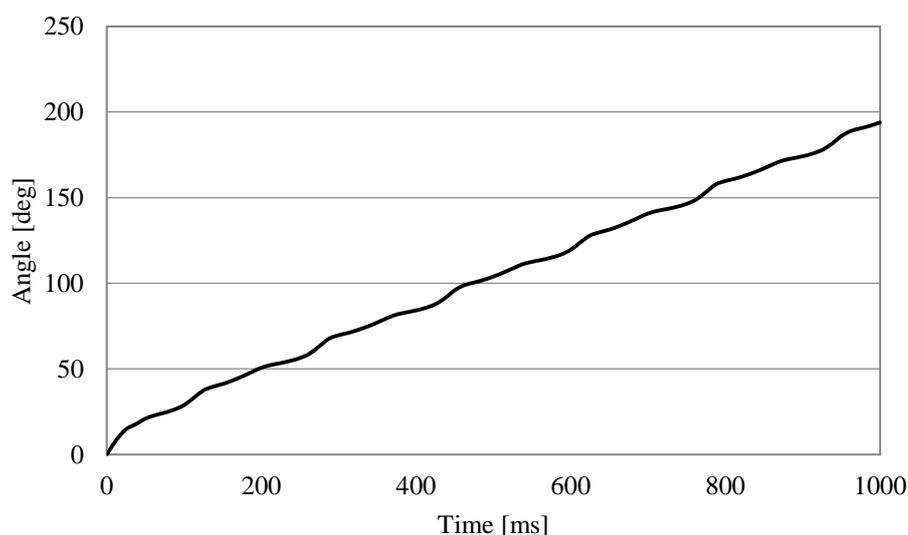


Fig. 2.19 Operating characteristic (Uniaxial rotation drive)

次に、複数軸同時駆動時の解析結果について述べる。Fig. 2.20の結果は、Fig. 2.17 (a)で示すように、X軸まわりの往復運動とY軸まわりの往復運動を90度位相をずらした状態で重ね合わせることにより、可動子を円運動させる駆動方式での動作特性である。なお、本解析では、X軸、Y軸、Z軸ともに運動方程式により変位を計算している。

チルト方向単軸駆動時の解析結果と同様、起動時に大きな振幅が見られるが、その後はX軸、Y軸ともに安定した動きを示しており、出力軸が円運動していることが確認できる。また、Z'軸まわりに回転運動をせずに駆動できていることも、この結果から読み取ることができる。この結果から、チルト方向の二自由度駆動に関して、各軸を独立に制御可能であることを明らかにすることができた。

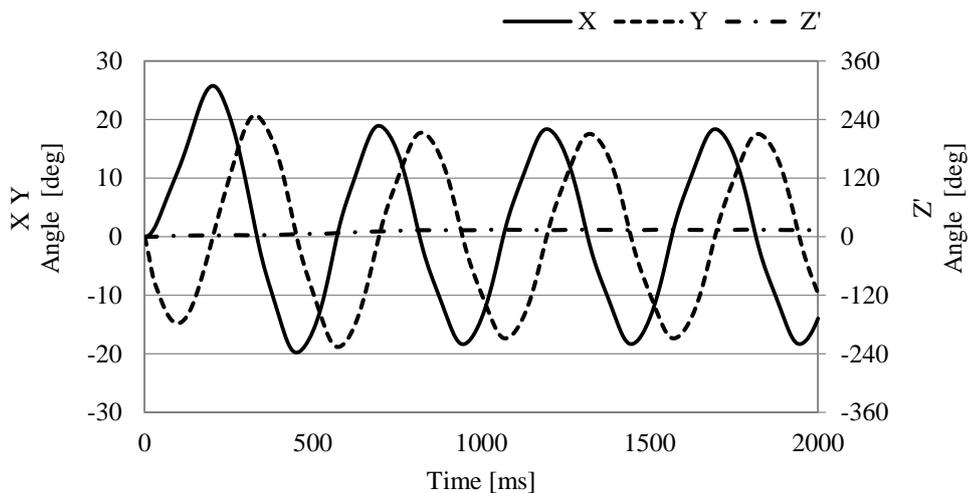


Fig. 2.20 Operating characteristic (Biaxial tilt drive)

次に、チルト方向と回転方向の同時駆動における解析結果を示す。Z' 軸まわりの回転角を表すグラフからは、可動子が等角速度で回転できていることがわかる。X 軸まわりの結果からは、可動子が初期位置から約 15 度回転し、その後、チルト角を保っていることが確認できる。このグラフには脈動が見られるが、これも回転方向のコギングトルクが原因であると考えられるため、コギングトルク脈動の低減が今後の課題である。

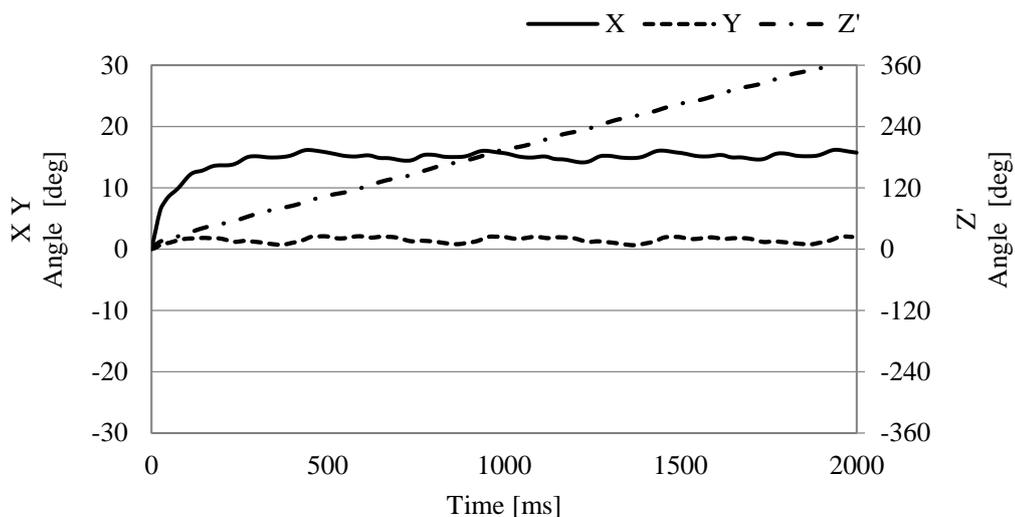


Fig. 2.21 Operating characteristic (Simultaneous rotation and tilt drive)

最後に、三軸同時駆動時の解析結果を Fig. 2.22 に示す。これは、前述の二つの複数軸同時駆動を合わせた動きであり、本提案アクチュエータにより実現させることを目的としていた駆動である。解析結果より、Z' 軸まわりに毎秒 180 度の等角速度回転しながら、可動子が X 軸および Y 軸まわりに 2Hz の往復運動をしていることが確認できる。この結果より、本アクチュエータが、三軸同時駆動においても各々の軸まわりの駆動に必要な電流入力を重ね合わせることで、複数の軸まわりに同時駆動させることが可能であることを明らかにすることができた。

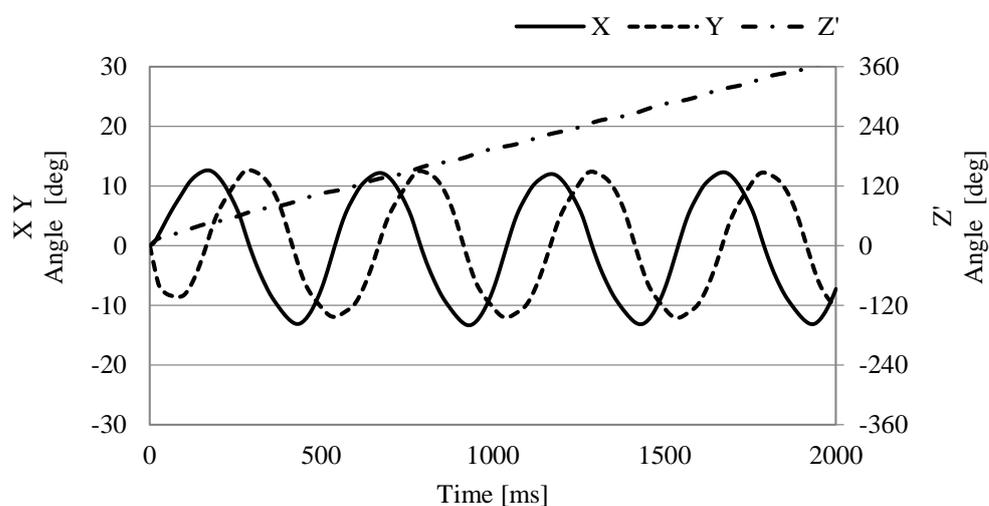


Fig. 2.22 Operating characteristic (Triaxial drive)

2.5 実験検証

2.5.1 実験条件

前節では三次元有限要素法を用いた電磁界解析により，三軸の駆動を独立に制御できる球面アクチュエータを提案したが，本節では試作機を用いた検証実験について述べる。製作した試作機の外観を Fig. 2.23 に示す。Fig. 2.23 (c) に示すように，アクチュエータ固定子には任意の方向に回転可能な球状のベアリングが複数設置されており，これにより可動子を支持している。

実験に用いた機器を Fig. 2.24 に示す。アクチュエータの制御には PC および DSP (Digital signal processor) を用いている。Fig. 2.24 中の測定装置はアクチュエータの三軸の回転角度を同時に測定可能なものであり，複数のアーチ状部品とロータリーエンコーダにより構成されている。この装置で測定した角度情報を用いることでオープンループ制御に加え，位置フィードバック制御下のアクチュエータの挙動を確認することが可能である。



(a) Whole view

(b) Mover

(c) Lower half of the stator

Fig. 2.23 Prototype of the actuator

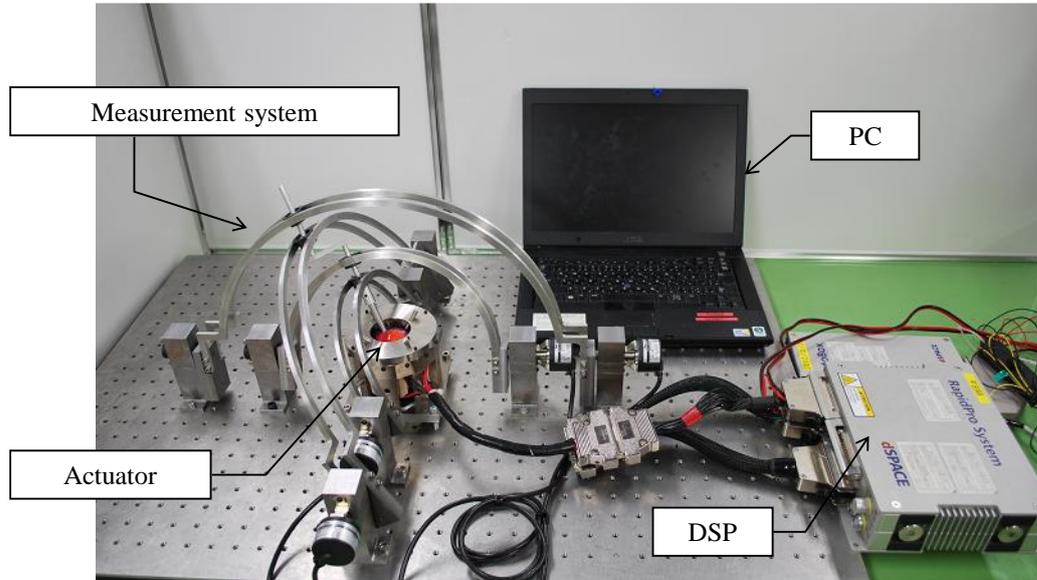


Fig. 2.24 Experiment system

2.5.2 実験結果・考察

オープンループ駆動における実験では、特性解析の場合と同様、X軸とY軸まわりの往復駆動と出力軸と同方向のZ'軸まわりの回転運動合わせた三軸同時駆動を行い、アクチュエータ可動子の回転角度を測定した。実験結果を Fig. 2.25 に示す。

実験結果から、各軸ともに回転運動、往復運動をしていることが確認できるが、Fig. 2.22 で示した解析結果と比較して、可動子が滑らかな駆動をしておらず、往復運動の振幅も小さくなっていることが分かる。原因として、解析では考慮されていない機械摩擦の影響が考えられる。本アクチュエータの可動子は上下非対称の構造であることで常に下方へ吸引力を受けており、その吸引力は可動子角度によって変化する。つまり接触支持されている可動子に働く摩擦力も回転角度により変化するため、それらを考慮していない解析結果との違いが生じていることが考えられる。

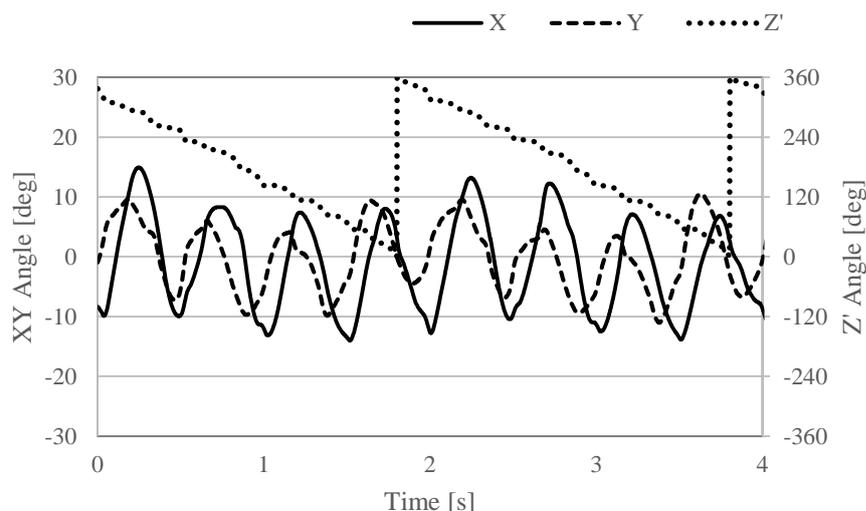


Fig. 2.25 Experimental result (Open loop control)

次に、位置フィードバック制御下でのアクチュエータ挙動を確認するために行った実験結果について述べる。本実験では角度測定装置によって測定した可動子角度情報を用いて次ステップでのコイルへの入力を決定している。

制御回路は、X 軸、Y 軸、Z' 軸が独立したものになっており、角度指令値も同様に X 軸、Y 軸、Z' 軸の静止角度がそれぞれ 20 度、10 度、30 度となるランプ状位置指令値を与えている。実験結果を Fig. 2.26 に示す。

実験結果より、各軸ともに位置フィードバック制御が機能し、最終的には指令値に到達する様子が確認できる。最終到達角度はそれぞれ 19.89 度、9.9 度、30.7 度となっており、指令値との誤差は 1 度以内である。しかし、駆動中はオープンループ駆動実験の場合と同様に不安定な挙動が見られ、最大誤差はそれぞれ 1.63 度、1.44 度、2.32 度となっている。また、X 軸および Y 軸回転においてはオーバーシュートが見られる。これらは各フィードバックゲインの修正により改善されることも考えられるが、より滑らかな駆動を実現するには、オープンループ駆動実験と同様に機械摩擦による影響の考慮が必要になると考えられる。

このように制御面で改善の余地が見られるものの、フィードバック制御下において本アクチュエータが指令値に追従して駆動することを確認することができた。

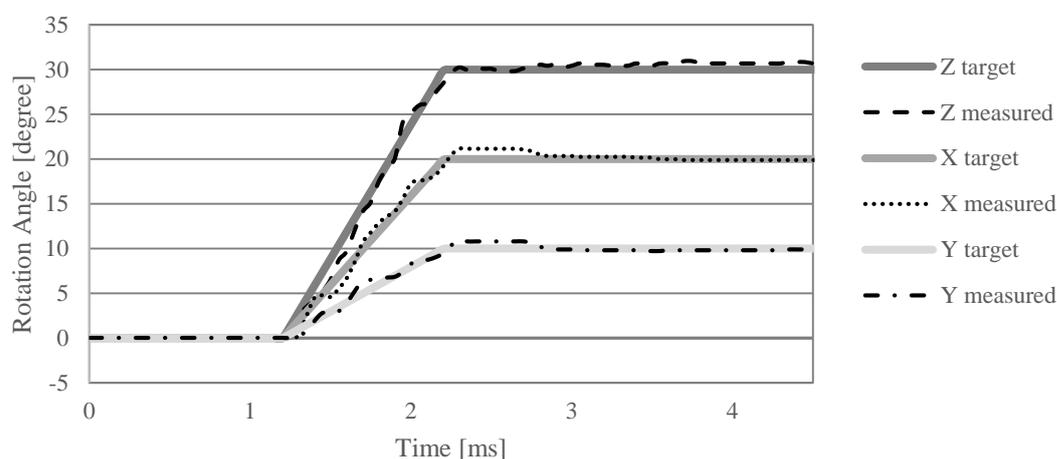


Fig. 2.26 Experimental result (Closed loop control)

2.6 結言

本章では、従来の球面アクチュエータで課題となっていた三軸の同時駆動を実現させるため、回転方向とチルト方向への駆動機構を分離した新機構アクチュエータの提案を行った。

まず先行研究例を示し、球面電磁アクチュエータの現状の課題点を明らかにし、その後、提案アクチュエータの基本構造、動作原理を説明した。次にアクチュエータの基本特性を明らかにするための特性解析の結果を示した。解析結果より、三軸同時駆動が可能であり、複雑な制御を行うことなく各軸を独立して制御できることを確認し、本アクチュエータの有効性を示すことができた。

実験結果からは、オープンループ駆動時に不安定な駆動が確認された。原因として、可動子の回転角度により変化する摩擦力の影響が大きいと考えられるため、今後は摩擦力を低減するためのアクチュエータ構造および可動子支持機構の検討が必要であり、ロボットの手首関節への搭載を実現するには高トルク化も必要となる。

しかし、駆動機構を分離することで制御が容易になり、これまでモータの制御に一般的に用いられてきたインバータ等の制御機器をそのまま使用することができることは提案アクチュエータの大きな特長であり、球面アクチュエータの普及に貢献可能なものと考えられる。本研究で目標として掲げているロボット関節部への搭載にはまだ課題が残されているが、大トルクを必要とせず省スペースで三軸回転運動をさせる用途（監視カメラ等）を想定した場合には、本提案機構は特に有効である。

クローズドループ駆動実験からは、各軸の独立した位置フィードバック制御が可能であることを確認した。しかし、角度測定に大型の装置を用いているためにそのままロボット関節部のようなアプリケーションに適用することが不可能であり、省スペースで実現可能なアクチュエータ可動子の角度センシング技術が求められる。次章からは、球面アクチュエータの大きな課題である角度測定を可能とするためのセンシング技術開発について述べる。

第3章

イメージセンサを用いた

球面アクチュエータ角度センシング

3.1 センシング法の検討

球面アクチュエータを位置制御するためには、可動子の位置情報をセンシングする必要がある。そこで、センシング方法を決定するために、アクチュエータに搭載可能なセンサとしていくつかの候補を挙げ、それぞれの特徴を比較する。また、決定したセンサについてその測定原理を示す。目標値については原理検証段階であることとロボット手首関節への適用を考慮し、測定精度1度と設定している。

3.1.1 各センシング法の比較

ホール素子

始めにホール効果について Fig. 3.1 を用いて説明する。いま、電圧 E_B を印加した物体に電流 I が流れているとする。ここに外部から電流に垂直な方向に磁場 B_S を与えると、物体中の電子が I_H 及び B_S に垂直な方向にローレンツ力を受け、その分布に偏りができる。それにより物体の両端にホール電圧 E_H が生じる。これがホール効果である。ホール素子と

は、この効果を利用し、ホール電圧の大きさから外部磁場を測定する素子である。磁界の向きにより電圧の向きも変化するため、外部磁場の極性判別が可能である。

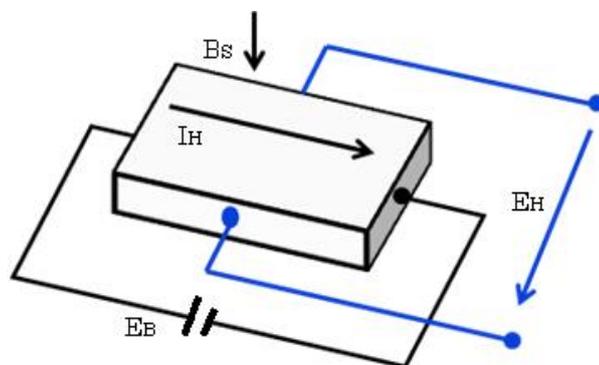


Fig. 3.1 Hall effect

MR 素子

物質の抵抗値が外部磁場の強さによって変化する磁気抵抗効果を利用した素子である。磁場の向きによらず抵抗値が増加するため、極性の判別は不可能である。しかし、応答性に優れるため高周波での磁界変化も測定することができる。

光学イメージセンサ

光学式マウス等に使用されているセンサである。物体の表面を高速で撮影し、前後の画像のずれから物体の移動量を算出する。1つのセンサで撮影表面の二次元の移動量を測定することができる。

第1章で述べたように、球状の物体の回転角検出を測定するには、ギャップ型センサの適用は難しいため、以上のセンサを候補に挙げた。

ホール素子、MR素子はともに磁界の変化を検出する磁気センサであり、ホール素子は一自由度モータの位置検出にもよく用いられている。しかし本アクチュエータ内部の磁界は可動子の回転角度、及び各コイル励磁状態によって非常に複雑な変化をすることになる。

そのような複雑な磁界変化から可動子の回転角を特定するためには、複雑な制御と多数のセンサが必要になると考えられる。それに対し、光学イメージセンサは可動子の回転を直接測定できるという利点があり、1つのセンサで二次元の移動量を測定することができるため、理論上2つのセンサで回転角を特定できることになる。また、ホール素子、MR素子を使用する際に問題となる温度特性（周囲の温度による出力の変化）も、光学イメージセンサでは無視することができる。

これまでに述べた各センサの特徴を考慮し、本アクチュエータに適用するセンサを決定する。球面アクチュエータの場合センサを内部に搭載する必要があり、省スペース化が非常に重要なため、センサ数が削減可能なイメージセンサは有効であると考えられること、複雑に変化する内部磁場の変化を考慮する必要がないことを考慮し、本研究では可動子の回転角測定センサとして光学イメージセンサを用いることとした。

3.1.2 イメージセンサの測定原理

本研究で用いるイメージセンサについて、その測定原理を説明する。Fig. 3.2 にセンサの外観を、Fig. 3.3 に撮影画像のイメージを示す。まず、センサが物体の表面を毎秒1500回という高速で撮影する。その際の画素数は 16×16 ピクセルと非常に少ないものである。そして、1つ前に撮影した画像との比較から共通する明暗のパターンを検出し、その共通部分がどれだけ移動しているかにより、撮影表面の移動量を算出する。算出された測定値はインクリメンタルエンコーダのような2相パルス波により出力される。（単位時間当たりのパルス数で変位量を、2相の位相差で移動方向を示す。）

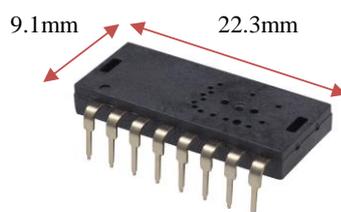


Fig. 3.2 Optical image sensor

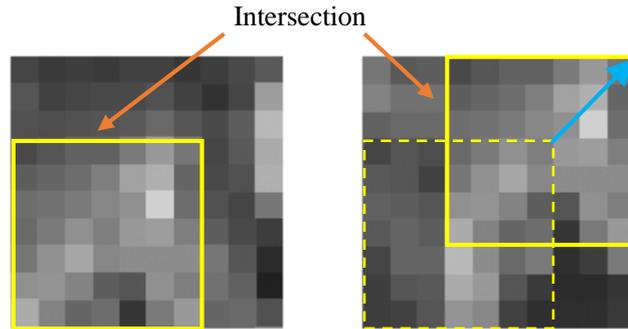


Fig. 3.3 Image displacement

3.2 提案手法

イメージセンサを用いてセンシングを行うためには、2つのセンサからの出力を可動子の回転角度に変換する必要がある。そこでシステム全体の構成を示すとともに、センサ出力の変換方法について説明する。

3.2.1 センシングシステムの構成

球面アクチュエータを位置フィードバック制御するためのシステム構成を Fig. 3.4 に示す。オープンループ制御時のものにイメージセンサを加えた構成となっており、センサにより測定した情報を制御機器 (Micro Auto Box) にフィードバックする。センサから得られる情報は2組の測定表面それぞれの二次元速度情報であり、これを制御ブロックにより可動子の回転角へと変換する。そして、指令角度とセンサにより得られた角度の差から、各コイルへの励磁電流を増減させることで可動子を指令位置まで駆動させる。なお位置フィードバック制御にはPI制御を用いている。

次に、センサの設置位置を Fig. 3.5 に示す。左の図に示すように X 軸上に 1 つ、その位置から Z 軸まわりに 60 度ずれた位置にもう 1 つのセンサを配置する。また、右図は左図中の断面 A における断面図であり、ここで示すようにセンサの測定部が可動子の中心部の高さとなるようにする。

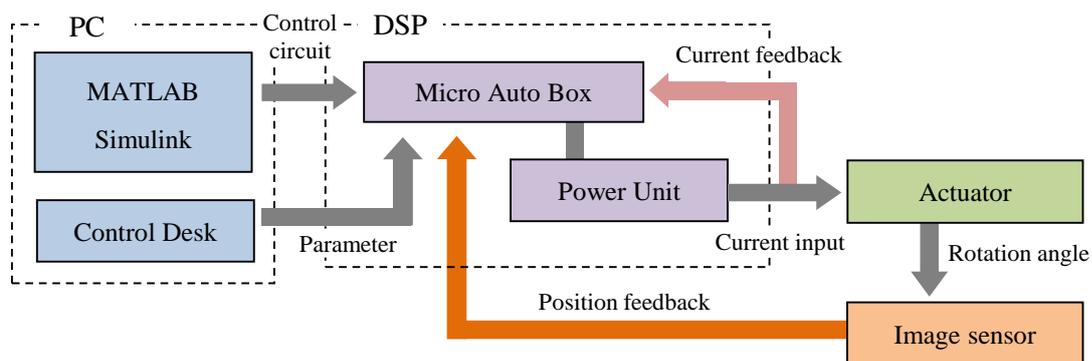


Fig. 3.4 Control system configuration

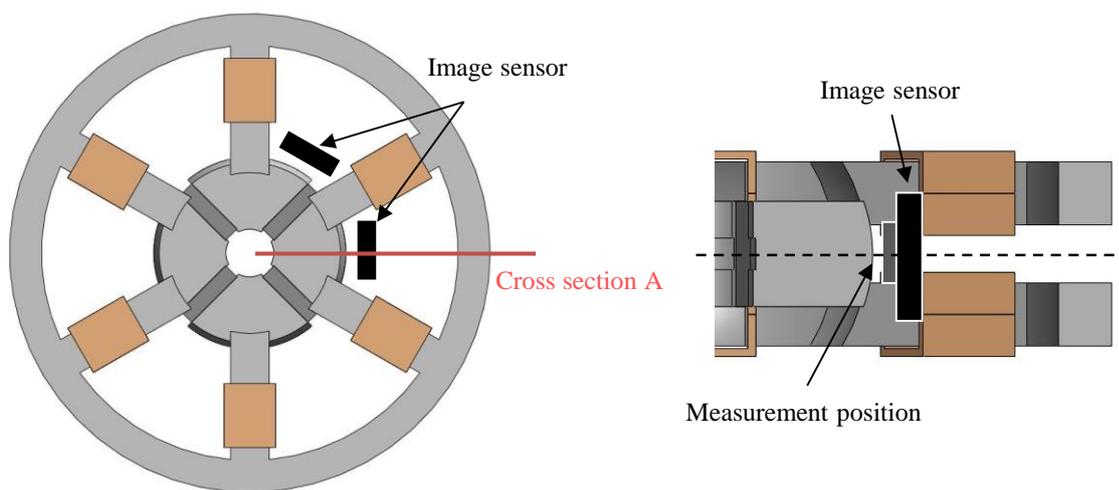


Fig. 3.5 Sensor installation position

3.2.2 センサ出力から回転角度への変換

センサ出力を可動子回転角へと変換する行列の導出を, Fig. 3.6 を用いて説明する。まず, 図のように可動子の中心が原点となるような直交座標系をとり, Z' 軸とベクトル r_1, r_2 を定義する。 Z' 軸は可動子の軸方向であり, γ 及び α で表される角度に傾いているものとする。 r_1, r_2 はセンサの設置位置を示すベクトルであり, それぞれ次式で表される。

$$\mathbf{e}_{Z'} = [\sin \gamma \cos \alpha \quad \sin \gamma \sin \alpha \quad \cos \gamma]^T \quad (3.1)$$

$$\mathbf{r}_k = [R \cos \theta_k \quad R \sin \theta_k \quad 0]^T, (k=1,2 \quad \theta_1 = 0 \quad \theta_2 = \theta) \quad (3.2)$$

ここで, $\mathbf{e}_{Z'}$ は Z' 軸方向の単位ベクトル, R は可動子半径[mm]である。可動子の各軸の角速度をそれぞれ $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ とすると, 各軸方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_X, \mathbf{e}_Y, \mathbf{e}_Z$ を用いることで三自由度回転における角速度ベクトルは次式で表される。

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_x \mathbf{e}_X + \omega_y \mathbf{e}_Y + \omega_z \mathbf{e}_Z \quad (3.3)$$

(3.1)式及び(3.3)式より, 次式が得られる。

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x + \omega_z \sin \gamma \cos \alpha) \mathbf{e}_X + (\omega_y + \omega_z \sin \gamma \sin \alpha) \mathbf{e}_Y + \omega_z \cos \gamma \mathbf{e}_Z \quad (3.4)$$

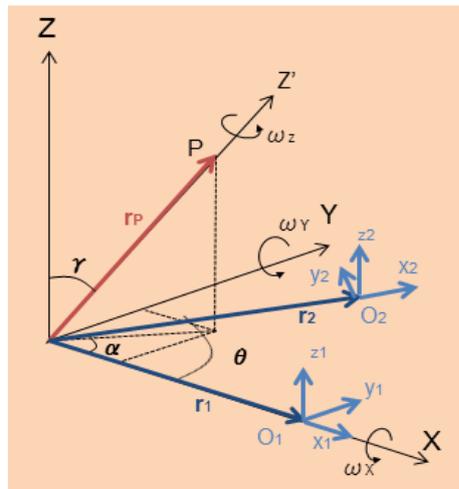


Fig. 3.6 Definition of the axes and vectors

また、ベクトル \mathbf{r}_k で表される位置における速度ベクトル \mathbf{v}_k は、次式で表わされる。

$$\mathbf{v}_k = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_k \quad (3.5)$$

(3.2)式及び(3.4)式を(3.5)式に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} v_{Xk} \\ v_{Yk} \\ v_{Zk} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin \theta_k \cos \gamma \\ 0 & 0 & \cos \theta_k \cos \gamma \\ \sin \theta_k & -\cos \theta_k & \sin \theta_k \sin \gamma \cos \alpha - \cos \theta_k \sin \gamma \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ここで、 v_{Xk} , v_{Yk} , v_{Zk} はそれぞれ XYZ 直交座標系における速度成分であるため、Fig. 3.6 で示すような、 \mathbf{r}_k と X 軸の向きを一致させた座標系における速度成分に変換する。Z 軸まわりに θ_k だけ回転させる際の回転行列 \mathbf{A} は次式で表される。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k & 0 \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

また、変換後の座標系における速度成分 v_{xk} , v_{yk} , v_{zk} は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_{Xk} \\ v_{Yk} \\ v_{Zk} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

(3.6)式及び(3.7)式を(3.8)式に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \gamma \\ \sin \theta_k & -\cos \theta_k & \sin \theta_k \sin \gamma \cos \alpha - \cos \theta_k \sin \gamma \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

(3.9)式に $k=1$ 及び $k=2$ を代入すると、各速度成分は次式で表される。

$$v_{x1} = 0 \quad (3.10)$$

$$v_{y1} = \omega_Z \cos \gamma \quad (3.11)$$

$$v_{z1} = -\omega_Y - \omega_Z \sin \gamma \sin \alpha \quad (3.12)$$

$$v_{x2} = 0 \quad (3.13)$$

$$v_{y2} = \omega_Z \cos \gamma \quad (3.14)$$

$$v_{z2} = \omega_X \sin \theta - \omega_Y \cos \theta + \omega_Z (\sin \theta \sin \gamma \cos \alpha - \cos \theta \sin \gamma \sin \alpha) \quad (3.15)$$

センサ出力により得られる y 成分及び z 成分を取り出すと、(3.10)~(3.15)式は以下の行列式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} v_y \\ v_{z1} \\ v_{z2} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cos \gamma \\ 0 & -1 & -\sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \theta & -\cos \theta & \sin \theta \sin \gamma \cos \alpha - \cos \theta \sin \gamma \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

(3.16)式は、各軸回転の角速度からセンサ位置における可動子表面の速度を導く、順運動学を表す行列式となっている。しかし、センサの出力から可動子回転角を導くためには逆運動学を用いることとなる。そこで逆行列を用いて(3.16)式を変形すると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} = \frac{1}{R \sin \theta \cos \gamma} \begin{bmatrix} -\sin \theta \sin \gamma \cos \alpha & -\cos \theta \cos \gamma & \cos \gamma \\ -\sin \theta \sin \gamma \sin \alpha & -\sin \theta \cos \gamma & 0 \\ \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ v_{z1} \\ v_{z2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

(3.17)式がセンサ出力(可動子表面の速度)から各軸の角速度への変換を表す行列式である。ここで、行列式中で用いられている α 及び γ の初期値は 0 であるが、可動子の回転とともにその値が変化するため、計算によって得られた可動子の X 軸及び Y 軸の回転角 θ_x , θ_y を α 及び γ に変換し、次ステップの計算に用いる必要がある。

Fig. 3.7 に各回転角の関係を示す。Fig. 3.7 より、可動子軸方向を示すベクトル \mathbf{r} , 及び

$\tan\theta_x$, $\tan\theta_y$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{r} = R[\sin\gamma\cos\alpha \quad \sin\gamma\sin\alpha \quad \cos\gamma]^T \quad (3.18)$$

$$\tan\theta_x = \frac{\sin\gamma\sin\alpha}{\cos\gamma} \quad (3.19)$$

$$\tan\theta_y = \frac{\sin\gamma\cos\alpha}{\cos\gamma} \quad (3.20)$$

(3.18)~(3.20)式より, γ 及び α は θ_x , θ_y を用いて次式で表される。

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\theta_x + \tan^2\theta_y}}\right) \quad (3.21)$$

$$\alpha = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta_x}{\tan\theta_y}\right), & (\theta_y \neq 0) \\ 0, & (\theta_y = 0 \quad \theta_x = 0) \\ \frac{\pi}{2}, & (\theta_y = 0 \quad \theta_x > 0) \\ -\frac{\pi}{2}, & (\theta_y = 0 \quad \theta_x < 0) \end{cases} \quad (3.22)$$

(3.21), (3.22)式で得られた γ 及び α の値を次ステップの計算で用いることになる。以上の変換プロセスを Fig. 3.8 に示す。

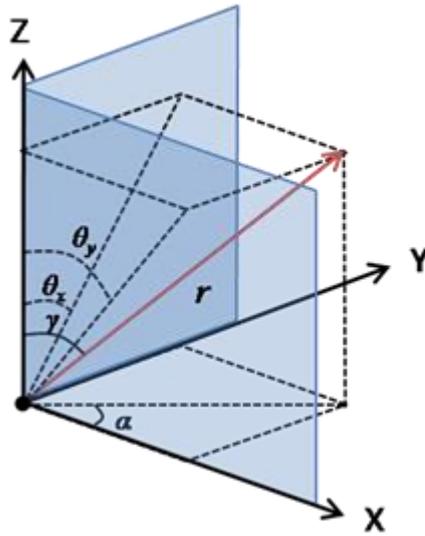


Fig. 3.7 Definition of the rotation angle

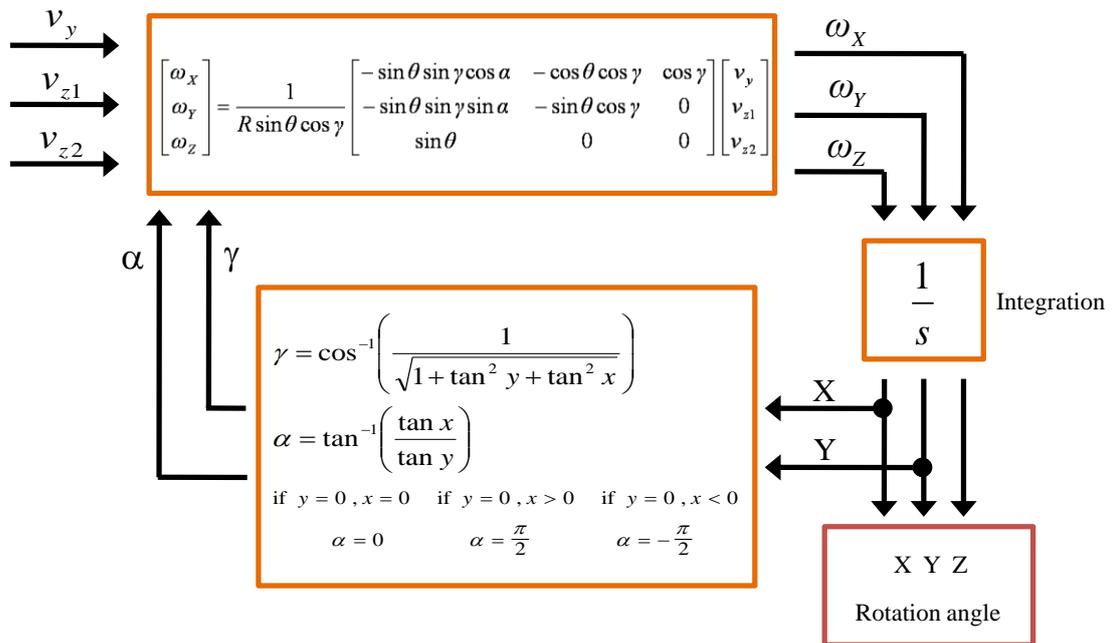


Fig. 3.8 Angle conversion

3.3 実験検証

本センシングシステムの妥当性を確認し、その有効性を評価するために、試作機による実験検証を行った。オープンループ制御時、及びクローズドループ制御時における可動子の回転角をイメージセンサとレーザ変位計により測定し、両者の結果の比較を行った。

3.3.1 オープンループ駆動時の回転角測定

センサにより得られる可動子回転角の妥当性を評価するため、アクチュエータをオープンループ制御で駆動させ、センサ出力とレーザ変位計で測定した回転角との比較を行った。レーザ変位計による測定の方法は、可動子に取り付けたバーの上部にある平面部にレーザを水平に照射し、その変位量を回転角に換算している (Fig. 3.9)。X 軸および、Y 軸の往復駆動について行った実験結果を Fig. 3.10, Fig. 3.11 に示す。

実験結果より、X 軸、Y 軸ともにイメージセンサにより測定した回転角とレーザ変位計による測定結果が良好に一致していることが分かる。また、どちらの結果においても、イメージセンサにより得られた回転角が時間の経過とともにマイナス方向にシフトしていく様子が確認できる。これはセンサの累積誤差によるものであると考えられる。イメージセンサの測定値は可動子表面の速度であり、この値を積分することで可動子回転角度として利用するために誤差が累積してしまう。

本実験により、センサにより得られた可動子表面の移動量が適切に回転角へと変換され、出力されていることを確認できたが、長時間の駆動により誤差が増加してしまうことが明らかになった。

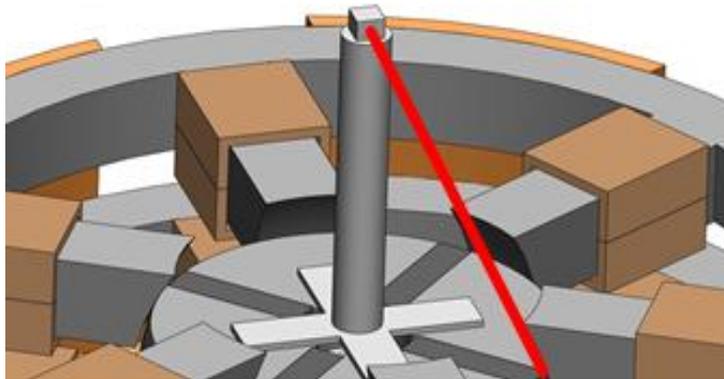


Fig. 3.9 Measuring method with laser displacement meter

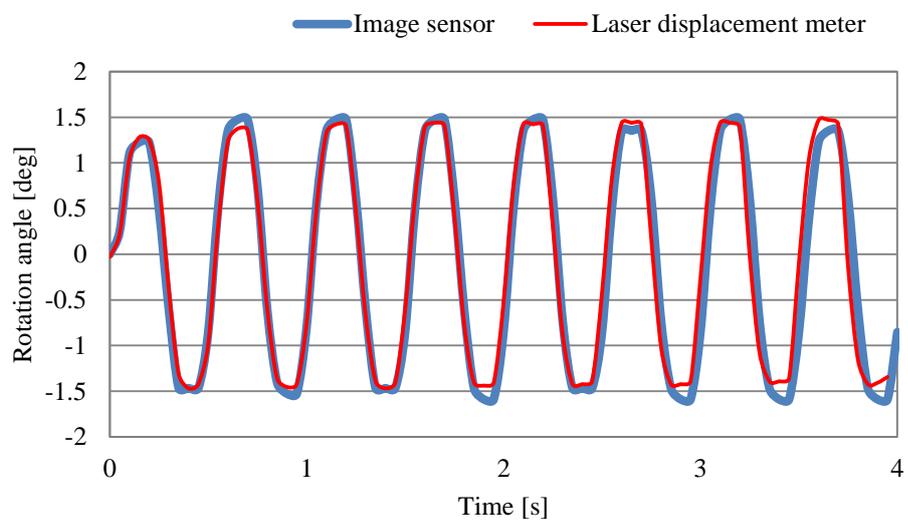


Fig. 3.10 Experimental result (open-loop control, X-axis)

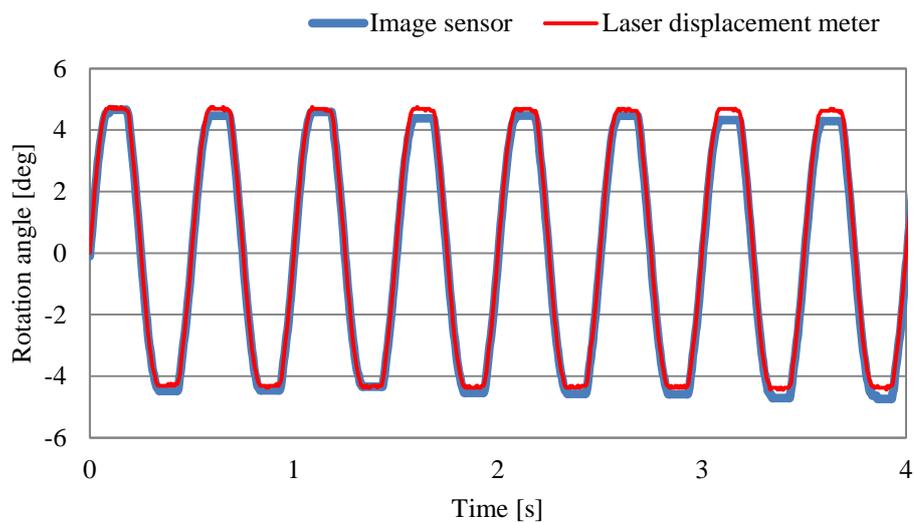


Fig. 3.11 Experimental result (open-loop control, Y-axis)

3.3.2 クローズドループ駆動時の回転角測定

イメージセンサによるセンシングシステムを用いて、X 軸及び Y 軸回転についてアクチュエータの位置フィードバック制御を行い、その時のセンサ及びレーザ変位計の出力を測定した。本実験に用いた制御システムの概略図を Fig. 3.12 に示す。センサにより得られた可動子表面の移動量を回転角度に変換し、指令値との誤差により各コイルへの出力を決定する。なお、位置フィードバックには PI 制御を用いている。

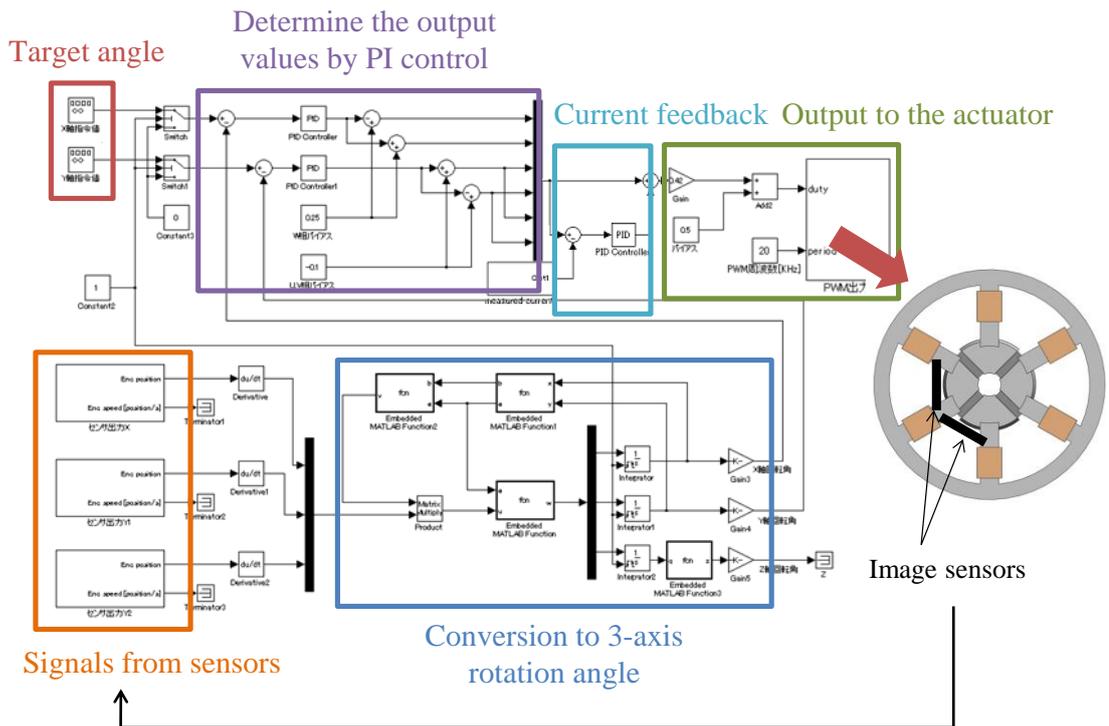


Fig. 3.12 Schematic view of the control system

また、本実験において、角度指令値として X 軸回転、Y 軸回転ともに振幅 5 度、周波数 1Hz の正弦波を与えた。Fig. 3.13, Fig. 3.14 に実験結果を示す。

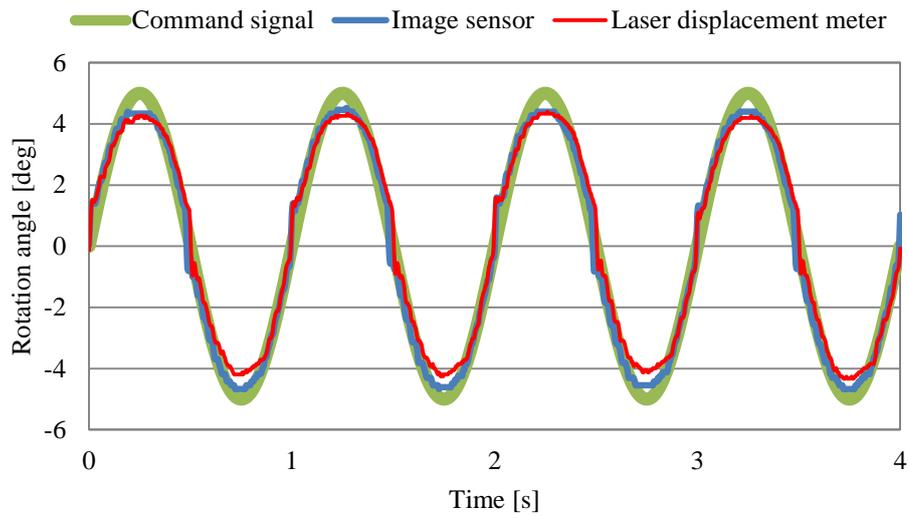


Fig. 3.13 Experimental result (closed-loop control, X-axis)

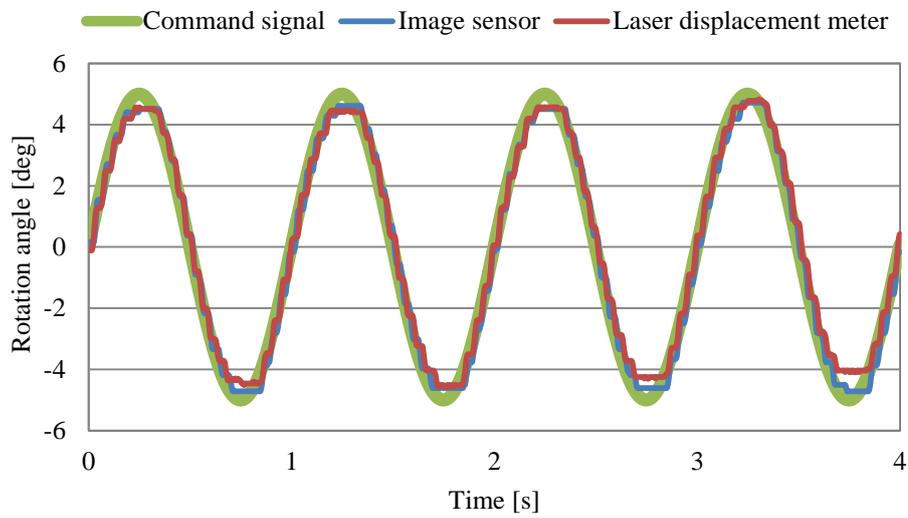


Fig. 3.14 Experimental result (closed-loop control, Y-axis)

実験結果より、位置フィードバック制御が適切に機能し、可動子が指令角度に追従して駆動していることが分かる。しかし X 軸、Y 軸のどちらの結果においても、回転角が大き

くなるに従って指令値とセンサ出力及びレーザ変位計出力との誤差が増え、振幅の最大値が指令値に達していない。振幅のピーク値において、X軸では最大16.1%、平均14.9%、Y軸では最大13.9%、平均9.4%の誤差を生じている。これは角度が増加することでアクチュエータのコギングトルクが大きくなり、誤差の補正に必要な電流値が大きくなるためであると考えられる。

また、Y軸回転における実験結果から、時間の経過とともにイメージセンサの出力とレーザ変位計の出力間の差が増加していることが確認できる。これはセンサにより得られる回転角と実際の回転角との誤差が増加していることを示しており、オープンループ制御下の場合と同様にイメージセンサの累積誤差が原因であると考えられる。

3.4 結言

本章では、三自由度球面電磁アクチュエータの位置フィードバック制御を行うため、搭載するセンサの検討を行った。そして、イメージセンサを用いたシステムについて、その構成及びセンサ出力の変換方法を示した。更に、システムの有効性を示すために検証実験を行い、イメージセンサにより可動子回転角の測定が可能であることを確認した。また、位置フィードバック制御下における実験では、可動子が指令値に追従して駆動することを確認し、イメージセンサによるセンシングシステム、及びそれらを用いたアクチュエータの位置フィードバック制御の妥当性、有効性を示すことができた。しかし、長時間の駆動により累積誤差が発生してしまうため、可動子の絶対位置検出が今後の課題として挙げられた。

次章では、本提案手法の大きな問題点である累積誤差の発生を解決するために、アクチュエータ可動子の絶対位置が可能な光学的センシング手法である、カラーセンサを用いた手法について述べる。

第4章

カラーセンサを用いた

球面アクチュエータ角度センシング

4.1 提案手法

4.1.1 センシングシステム

本章で提案する球面アクチュエータの角度検出手法は、可動子に着色を施し回転によって変化する色情報から角度測定を行うものである。本手法では、Fig. 4.1 に示す RGB カラーセンサを用いる。カラーセンサとは、測定部への入射光の R（赤） G（緑） B（青）成分の強度を出力するセンサであり、物体の色を測定することが可能である。各色の強度は 12 bit デジタル出力となっている。

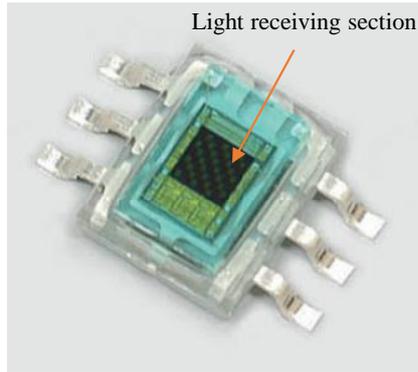


Fig. 4.1 Color sensor (Hamamatsu Photonics S9706)

提案センシング手法のシステム構成を Fig. 4.2 に示す。アクチュエータ可動子の側面には着色が施されており、さらに図中に示すように二本の光ファイバーが設置されている。光ファイバーの他端は二股に分かれており、それぞれ LED とカラーセンサに接続されている。これにより、LED から発せられた光が可動子側面で反射し、カラーセンサに入射することで可動子側面の二ヶ所の色情報を取得する。カラーセンサによって取得した RGB 情報は DSP (Digital Signal Processor) へと入力され、事前に用意したマッピングデータ (可動子側面上の位置と色の関係をまとめたもの) と比較することで、現在二つのセンサが可動子側面上のどの位置を測定しているかが確定される。その後、確定した二つの位置情報をアクチュエータ可動子の三軸回転角度へと変換する。提案する手法は以上のプロセスにより回転角度を測定するものである。

次に本手法を用いる利点について説明する。カラーセンサを用いる場合、センサの測定値は色情報であるため可動子の絶対角度を測定可能である。また、前述したように光ファイバーによってアクチュエータ外部に測定情報を送ることができるため、アクチュエータ内部には光ファイバーの先端のみを設置し、カラーセンサ自体はアクチュエータ外部に搭載することが可能である。これは第3章で述べたイメージセンサを用いた手法には無い特長であり、省スペース化が求められる球面アクチュエータ角度測定には有利である。カラーセンサと同様に光ファイバーにより測定した光を送ることができるセンサは他にも存在するが (光強度センサ等)、カラーセンサは測定部への入射光の RGB 成分の強度を出

力するセンサであるため、1センサで3つの情報を取得することができる。そのため球面アクチュエータ可動子の三軸回転角度を決定するために必要なセンサ数を低減することが可能になると考えられる。なお、本手法で2つのカラーセンサを用いている理由は、1センサの場合に測定点が回転軸と一致すると、可動子が回転しても測定値が変化しないためである。

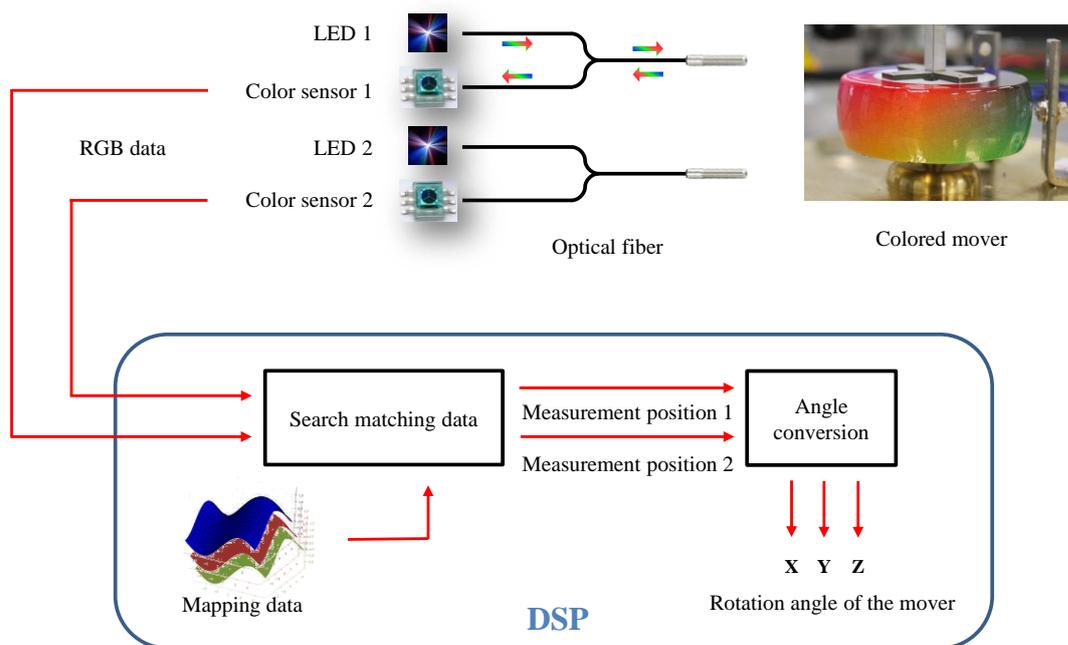


Fig. 4.2 System configuration

4.1.2 着色パターン

可動子側面への着色パターンは、Fig. 4.3～Fig. 4.5に示すように θ 方向にRとBの値の比率が変化し、 φ 方向にGの値の比率が直線状に変化するようになっている。また、各色の強度は0を最小値、255を最大値としており、使用カラーセンサが12 bit (4096階調)の測定が可能であるため、理論上の測定精度は θ 方向度0.35度、 φ 方向0.24度となる。なお、RおよびBの単位角度あたりの色の変化率および最大強度となる位置が異なっているのは、全く同じ色となる地点を可能な限り減少させるためである。

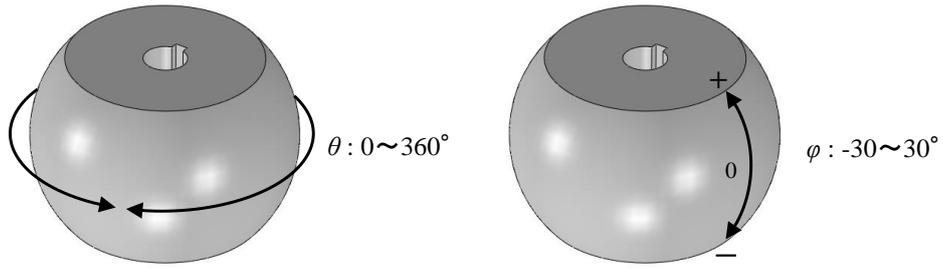


Fig. 4.3 Definition of the angles

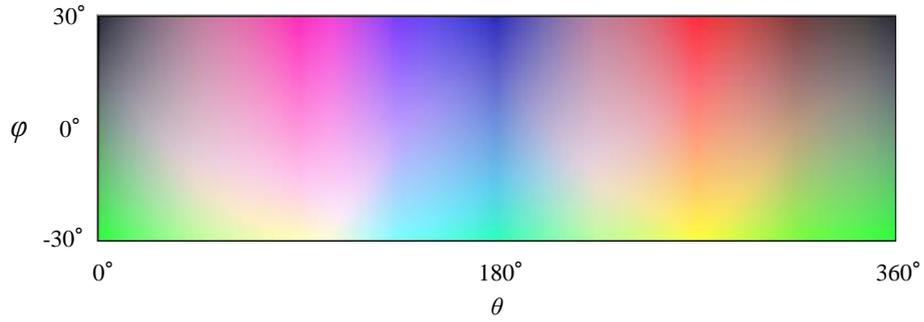


Fig. 4.4 Coloring pattern

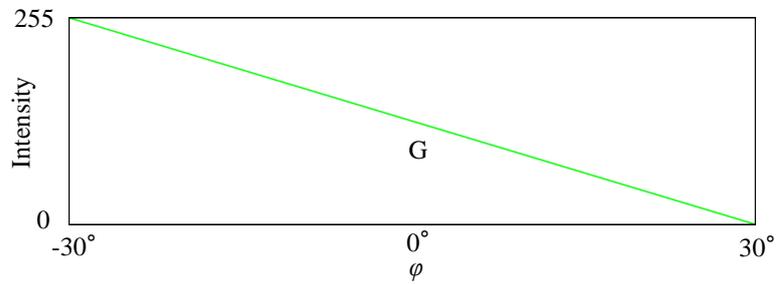
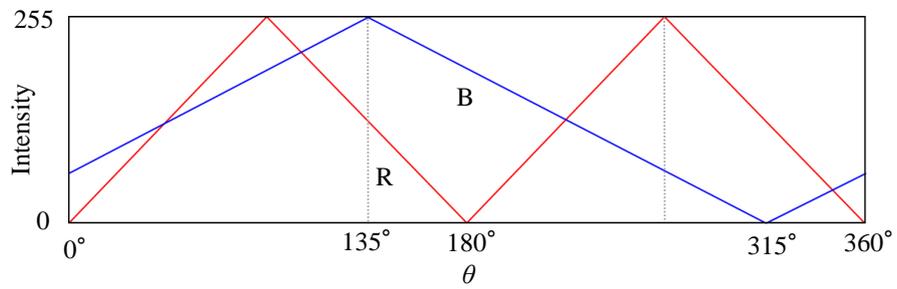


Fig. 4.5 Color intensity

4.1.3 一致探索手法

本提案手法では前述したように、事前に用意したマッピングデータとカラーセンサからの色情報とを比較し、可動子上の測定点を決定している。マッピングデータは θ 方向（経度方向） ϕ 方向（緯度方向）ともに1度間隔で作成し、各点におけるR, G, Bの色強度を記録したもとなっている。

センサ出力とマッピングデータの一致探索の際には「全探索」を用いている、Fig. 4.6に示すように、マッピングデータの全点とセンサ出力を比較し、すべての色に対して指定した許容誤差以内に収まる点を測定点とする。複数の点が条件を満たした場合、前回の測定点と近い点を測定点とする。

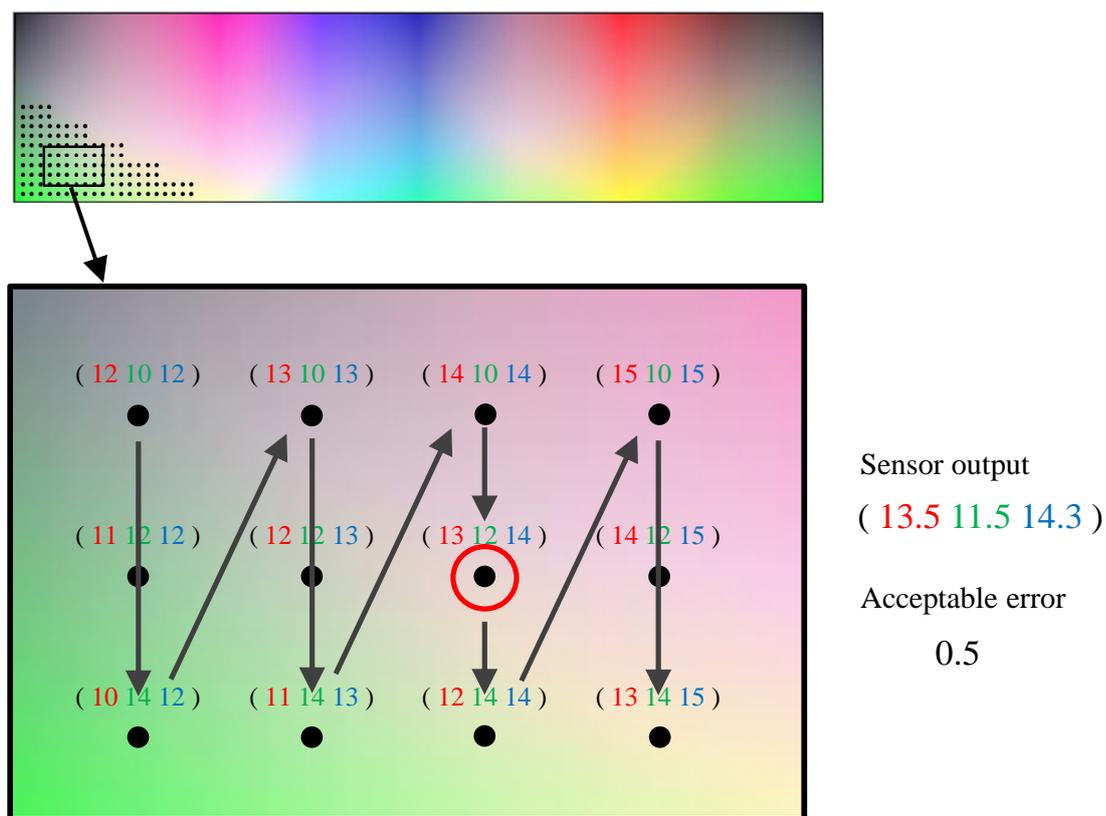


Fig. 4.6 Search algorithm (Full search)

マッピングデータの取得が1度間隔であるため、以上の過程で決定した測定点は1度の分解能となる。そこで次に、決定した測定点と周囲の点の値を用い、以下の式を用いて Fig. 4.7 で示すような線形補間処理を行う。ここで P' は線形補間後の最終的な決定測定点、 P は線形補間前の決定点、 S_r , S_g , はセンサから取得した測定点の各色の強度、 $M_r(x,y)$, $M_g(x,y)$ は点 (x,y) におけるマッピングデータ上の各色の強度である。

以上の処理を繰り返し行うことで、制御の各ステップにおけるアクチュエータ可動子上の測定点を決定している。

$$P'_x = P_x + \frac{S_r - M_r(x, y)}{M_r(x+1, y) - M_r(x, y)} \quad (4.1)$$

$$P'_y = P_y + \frac{S_g - M_g(x, y)}{M_g(x, y+1) - M_g(x, y)} \quad (4.2)$$

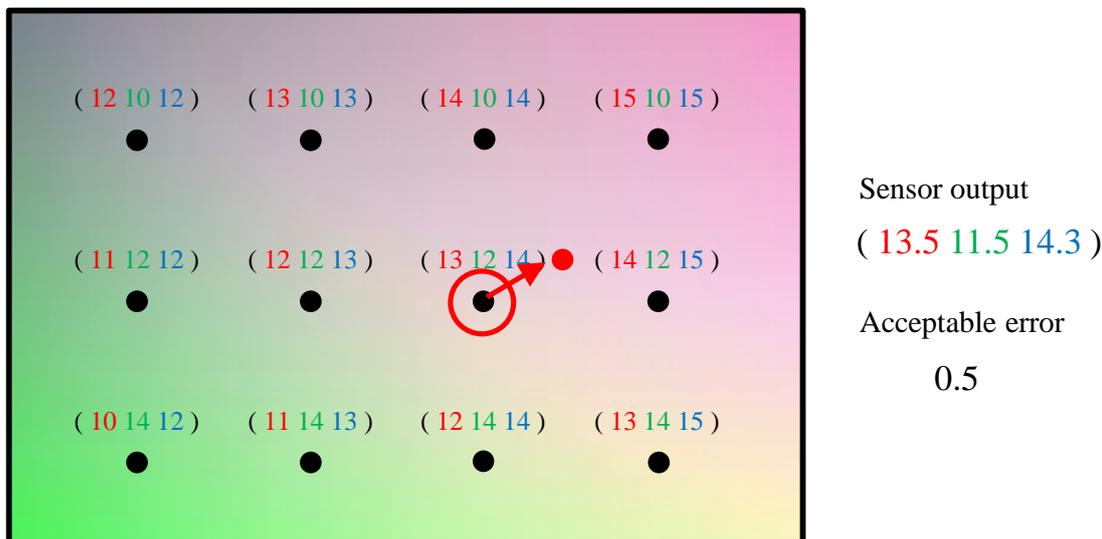


Fig. 4.7 Linear interpolation

4.2 シミュレーションによる提案手法検証

4.2.1 シミュレーション方法

提案手法によって適切に可動子の回転角度を算出可能であることを確認するため、シミュレーションによる検証を行った。ソフトウェアには Matlab & Simulink を用い、Fig. 4.8 のブロック線図に示すプログラムを作成することでシミュレーションを行った。可動子の回転角度を入力値とし、はじめにマッピングデータからセンサの色情報出力を決定する。その後探索プログラムによって算出角度を出力する。その際に各ステップで探索にかかった時間も同時に出力させている。

入力する可動子角度は、Fig. 4.9 に示すように θ - φ 平面上をセンサ測定点が直線状に変化する条件と曲線状に変化する条件に加え、測定点が 100 ms 毎にランダムで変化する条件でもシミュレーションを行った。

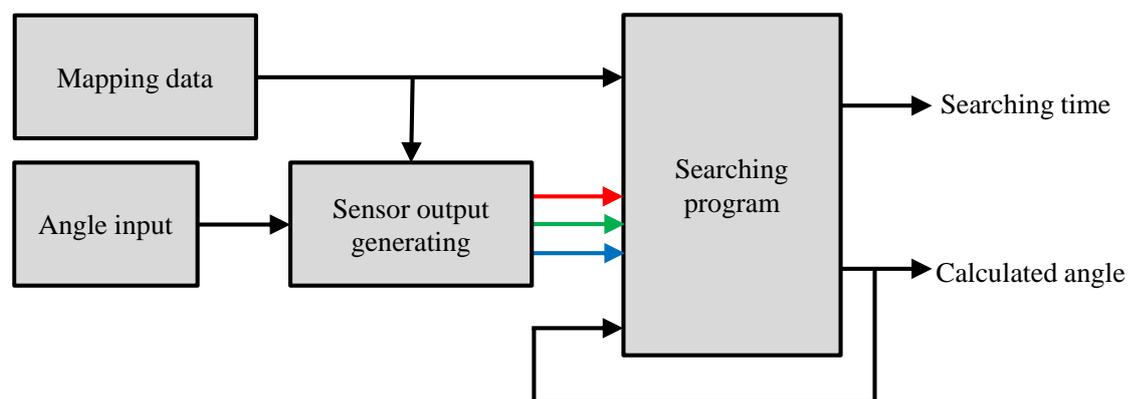


Fig. 4.8 Block diagram of the simulation

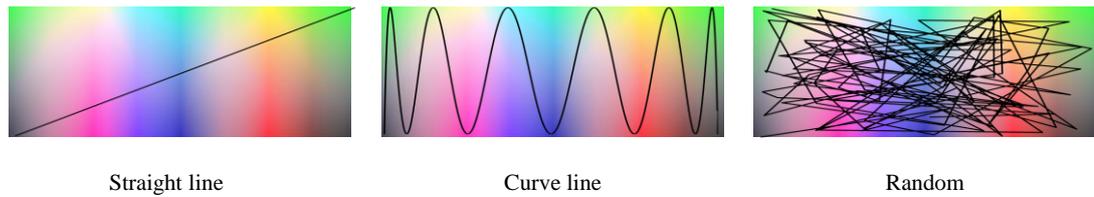


Fig. 4.9 Input angle pattern

4.2.2 シミュレーション結果・考察

各シミュレーション結果を Fig. 4.10～Fig. 4.15 に、各シミュレーションにおける探索時間を Table 4.1 にまとめて示す。どの結果からもアクチュエータ可動子の回転角度を適切に算出できていることが確認できる。各ステップでの探索時間を見ると、平均で約 23 ms、最大で約 35 ms となっている。

探索時間は角度測定精度に大きく影響する要因であり、実機での測定の際にはこの時間に加えカラーセンサが色を取得するのに要する時間も考慮しなければならない。探索手法として採用している全探索は、マッピングデータのすべての点とセンサ出力を比較するために探索漏れは発生しないが、比較回数が非常に多いために時間がかかってしまう。そこで探索処理の高速化のためにはアルゴリズムの変更が必要となる。次節では探索の高速化を目指した探索アルゴリズムの提案を行う。

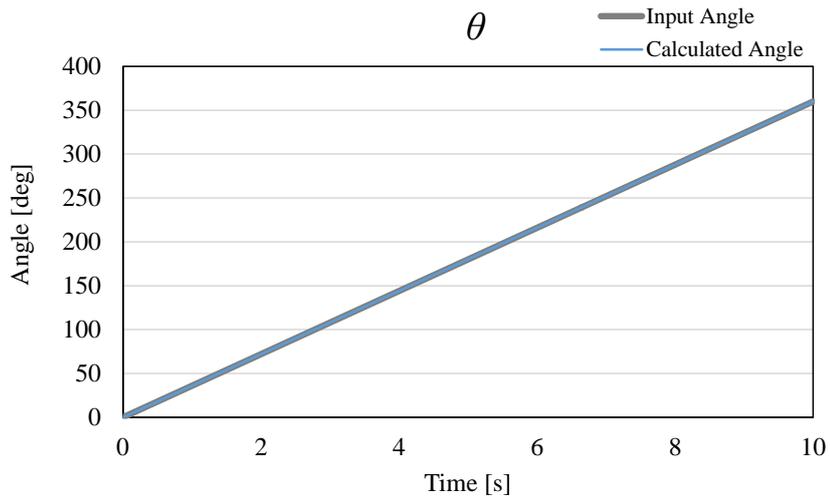


Fig. 4.10 Simulation results (Linear input, θ)

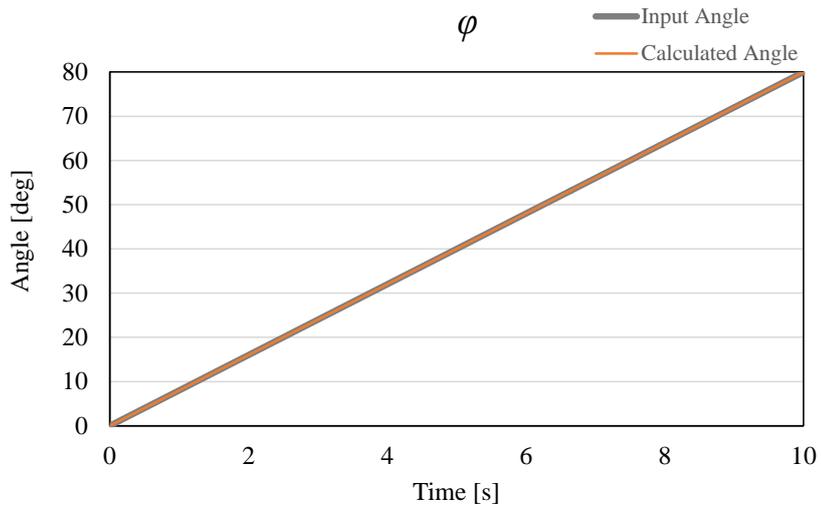


Fig. 4.11 Simulation results (Linear input, φ)

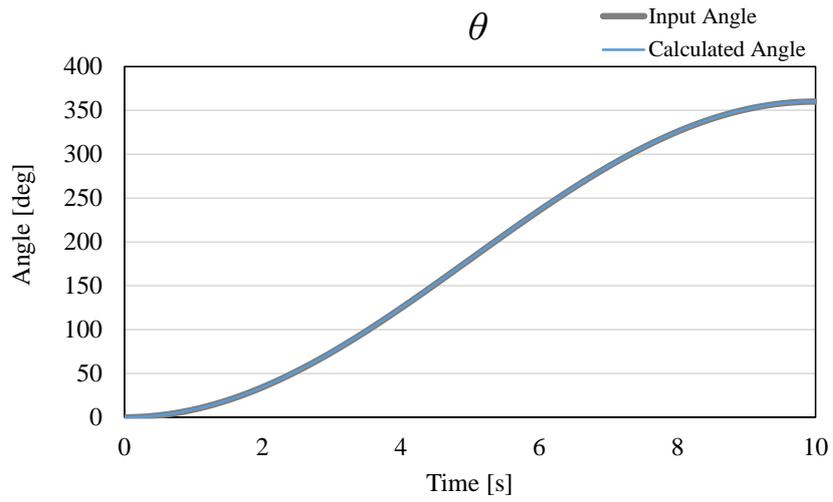


Fig. 4.12 Simulation results (Curvilinear input, θ)

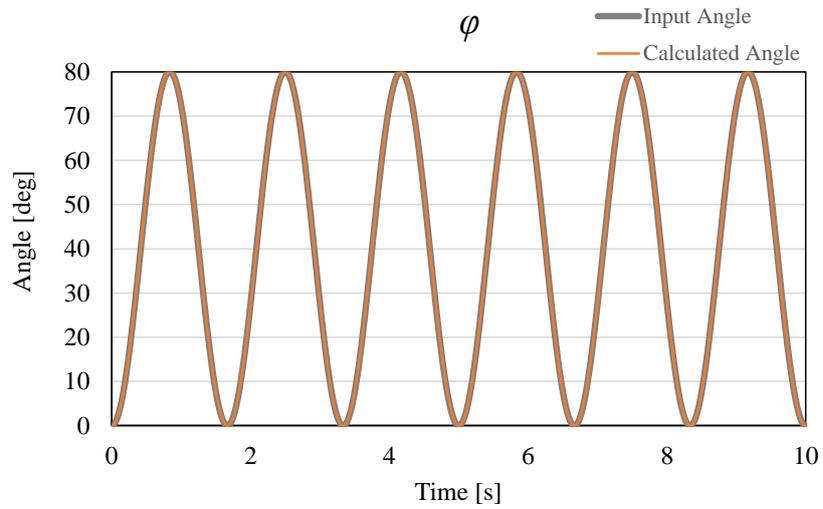


Fig. 4.13 Simulation results (Curvilinear input, φ)

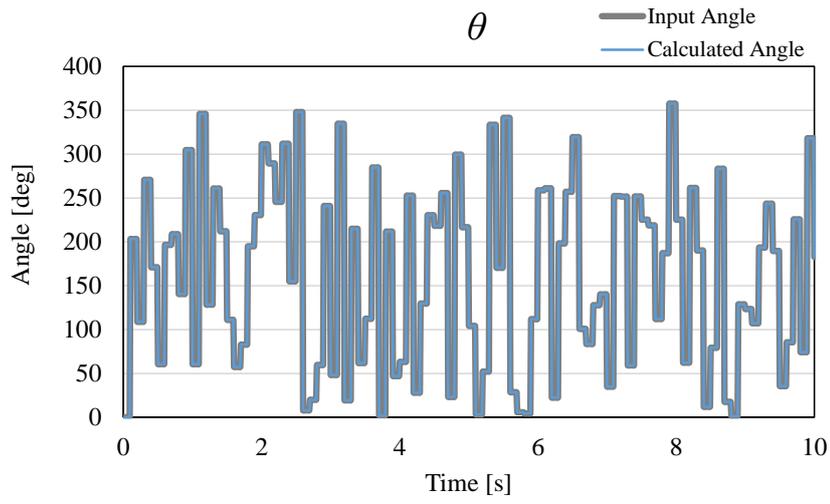


Fig. 4.14 Simulation results (Random input, θ)

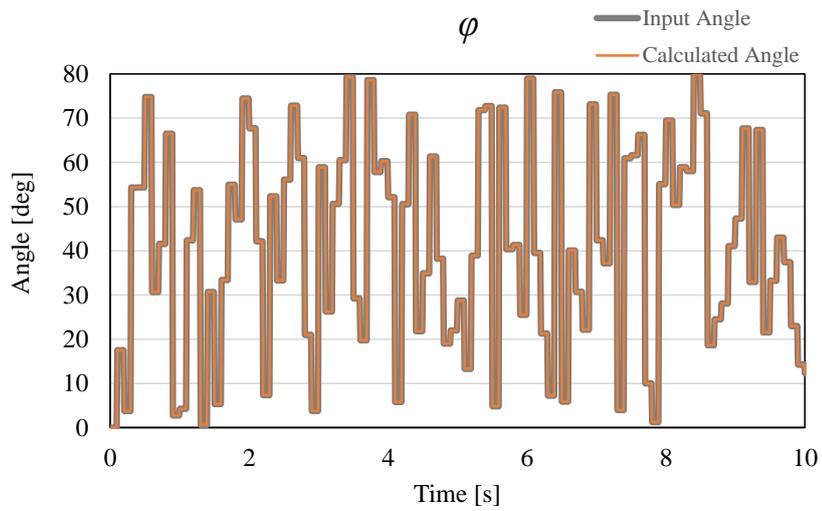


Fig. 4.15 Simulation results (Random input, φ)

Table 4.1 Searching time

Linear input	Average	23.36 [ms]
	Maximum	25.62 [ms]
Curvilinear input	Average	23.45 [ms]
	Maximum	35.88 [ms]
Random input	Average	23.28 [ms]
	Maximum	35.55 [ms]

4.3 一致探索手法の改良

4.3.1 探索の高速化

一致探索処理の高速化のための提案手法について説明する。本手法はセンサ出力との比較を行うマッピングデータ上の点数を削減することを狙ったものであり、Fig. 4.16 に示す各色の単位勾配ベクトルを用いる方法である。具体的には、従来用いていたマッピングデータの各点での色強度情報に加えて、各点における各色の勾配ベクトルを情報として用いることになる。勾配ベクトルとは、各点における変化率が最大になる方向へ、変化率の値を大きさに持つベクトルである。つまり、本手法においてはマッピングデータ上の各点の色情報とその点において各色がどの方向に最も大きく変化するかという情報をあらかじめ取得して利用することになる。

次に前述のデータを用いて測定点を探索する方法について Fig. 4.17 を用いて説明する。はじめに前ステップでの決定点から探索をはじめ、その点の各データおよびセンサ出力から以下の式 4.3 を用いて \mathbf{V} を算出する。

$$\mathbf{V} = (S_r - M_r)\mathbf{v}_r + (S_g - M_g)\mathbf{v}_g + (S_b - M_b)\mathbf{v}_b \quad (4.3)$$

ここで、 \mathbf{V} は、次の探索点を決定するために使用するベクトルであり、三色の誤差合計が最も大きく減少する方向を表している。 S_r, S_g, S_b はそれぞれの色のセンサ出力、 M_r, M_g, M_b はそれぞれ各色の色強度データ、 $\mathbf{v}_r, \mathbf{v}_g, \mathbf{v}_b$ は各色の単位勾配ベクトルである。

次に、 \mathbf{V} の方向に応じて現在の探索点の上下左右の 4 点から次の探索点を選択し、Fig. 4.17 の左図で示すように、各色の誤差が設定値より小さくなるまでこれを繰り返す。以上のアルゴリズムによって、全探索の場合と比較して探索する点数を大幅に削減可能になるため、一致探索処理の高速化が期待できる。

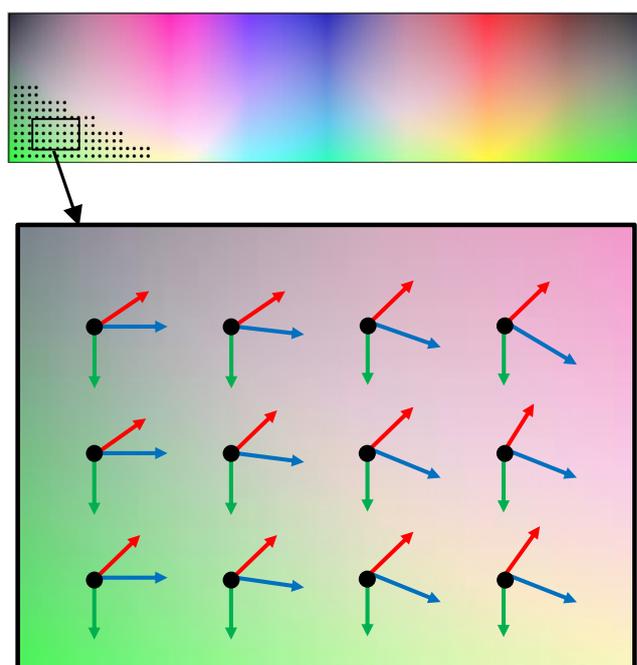


Fig. 4.16 Color gradient vector

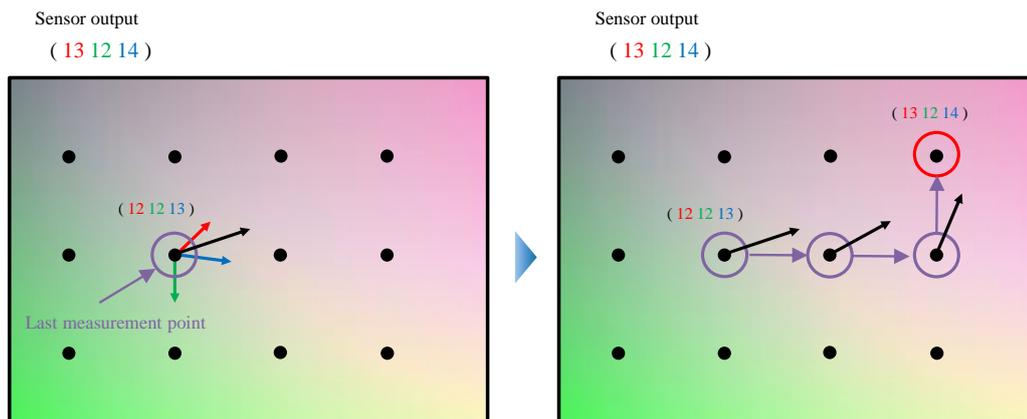


Fig. 4.17 Search algorithm (Proposed method)

本提案手法において、アクチュエータの回転角度が1ステップで大きく変化した場合に適切に回転角度を算出できないことがある。これは着色パターンに起因するものであり、局所解に陥ることにより Fig. 4.18 左図に示すように2点間をループすることになる。そこで例外処理として、探索点が前々回の点と同じになった場合、条件により以下の処理を行う。

1. 各色の誤差が許容以内ならその点に決定
2. 各色の誤差が許容以上なら次の角度領域に移動し探索を再開

この処理を図で説明したものが Fig. 4.18 の右図であり、2点間のループになった場合に強制的に次の探索点を移動させることによって局所解を避けるものである。

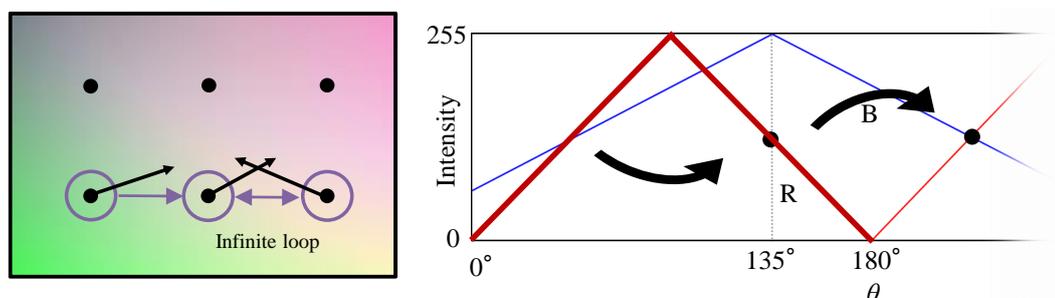


Fig. 4.18 Exception handling

4.3.2 シミュレーション結果・考察

前項で説明した提案手法を用いた場合のシミュレーションを、全探索の場合と同様に Matlab & Simulink を用いて行った。角度入力の場合は全探索の場合と同様に直線、曲線、ランダムな 3 パターンで行った。以下の Fig. 4.19～Fig. 4.24 に各シミュレーションの結果を、Table 4.2 に各シミュレーションにおける探索時間をまとめて示す。

各シミュレーション結果から、提案手法を用いた場合も全探索の場合と同様に適切に回転角度を算出できていることが確認できる。しかし角度入力ランダムに変化する場合は結果を見ると、経過時間 8 秒付近で入力とは大きく違う角度を算出していることが分かる。入力角度が約 225 度、算出角度が約 45 度となっており、この 2 つの角度は着色パターン上で唯一同じ色が生じる角度となっている。直線や曲線などの連続的に変化する角度入力の場合は問題にならないが、ランダムな入力の場合、同色の地点が存在するとどちらが正しい点であるかを判断することができず誤差が発生すると考えられる。

また探索に費やす時間を確認すると、どの角度入力の場合にも平均 1 ms 以下で探索が完了しており、全探索の場合と比較して大幅に高速化できていることが分かる。

このように同色点での誤認識という問題点が発生するものの、連続的に変化する角度入力の場合には、提案した一致探索手法によって全探索を用いた場合よりも高速にアクチュエータの角度を算出することが可能であることを明らかにすることができた。

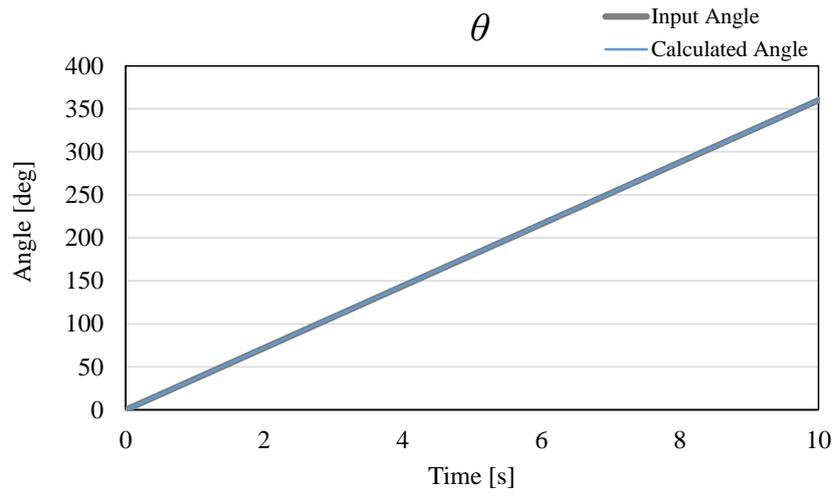


Fig. 4.19 Simulation results (Proposed method, Linear input, θ)

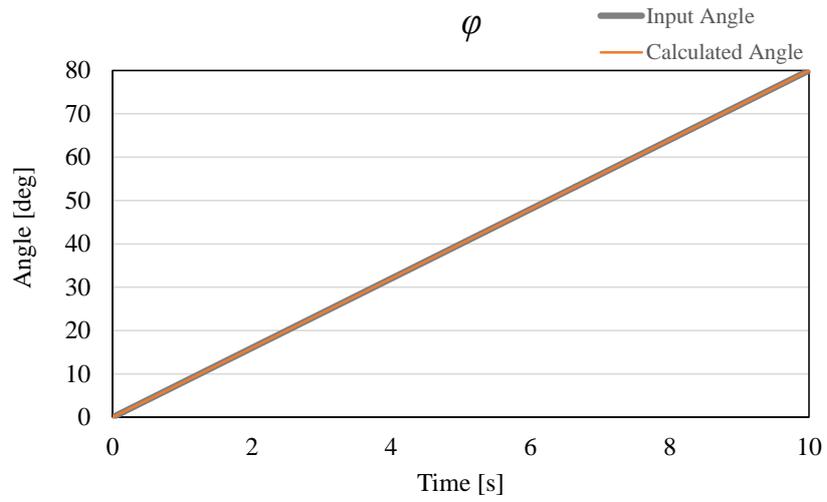


Fig. 4.20 Simulation results (Proposed method, Linear input, φ)

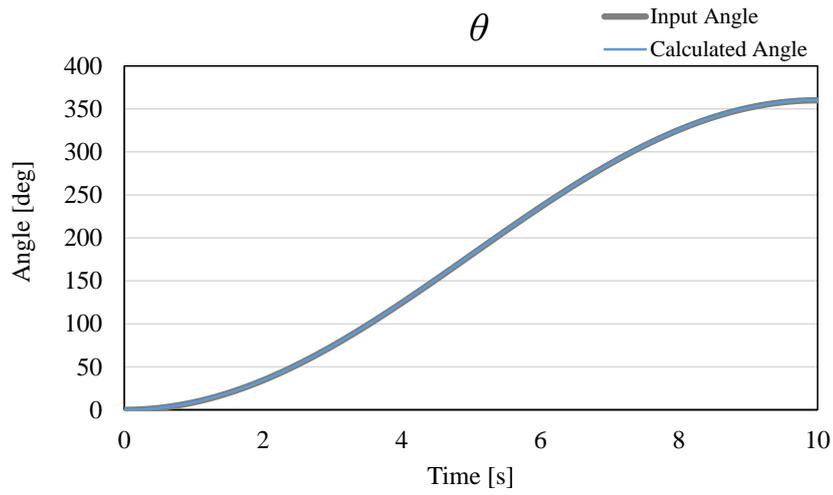


Fig. 4.21 Simulation results (Proposed method, Curvilinear input, θ)

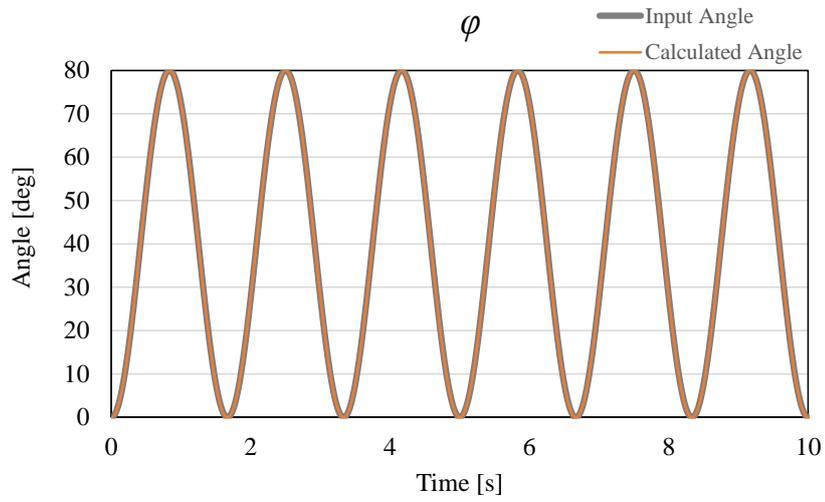


Fig. 4.22 Simulation results (Proposed method, Curvilinear input, φ)

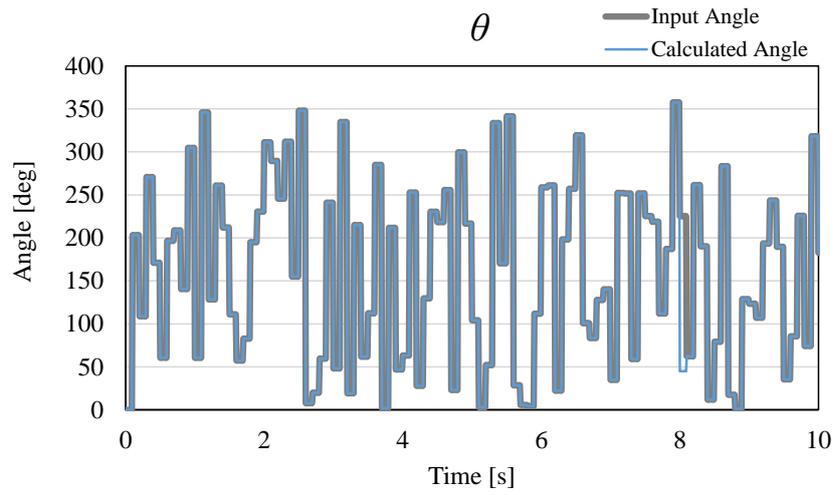


Fig. 4.23 Simulation results (Proposed method, Random input, θ)

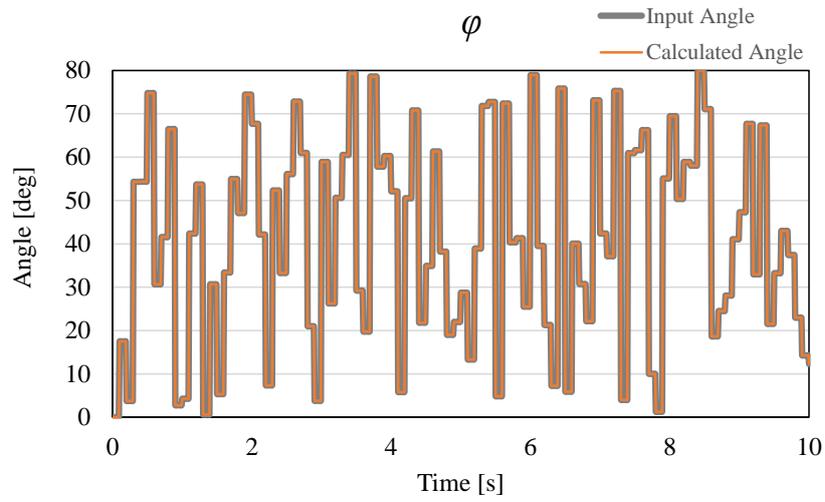


Fig. 4.24 Simulation results (Proposed method, Random input, φ)

Table 4.2 Searching time (Proposed method)

Linear input	Average	0.11 [ms]
	Maximum	1.44 [ms]
Curvilinear input	Average	0.11 [ms]
	Maximum	21.34 [ms]
Random input	Average	0.31 [ms]
	Maximum	18.54 [ms]

4.3.3 センサ信号ノイズの影響

前項までに述べてきたシミュレーションでは、アクチュエータ可動子に着色された色を正確に取得しているという前提で行っており、実際にアクチュエータの角度測定に用いた場合に生じると考えられる様々な外乱を考慮しない理想状態での結果となっている。そこで本項では、シミュレーション中で用いるセンサ信号にノイズ信号を重畳した場合のシミュレーションを行い、提案手法が適切に角度算出可能かどうかの確認を行う。本シミュレーションのブロック線図を Fig. 4.25 に示す。

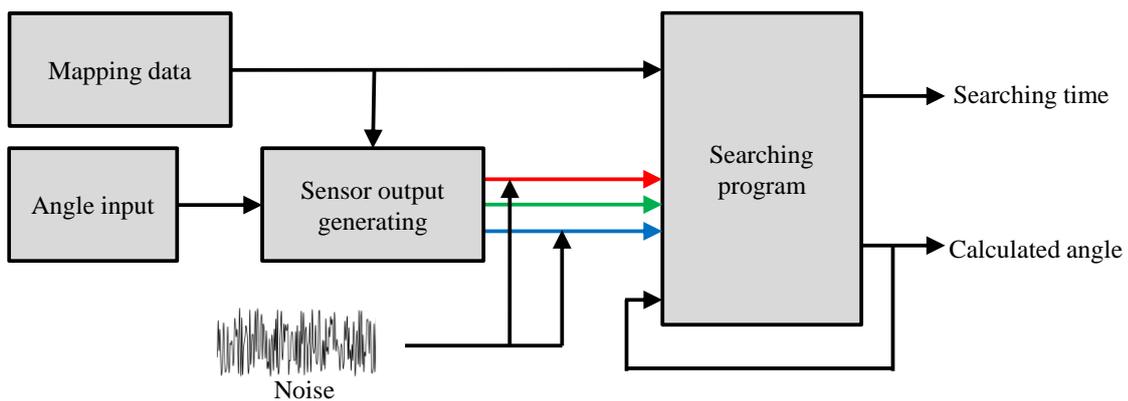


Fig. 4.25 Noise addition to the block diagram

角度入力は一項目までに用いたもののうち変化が連続的である 2 パターン（直線、曲線）とし、ノイズ強度に関しては着色強度最大値 255 の 5% (± 12.75) と 10% (± 25.5) の 2 条件で行った。 θ 方向の回転角度に各シミュレーションの結果を角度以下の Fig. 4.26～Fig. 4.29 に示す。

各結果より、どの角度入力に対してもノイズが増加するに従い算出角度にも脈動が発生していることが確認できる。また入力値と算出値が大きくかけ離れている部分が複数見られるが、回転角度 0 度と 360 度付近で発生しているものは、 θ 方向の角度が 360 度以上になると 0 度に戻るという処理をしているためであり、角度測定に影響を与えるものではない。問題となるのは 45 度と 225 度付近で発生している誤差であり、これは前項で説明したように可動子上に同色の地点が存在するために発生するものである。センサ信号にノイズが重畳することにより 3 節 4 項で説明した例外処理が機能し、その結果真の測定点ではない同色の点に測定点が収束することによって発生する誤差だと考えられる。

大きな誤差が発生する前述の角度範囲を除いた場合、ノイズによる算出角度の脈動が見られるものの、適切に角度算出が行われており提案したアルゴリズムが破綻することなく機能しているといえる。

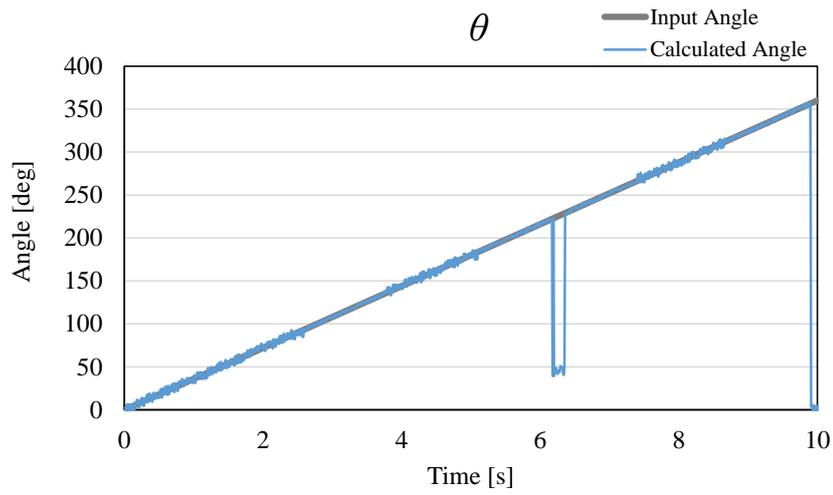


Fig. 4.26 Simulation results (Proposed method, Linear input, Noise 5%)

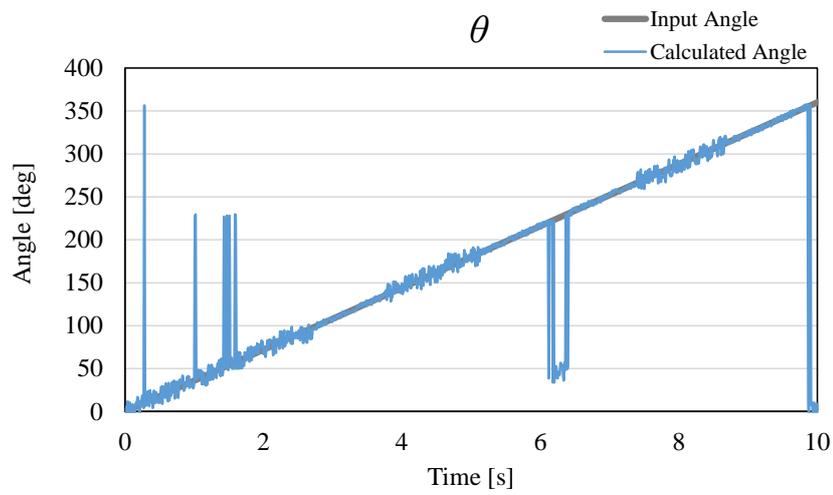


Fig. 4.27 Simulation results (Proposed method, Linear input, Noise 10%)

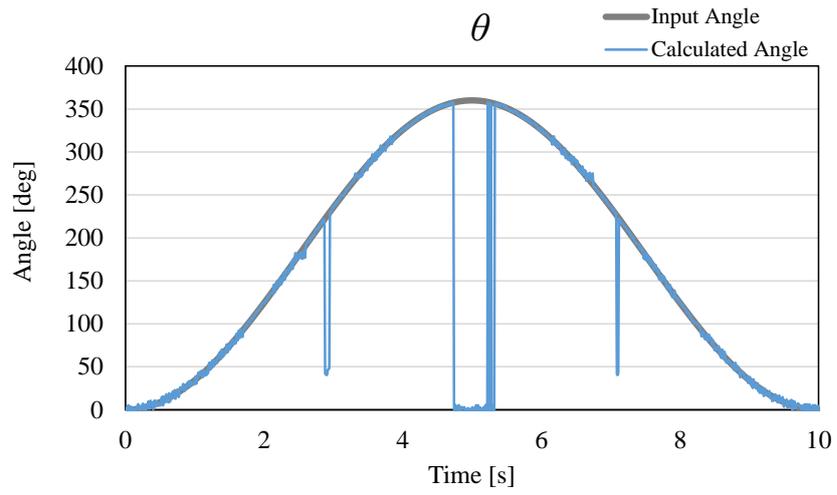


Fig. 4.28 Simulation results (Proposed method, Curvilinear input, Noise 5%)

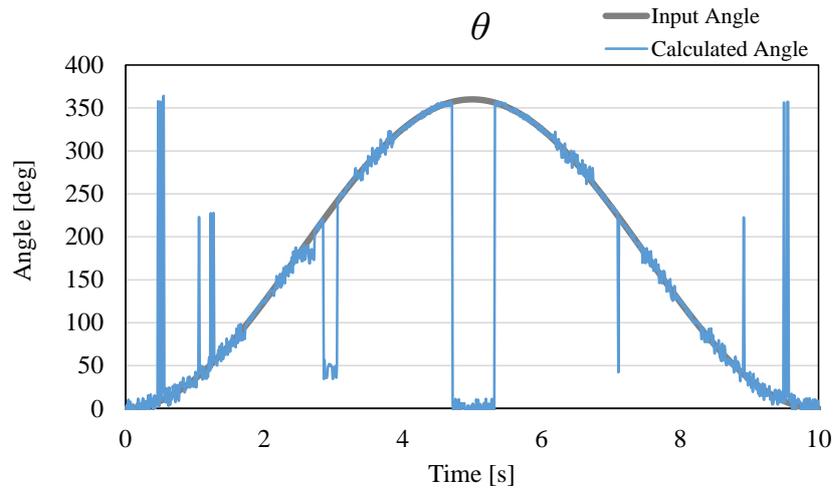


Fig. 4.29 Simulation results (Proposed method, Curvilinear input, Noise 10%)

4.3.4 2 センサの利用

本提案手法では、本章の 1 節で述べたように 2 つのセンサを用いている。この理由は、センサが 1 つのみの場合にはセンサ測定点を回転軸とした回転を測定することが不可能となるからである。これまでのシミュレーション結果はそのうちの 1 センサに注目したものであり、カラーセンサが可動子表面の移動を測定可能かどうかを調べるものであった。その結果同色の点で誤認識が発生するといった問題が生じたが、2 つ目のセンサの算出角度も同時に利用することでこの問題を回避することが可能であると考えられる。そこで本項では 2 センサの算出角度を利用し最終的なアクチュエータ角度を決定する場合のシミュレーション結果を示す。

具体的には、どちらかのセンサが同色の地点に近づくほど他方のセンサ出力の重み付けを大きくするといった処理を行う。同色地点付近では完全に他方のセンサの出力のみを利用する。以上の処理を加えた際のシミュレーション結果を以下の Fig. 4.30～Fig. 4.32 に示す。なお、センサの設置位置によって誤差の発生する角度は変化し、本シミュレーションの場合、センサ 1 は 135 度および 315 度、センサ 2 は 15 度および 195 度が該当する。また、ノイズの大きさは 5% (± 12.75)としている。

シミュレーション結果から、センサを 1 つのみ利用した場合には各センサともに同色の測定点で誤差が発生しているが、2 つのセンサの算出角度を用いることで大きな誤差の発生が無くなっている事が確認できる。

本節で述べてきた各シミュレーション結果より、提案した一致探索手法によってアクチュエータの可動子回転角度を測定することが可能であり、それに加え全探索の場合と比較して高速化が可能であることが明らかになり。その有効性を示すことができた。

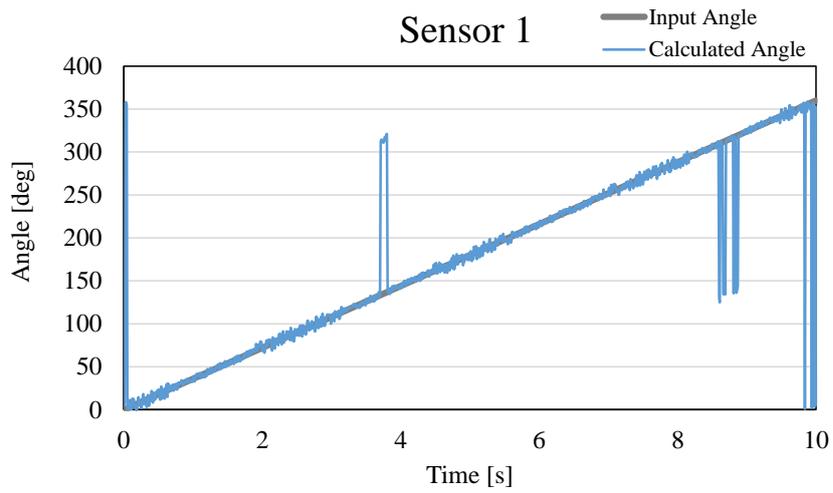


Fig. 4.30 Simulation results (Sensor 1, Noise 5%)

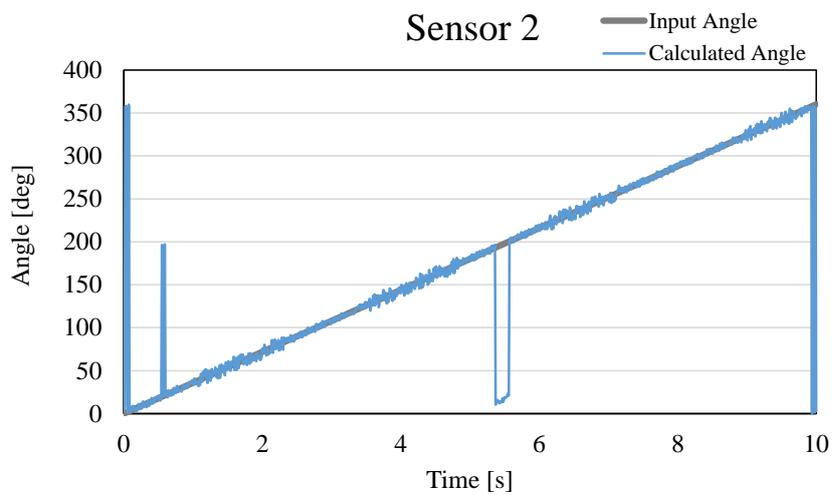


Fig. 4.31 Simulation results (Sensor 2, Noise 5%)

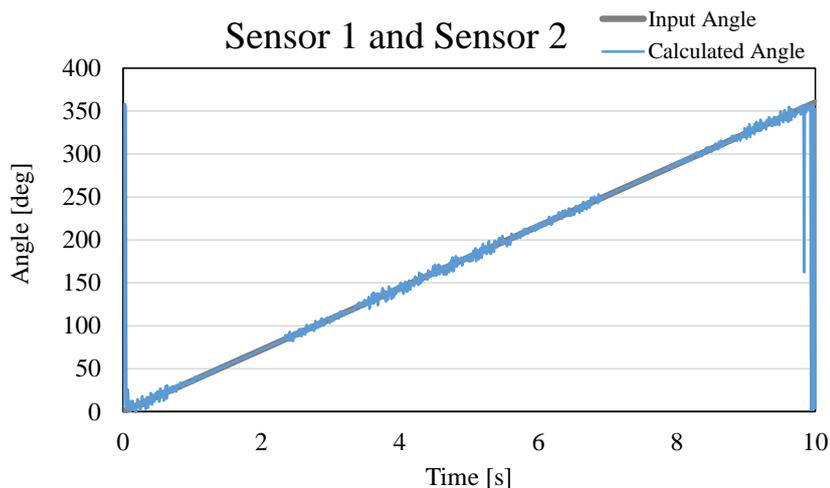


Fig. 4.32 Simulation results (Sensor 1 and Sensor 2, Noise 5%)

4.4 実験検証

4.4.1 測定装置

前節まではシミュレーションによって提案手法の有効性確認を行ってきたが、本節では実機を用いた実験検証によってその実現性を明らかにする。はじめに本項で実験に使用した測定装置の説明を行う。

Fig. 4.33 に示すのは試作した測定装置のモデル図である。サーボモータおよびその回転角度を検出するためのロータリーエンコーダがそれぞれ 2 つ設置されており、各回転軸が直行するような配置となっている。1 つ目のモータにはアクチュエータの可動子を模擬した球状の部品が取り付けられており、モータを回転させることによって球面アクチュエータの周方向への回転を再現している。2 つ目のモータにはアーチ状の部品が取り付けられており、複数の穴が空けられている。この穴は光ファイバーを取り付けるためのものであり、モータの回転によって取り付けられた光ファイバーの先端が球状部品の表面上を移動する

ようになっている。実際の球面アクチュエータでは、アクチュエータの可動子が三軸回転し、光ファイバーは固定されているが、単軸モータ 2 つでこの現象を再現するためにファイバー側が移動する構成とした。

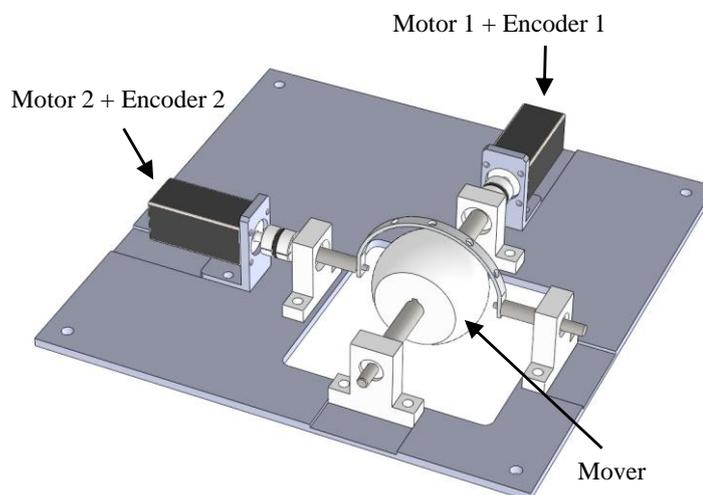


Fig. 4.33 Configuration of color measuring equipment

Fig. 4.34 に前述の測定装置を含めたセンシングシステムの全体構成を、Fig. 4.35 に製作したシステムの各部の写真を示す。図に示すようにシステムは大きく分けて測定装置、モーションコントロール部、カラーセンサ制御基板、PC の 4 つから構成されている。

測定装置上の 2 つのサーボモータはモーションコントロール部に接続されており、PC によって作成された駆動パターンにしたがって駆動させることが可能である。測定装置のアーチ状部品に接続された 2 つの光ファイバーは、それぞれ他端が二股に分かれており、制御基板上的カラーセンサと LED に接続されている。制御基板上的カラーセンサの動作はマイコンによって制御され、取得した色データは PC へと出力される。以上の構成により PC を用いてサーボモータの駆動とカラーセンサの色取得を行うことが可能となっている。

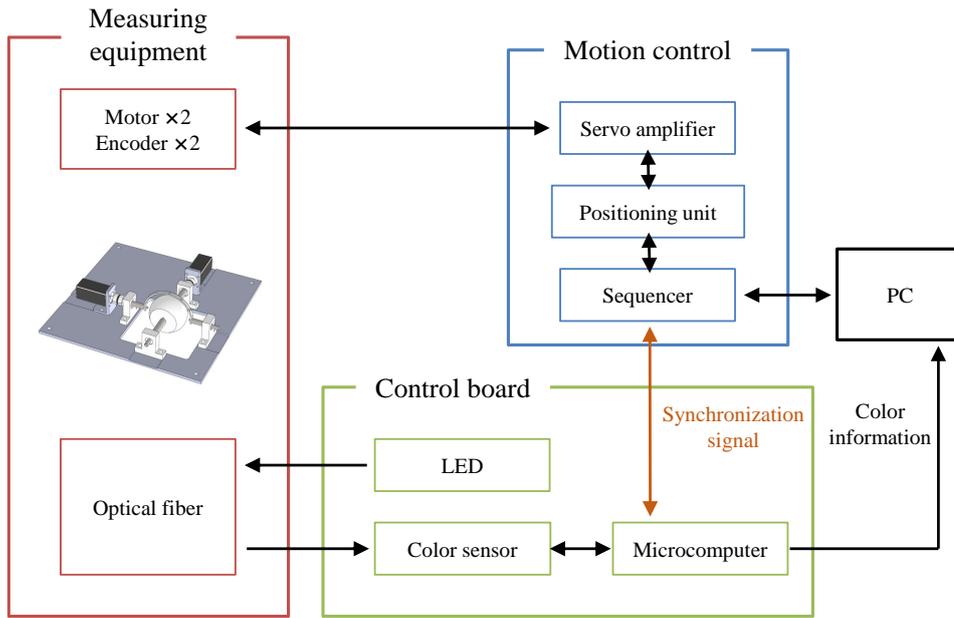
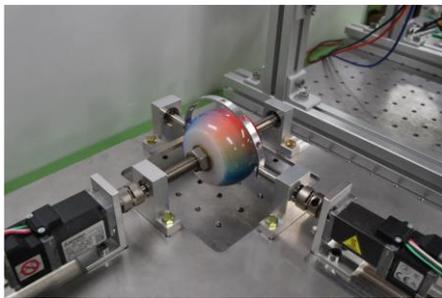
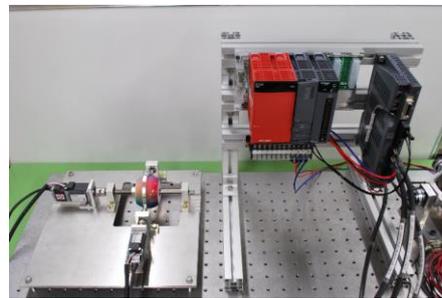


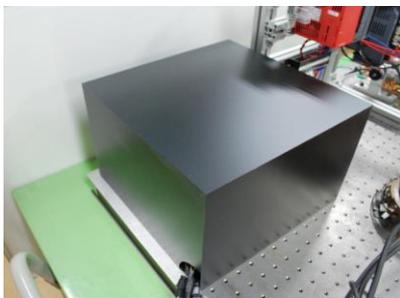
Fig. 4.34 Sensing system configuration



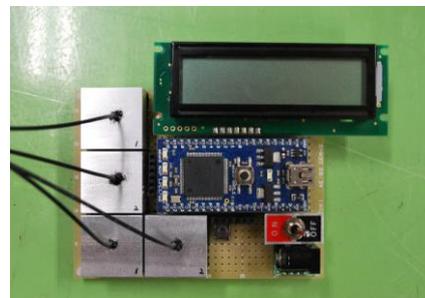
(a) Colored mover



(b) Motion control system



(c) Light shielding cover



(d) Control board

Fig. 4.35 Each part of the sensing system

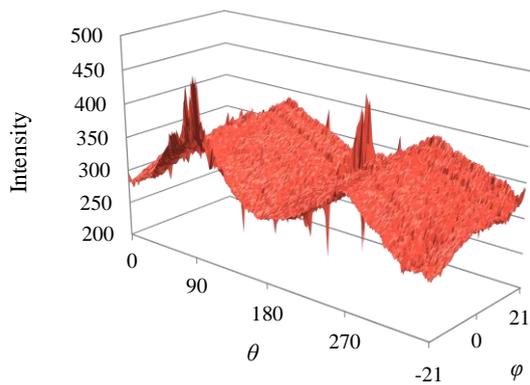
4.4.2 色情報取得実験

はじめに、前述の測定装置を用いてマッピングデータに用いる色情報の取得を行った。取得した点は θ 方向に0度から359度を1度間隔で360点、 φ 方向に-21度から21度を1度間隔で43点、合計15480点の測定を行った。各色の測定結果をFig. 4.36に示す。

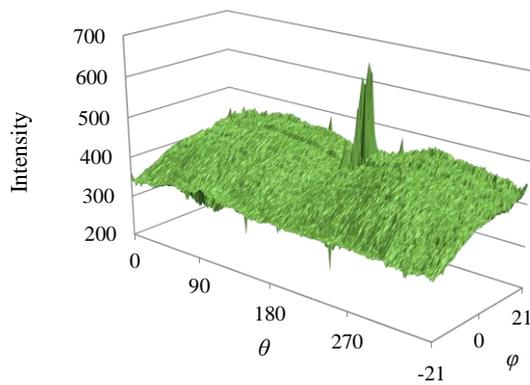
測定結果から分かるように、大部分では測定値が連続的に変化しているが、いくつかの点で測定値が周辺の値と比較して大きく異なっていることが確認できる。このような点はその発生原因から大きく2つに分類される。

1つ目は $\varphi = -21$ 度および $\varphi = 21$ 度の位置に見られる大きな誤差であるが、これは可動子の端に位置する部分であるために発生した誤差であると考えられる。アクチュエータ可動子を模擬した球状部品への着色は、着色を施したフィルムを部品に貼り付ける方法で行っているため、可動子の端はフィルムの切断面となり、色強度の測定結果に悪影響を及ぼしていると考えられる。

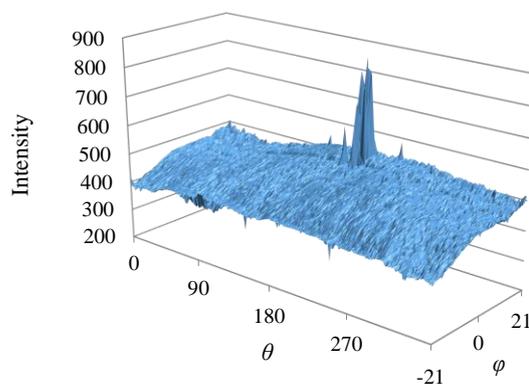
2つめは $\theta = 180$ 度、 $\varphi = 10$ 度あたりに見られる大きな誤差であるが、これは前述のフィルム貼り付けの際に理想的な貼り付けができておらず、少し浮いた状態になっていることが原因である。



(a) Red



(b) Green

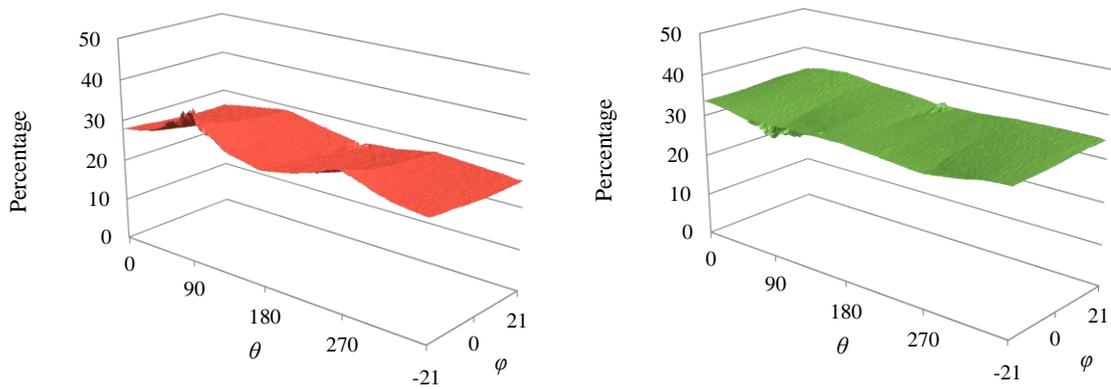


(c) Blue

Fig. 4.36 Color mapping data

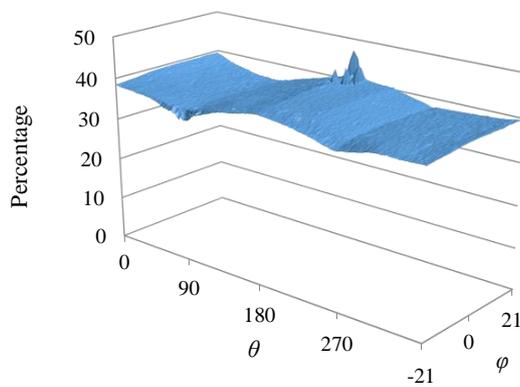
Fig. 4.36 に示した結果からも分かるように、着色の不備やその他の理由により測定値に周囲の測定値と大きく値の異なる点が発生してしまうことが確認された。しかしこのような点は各色で同様に現れているため、センサによって得られた色情報を割合として利用することで影響を低減できると考えられる。各色強度を三色合計に対する割合としてグラフ化したものを以下の Fig. 4.37 に示す。

結果から分かるように各色の情報を割合として利用することで、値の大きな変化が減少し、滑らかに変化するグラフとなっていることが確認できる。したがって、次項で述べる角度測定実験においては、センサの色情報を割合に変換し、それに加え Fig. 4.38 に示すように移動平均フィルタ（各点の値をその周辺の値の平均値とする平滑化フィルタ）を適用し平滑化して使用している。



(a) Red

(b) Green



(c) Blue

Fig. 4.37 Color mapping data (Percentage)

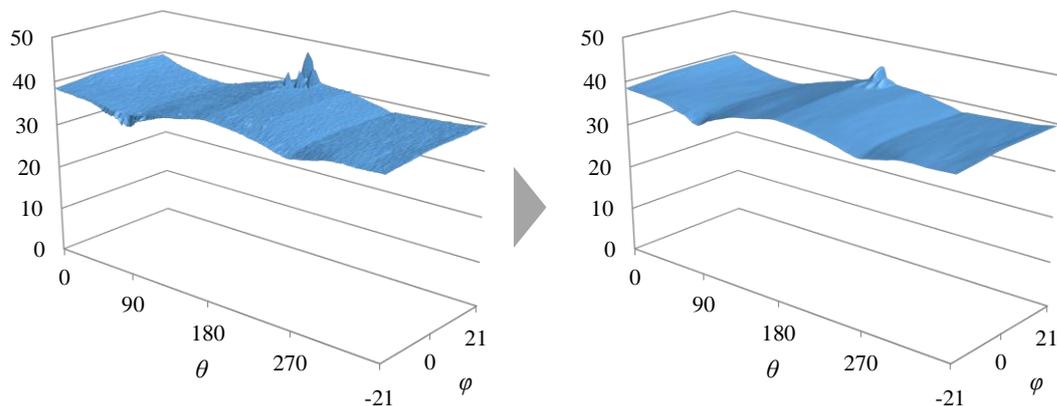


Fig. 4.38 Mapping data smoothing

4.4.3 角度測定実験

本項では前項の実験で得られたマッピングデータを用いた角度測定実験について述べる。測定装置の第一軸のみを駆動させ球面アクチュエータの Z 軸駆動を想定した駆動 (θ 回転), 第二軸のみを駆動させ球面アクチュエータの X 軸駆動を想定した駆動 (φ 往復) およびそれらを同時に行った同時駆動の 3 パターンの駆動に対して, サーボモータへの指令角度と提案手法による算出角度の比較を行った。

各駆動パターンにおける算出角度および入力値との誤差を以下の Fig. 4.39~Fig. 4.44 に示す。 θ 回転の実験結果からは, 可動子の回転にしたがってカラーセンサによる測定値も増加しており, 提案手法による角度算出が機能していることが分かる。また駆動していない φ 方向への回転角度も 0 度付近を維持している。入力角度との誤差を見ると, θ 方向への回転角度誤差が φ 方向と比較して大きくなっている。二乗平均誤差は θ 方向 5.37 度, φ 方向 1.12 度となっている。これはセンサが色情報を取得してから角度算出を完了するまでに時間がかかるため, 駆動速度が大きくなるほど誤差も増加すると考えられる。

φ 方向往復駆動の実験結果からも同様に、提案手法のアルゴリズムが破綻することなく角度算出できているが、駆動中の軸において入力角度との誤差が大きくなっていることが確認できる。二乗平均誤差は θ 方向 2.63 度、 φ 方向 4.62 度となっている。また φ 方向への回転角度が 20 度付近で特に誤差が大きくなっている。

最後に、二軸を同時に駆動させた際の結果からは、同時駆動時にも角度算出が可能であることを確認することができる。また、 φ 方向のみの往復駆動時には回転角度が 20 度付近で誤差が大きくなっていたが、本結果からはそのような挙動は見られない。これは θ 方向に回転することによって各センサの測定位置が変化しているためであり、測定位置により精度に違いがあることも分かる。二乗平均誤差は θ 方向 4.69 度、 φ 方向 3.29 度となっている。

これらの実験結果からは、測定誤差が大きいものの、カラーセンサが取得した色情報よりアクチュエータの回転角度を算出可能であることが明らかになった。また、算出時間によって可動子が駆動する際の誤差が増大することも確認されたため、全探索と比較して算出時間を大幅に低減できる本提案手法の有効性も示すことができた。

精度向上に向けた今後の課題としては、許容誤差を含めた各パラメータの調整のほかに、マッピングデータの利用法の変更などが挙げられる。現状ではフィルタによるマッピングデータの平滑化を行っているが、それにより実際の測定値との差が生じ誤差の拡大に繋がっていることが予想されるので、色勾配ベクトルを用いた測定点探索には平滑化したデータを用い、許容誤差を超過しているかどうかの判定の際には平滑化前のデータを用いるなどの工夫が考えられる。

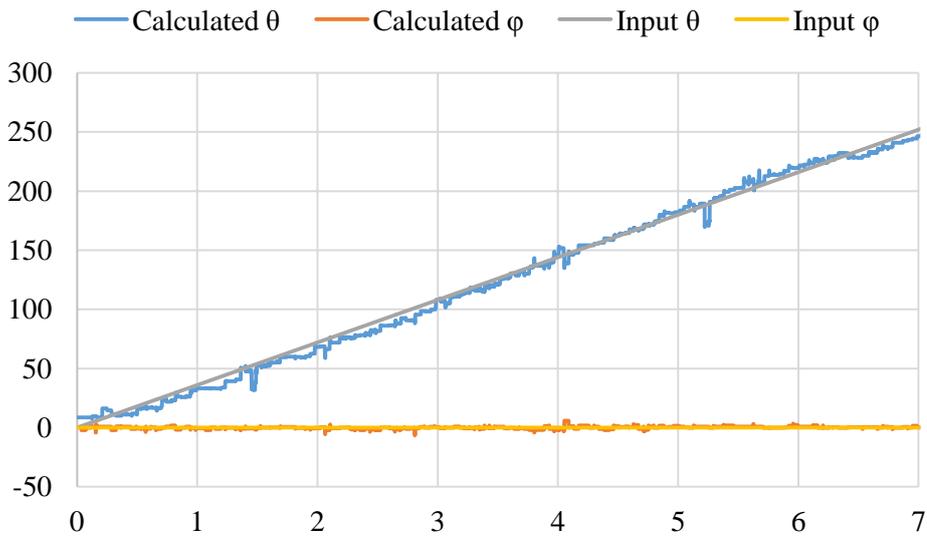


Fig. 4.39 Angle calculation experimental results (θ Rotation)



Fig. 4.40 Angular error (θ Rotation)

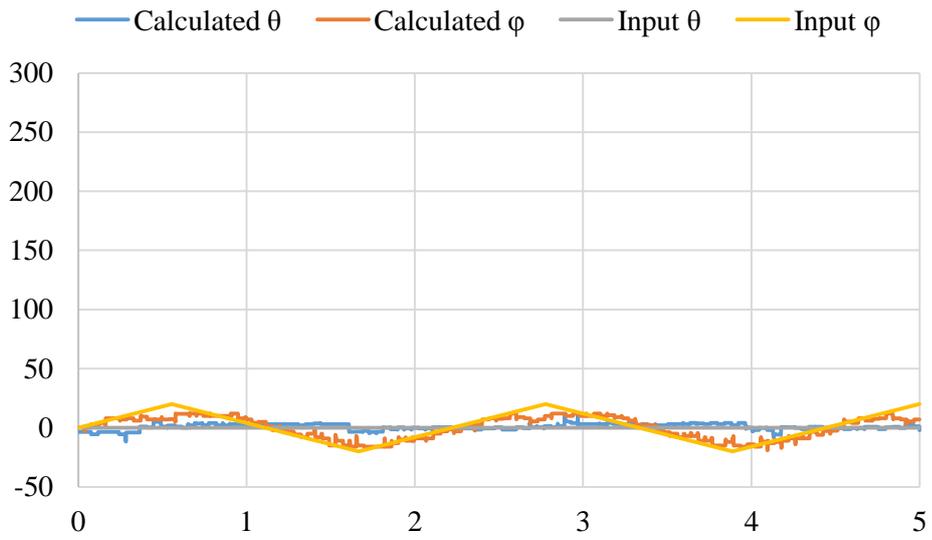


Fig. 4.41 Angle calculation experimental results (φ Reciprocation)

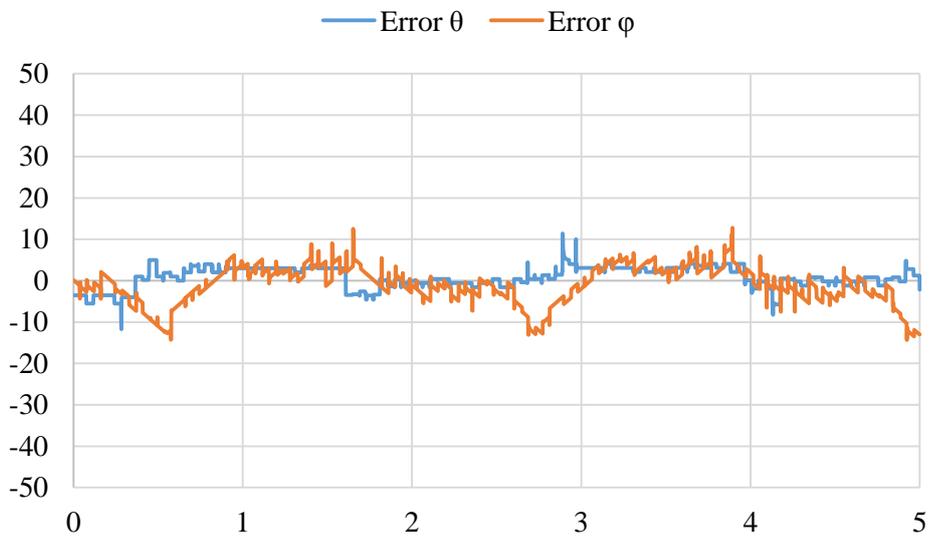


Fig. 4.42 Angular error (φ Reciprocation)

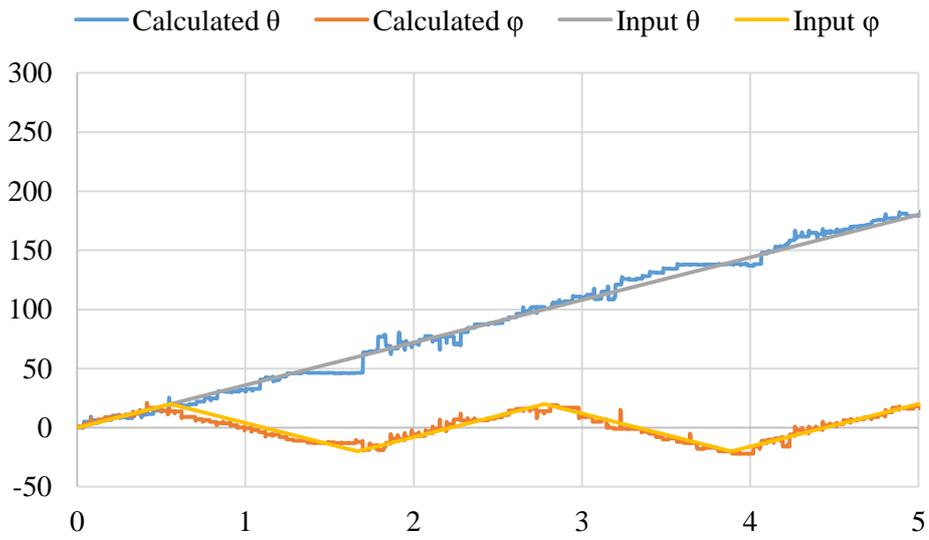


Fig. 4.43 Angle calculation experimental results (θ Rotation and ϕ Reciprocation)

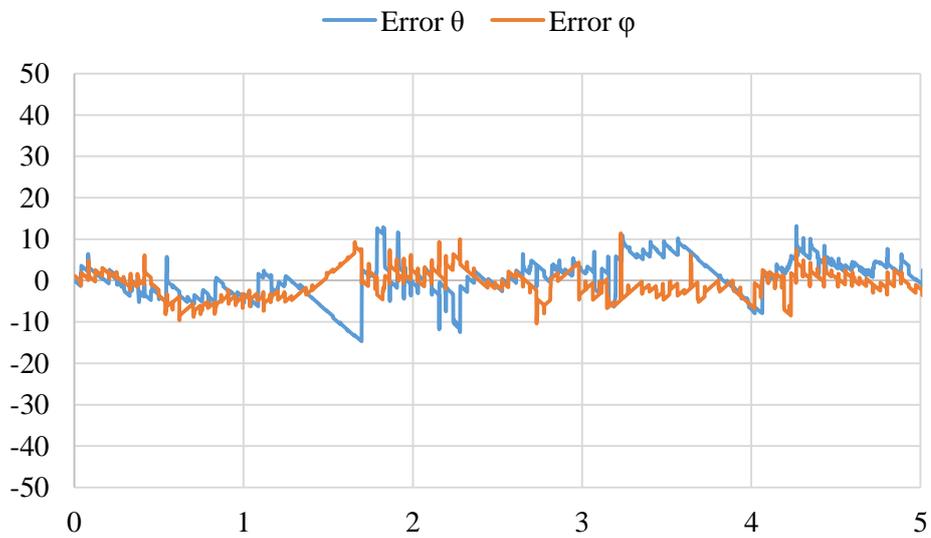


Fig. 4.44 Angular error (θ Rotation and ϕ Reciprocation)

4.5 結言

本章では、イメージセンサによる球面アクチュエータの角度測定において課題となっていた累積誤差の問題解決のため、カラーセンサを用いた新しい角度検出方法の提案を行った。

はじめに提案手法の概要説明を行った後、シミュレーションにより角度算出が可能であることを確認した。その後、全探索および色勾配ベクトルを用いた新しい探索アルゴリズムにおける算出時間の比較を行い算出時間が高速化されることを確かめた。

測定装置を用いた実験検証では、シミュレーションと同様に複数軸同時駆動時にも角度算出可能であることを明らかにし、原理上累積誤差が生じないためイメージセンサを用いた手法に対する優位性も確認できた。更なる測定精度向上が今後の課題となっている。

第5章

結論

本論文では、一台で三自由度の回転運動が可能な球面アクチュエータの実用化に向けた課題を解決するために、制御性の改善を目指した新しいアクチュエータ構造の提案および、球面アクチュエータの角度センシング手法の提案を行い、シミュレーションと実験検証を通してその有効性を確認した。

第1章では、球面アクチュエータ開発の現状、実用化によって得られる利点、実用化に向け残されている解決すべき課題点についての説明を行い、本研究の目的、方針を明らかにした。また、本論文の章構成を示した。

第2章では、新構造球面アクチュエータの提案に関する研究内容についてまとめた。はじめに、様々な駆動原理の球面アクチュエータについての先行研究例を示し、それぞれの特徴や課題について確認することで提案構造の設計方針を決定した。その後提案したアクチュエータについて、その構造および動作原理の説明を行った。

三次元有限要素法を用いた電磁界解析によって提案アクチュエータの各特性を求め、従来の球面アクチュエータに必要な不可欠であった複雑な制御を用いることなく三軸の駆動を同時に制御可能であることを明らかにした。その後、実機を用いた検証実験によっても同様な駆動を確認し、本提案アクチュエータの従来機構に対する優位性を示すことができた。

第3章では、球面アクチュエータの角度測定を可能にするためのセンシングシステム提案に関する研究内容についてまとめた。まず、角度測定手法の検討のため、利用が考えられるセンサの各特長を述べ、光学イメージセンサを用いることのメリットについて述べた。次に、システム構成およびセンサ信号からアクチュエータ可動子回転角度への変換方法についての説明を行うことで提案手法の測定原理を明らかにした。

アクチュエータ試作機を用いた実機検証では、可動子の回転角度を比較的高精度に算出できることを確認したが、使用するセンサの性質上、長時間の駆動によって誤差が累積してしまう課題点が明らかになった。別のセンサを併用することで誤差をリセットする方法も考えられるが、球面アクチュエータへの適用を考慮した場合に省スペース化が非常に重要となるため、小型でかつアクチュエータの絶対角度を算出可能な新たな方法の提案が重要だという結論を得た。

第4章では、第3章での提案手法で明らかになった課題点を解決するために、小型化とアクチュエータの絶対角度検出を両立可能な、カラーセンサを用いたセンシング手法の提案に関する研究内容についてまとめた。はじめに提案手法の測定原理を示し、可動子への着色パターンや全探索による一致探索手法の説明を行った。

その後、シミュレーションによって提案手法のが適切に機能するか確認を行った。様々な角度入力パターンで確認したところ、どのパターンにおいても適切に角度算出可能であることが分かった。しかし全探索による一致探索において処理に費やす時間が長く、測定精度悪化を招くことが明らかになった。

そこで次に、処理の高速化のために探索手法の改善を行った。色勾配ベクトルを利用することで探索点の大幅な減少が可能となり、シミュレーションによってその効果を確認することができた。

最後に、測定装置を用いた実験検証を行った、シミュレーションとは異なり可動子への着色を理想的なものとするのが難しいため入力角度との誤差は大きくなるが、単軸駆動時、二軸駆動時ともに角度算出が適切に行われることを確認することができた。これらの結果より、光ファイバーを用いた小型化に有利な機構で、かつ可動子の絶対角度を測定可能であることを示すことができ、提案手法が球面アクチュエータ用角度測定法として有効であることを明らかにすることができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始適切な御助言ならびに丁寧な御指導を賜りました大阪大学大学院教授 平田勝弘先生に心より厚く感謝いたします。

大阪大学大学院准教授 宮坂史和先生ならびに助教 新口昇先生には日頃より細部にわたる御指導，御鞭撻をいただきました。ここに感謝の意を表します。

また，共同研究先企業の方々には，多くの有益な御助言を頂き，大変お世話になりました。心より感謝いたします。

そして，大阪大学大学院工学研究科平田研究室の学生の皆様には，日頃より研究に関する相談に乗っていただき，公私共々大変お世話になりました。非常に楽しく有意義な学生生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

最後に，このような素晴らしい環境で研究活動を行う機会を与えてくれた両親に深く感謝いたします。

※ 本研究の一部は，平成 26 年度科学研究費補助事業（学術研究助成金）「挑戦的萌芽研究：課題番号 23656200，三自由度ロボット関節アクチュエータの開発」の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

業績一覧

学術論文

- (1) 前田修平, 平田勝弘, トウ明宇, “イメージセンサを用いた三自由度電磁アクチュエータのフィードバック制御”, 電気学会論文誌, VOL.131, No.5, pp.754-759, 2011.5
- (2) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata, and Noboru Niguchi, "Dynamic Analysis of an Independently Controllable Electromagnetic Spherical Actuator", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.49, NO.5, pp.2263-2266, 2013.05
- (3) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata and Noboru Niguchi, “Characteristics Verification of an Independently Controllable Electromagnetic Spherical Motor”, sensors, pp.10072-10080, 2014.06

国際学会発表論文

- (1) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata, Shohei Ikejiri, Mingyu Tong, "Feedback control of electromagnetic spherical actuator with three-degree-of-freedom," Proceedings of the International Conference on Electorical Machines (ICEM2010), pp.1-6, 2010.09
- (2) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata, “Characteristics Analysis of a New Spherical Actuator Employing 3-D FEM”, Proceedings of IEEE COMPUMAG 2011, Sydney, Australia, PB4.1, pp29-30, 2011.07
- (3) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata, Noboru Niguchi, "Independently Controllable Electromagnetic Spherical Actuator", Proceedings of the International Conference on Electorical Machines (ICEM2012), France, pp.676-681. 2012.09
- (4) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata, and Noboru Niguchi, "Dynamic Analysis of an Independently

Controllable Electromagnetic Spherical Actuator", Proceedings of 15th Biennial IEEE CEFC (Conference on Electromagnetic Field Computation), Oita, Japan, MP3-13, p.60, 2012.11

- (5) Shuhei Maeda, Katsuhiro Hirata, Noboru Niguchi, "OPERATING CHARACTERISTICS VERIFICATION OF AN INDEPENDENTLY CONTROLLABLE SPHERICAL ACTUATOR", Proceedings of ISEF2013(XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering), Ohrid, Macedonia, PS5-111, 2013.09

国内学会発表論文

- (1) 前田修平, 平田勝弘, 池尻昌平, トウ明宇, "イメージセンサを用いた三自由度球面電磁アクチュエータのフィードバック制御に関する研究", 電気学会リニアドライブ研究会, LD-10-010, pp.55-60, 2010.3
- (2) 前田修平, 平田勝弘, トウ明宇, "三自由度球面電磁アクチュエータの位置フィードバック制御に関する研究", 平成 22 年電気学会全国大会, 5-044, pp.71-72, 2010.03
- (3) 前田修平, 平田勝弘, "広角度駆動可能な三自由度球面電磁アクチュエータの開発", 電気学会リニアドライブ研究会, LD-10-62, pp.25-30, 2010.12
- (4) 前田修平, 平田勝弘, "三自由度球面電磁アクチュエータ広角化モデルの特性解析", 平成 23 年電気学会全国大会, 5-200, pp.286-287, 2011.03
- (5) 前田修平, 平田勝弘, 新口昇, "三軸独立制御可能な球面電磁アクチュエータの開発", 電気学会モータドライブリニアドライブ合同研究会, LD-11-91, pp.73-77, 2011.12
- (6) 前田修平, 平田勝弘, 新口昇, "三軸独立制御可能な球面電磁アクチュエータの位置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, LD-12-58, pp.35-38, 2012.08
- (7) 前田修平, 平田勝弘, 新口昇, "球面電磁アクチュエータの動作特性検証", 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 16B1-5, pp.194-197, 2013.05
- (8) 前田修平, 平田勝弘, "カラーセンサを用いた球面アクチュエータの回転角度センシング", 回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, LD-13-63, pp.13-16, 2013.08
- (9) 前田修平, 平田勝弘, "色情報を用いた球面アクチュエータ回転角度センシング技術開発", 電気学会リニアドライブ研究会, LD-13-101, pp.99-102, 2013.10

参考文献

- 1) A.Tanaka, S.Torii and D.Ebihara et al : “Proposal and Design of Multi-Degree-of-Freedom Spherical Actuator”, 11th MAGDA Conference, PS2-3, pp.169-172 (2002)
田中, 鳥居, 海老原, 他 : “多自由度アクチュエータの提案と設計”, 第 11 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, PS2-3, pp.169-172 (2002)
- 2) Investigating R&D Committee on Systematize technology of multi degrees of freedom motors: “Systematize technology of multi degrees of freedom motors”, Technical Report of IEEJ, No.1140, pp.1-47(2008)
多自由度モータのシステム化技術調査専門委員会 : “多自由度モータのシステム化技術”, 電気学会技術報告, No.1140, pp.1-47(2008)
- 3) E.h.M.Weck, T.Reinartz, G. Henneberger and R. W. De Doncker “Design of a spherical motor with three degree of freedom”, Annals of the CIRP, vol. 49, pp. 289-294(2000)
- 4) T. Yamamoto, K. Hirata and Y. Hasegawa: “Proposal of Multi-degree Electromagnetic Actuators”, 16th MAGDA Conference, PS-1, P07, pp.229-231(2007)
山本, 平田, 長谷川 : “多自由度電磁アクチュエータの提案“, 第 16 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, PS-1, P07, pp.229-231 (2007)
- 5) Tomoaki Mashimo, Shigeki Toyama, and Hiroshi Ishida “Design and Implementation of Spherical Ultrasonic Motor”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 56, No. 11, pp. 2514-2521 (2009)

- 6) J.Wang, K.Mitchell, G.W.Jewell and D.Howe, “Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors”, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea (2001) 1798-1805
- 7) E.h.M.Weck, T.Reinartz, G.Henneberger, R.W.De Doncker, “Design of a Spherical Motor with Three Degrees of Freedom”, CIRP Annals, Vol.49, No.1, (2000) 289-294
- 8) Mingyu Tong, Katsuhiko Hirata and Syuhei Maeda, “Dynamic Analysis of 3-DOF Actuator Employing 3-D Finite Element Method”, Proceedings of the 14th Biennial IEEE CEFC (Conference on Electromagnetic Field Computation), Chicago IL, USA, 14P8, 2010.5
- 9) Shohei Ikejiri, Katsuhiko Hirata, Shuhei Maeda, “Proposal of electromagnetic spherical actuator with 3-DOF”, International Journal of COMPEL, Vol.29, No.4, pp.994-1003, 2010.09
- 10) Shuhei Maeda, Katsuhiko Hirata, “Characteristics Analysis of a New Spherical Actuator Employing 3-D FEM”, Proceedings of IEEE COMPUMAG 2011, Sydney, Australia, PB4.1, pp.29-30, 2011.07
- 11) 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
- 12) Masahito Tsukano, Yo Sakaidani, Katsuhiko Hirata, Niguchi Noboru, Maeda Shuhei, Zaini Ariff, “Analysis of 2-Degree of Freedom Outer Rotor Spherical Actuator Employing 3-D Finite Element Method” , IEEE transactions on magnetics, Vol. 49, No. 5, 2221-2224, May 2013

付録 A

三次元有限要素法による

アクチュエータ特性解析手法

A.1 数値解析

現象解析には、実験とコンピュータシミュレーションの二つの方法がある。実験では、シミュレーションで考慮することが難しい様々な要因がすべて考慮された結果を得ることができる。しかし、各要因を変化させた場合の結果を得ようとする、その度に試作品を作ることになるが、費用や時間的な制約から難しい。これに対して、コンピュータシミュレーションでは、現象をコンピュータ上の数値計算により表現するため、試作品を作ることなく現象を解析することができる。近年のコンピュータ技術の発展に伴い、複雑な形状のアクチュエータの諸特性を把握することが可能になり、コンピュータシミュレーションは現象解析において重要な役割を果たしている。したがって、三自由度電磁球面アクチュエータのような複雑な機構の動作特性を数値解析により予測することは重要である。

本研究では、第 2 章で述べた球面アクチュエータの各特性解析において、 Ω 法を用いた三次元有限要素法による電磁界解析を用いている。 Ω 法とは、磁気スカラーポテンシャル Ω を未知数とした電磁界の定式化手法である。

ここでは、 Ω 法を用いた三次元有限要素法による三自由度電磁球面アクチュエータのトルク特性を計算する方法について述べる。まず、第2節では、マクスウェルの電磁方程式から、 Ω 法の基礎方程式を導出し、ガラーキンの法を用いた離散化方法を述べる。また、電磁力の計算方法としてマクスウェルの応力法について述べる。第3節、第4節では、三自由度電磁球面アクチュエータのトルク特性解析に必要な磁場解析と電気回路方程式および運動解析の連成について、解析手法を述べると同時に、方程式の解法について説明する。また、第5節では、回転子が回転運動する際に必要な要素分割図の修正方法について説明する。

A.2 磁場解析手法

A.2.1 マクスウェルの基礎方程式

電磁界を支配するマクスウェルの方程式は次式で与えられる。

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (\text{A.4})$$

ここで、 \mathbf{B} は磁束密度、 \mathbf{E} は電界の強さ、 \mathbf{H} は磁界の強さ、 \mathbf{J} は電流密度、 \mathbf{D} は電束密度、 ρ は電荷密度である。また、 \mathbf{B} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{J} 、 \mathbf{D} の間には媒質の性質を規定する次の関係が存在する。

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A.7})$$

ここで、 μ は透磁率、 ε は誘電率、 σ は導電率を表す。また、次式で示される電流の連続式も考慮する。

$$\text{div } \mathbf{J} = 0 \quad (\text{A.8})$$

A.2.2 電磁場の基礎方程式

(A.8)式より、次式で示されるような電流ベクトルポテンシャル \mathbf{T} が定義される。

$$\mathbf{J} = \text{rot } \mathbf{T} \quad (\text{A.9})$$

低周波を扱う問題では、(A.1)式右辺の時間微分項の変位電流を無視することができるので、(A.9)式を(A.1)式に代入すると、次式が得られる。

$$\text{rot}(\mathbf{H} - \mathbf{T}) = 0 \quad (\text{A.10})$$

上式より、次式で示される磁気スカラーポテンシャル Ω が定義される。

$$\mathbf{H} - \mathbf{T} = -\text{grad } \Omega \quad (\text{A.11})$$

また、(A.1)式の電流密度 \mathbf{J} は、次式のように強制電流密度 \mathbf{J}_0 と渦電流密度 \mathbf{J}_e から構成される。

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (\text{A.12})$$

(A.9)式で定義した \mathbf{T} を次式のように \mathbf{J}_0 と \mathbf{J}_e に対応する \mathbf{T}_0 と \mathbf{T}_e で表す。

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_e \quad (\text{A.13})$$

ここで、 \mathbf{J}_0 と \mathbf{T}_0 、 \mathbf{J}_e と \mathbf{T}_e の関係は、それぞれ次のようになる。

$$\mathbf{J}_0 = \text{rot } \mathbf{T}_0 \quad (\text{A.14})$$

$$\mathbf{J}_e = \text{rot } \mathbf{T}_e \quad (\text{A.15})$$

(A.13)式を(A.11)式に代入すると次式が得られる。

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_e - \text{grad } \Omega \quad (\text{A.16})$$

(A.5)式および(A.16)式を(A.3)式に代入すると次式が得られる。

$$\text{div}\{\mu(\mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_e - \text{grad } \Omega)\} = 0 \quad (\text{A.17})$$

(A.5)、(A.7)、(A.15)および(A.16)式を(A.2)式に代入すると次式が得られる。

$$\text{rot}\left\{\frac{1}{\sigma}(\text{rot } \mathbf{T}_e)\right\} = -\frac{\partial}{\partial t}\{\mu(\mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_e - \text{grad } \Omega)\} \quad (\text{A.18})$$

(A.17)および(A.18)式が解くべき電磁界の基礎方程式となる。

A.2.3 永久磁石を含む場

強制電流 \mathbf{J}_0 と渦電流 \mathbf{J}_e 以外に永久磁石が存在する場合の基礎方程式を導出する。永久磁石が存在する場合、電流密度 \mathbf{J} は強制電流密度 \mathbf{J}_0 、渦電流密度 \mathbf{J}_e 、そして等価磁化電流密度 \mathbf{J}_m の和で表され、式(A.19)に示す。

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_m + \mathbf{J}_e \quad (\text{A.19})$$

また，等価磁化電流密度 \mathbf{J}_m に対して，電流ベクトルポテンシャル \mathbf{T}_m を真空中の透磁率 μ_0 を用いて，式(A.20)のように定義する。

$$\mathbf{J}_m = v_0 \text{rot} \mathbf{M} = \text{rot} \mathbf{T}_m \quad \left(v_0 = \frac{1}{\mu_0} \right) \quad (\text{A.20})$$

このとき，式(A.17)，(A.18)は，それぞれ式(A.21)，(A.22)となり，これらは永久磁石が存在する場の基礎方程式となる。

$$\text{div} \{ \mu (\mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_e + \mathbf{T}_m - \text{grad} \Omega) \} = 0 \quad (\text{A.21})$$

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A.22})$$

なお，本研究では低周波数の解析を行い，渦電流を考慮していないので， $\mathbf{J}_e = \mathbf{0}$ が成立し，基礎方程式は(A.21)のみとなる。

A.2.4 ガラーキン法による離散化

(A.21)式にガラーキン法を適用すると，残差方程式は(A.23)式で表される。

$$\mathbf{G}_{oi} = \iiint N_i \text{div} \{ \mu (\mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_m - \text{grad} \Omega) \} dV = 0 \quad (\text{A.23})$$

ここで V は全領域， N_i は補間関数で，式(A.24)のような性質を持つ。

$$N_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1 & (j=i) \\ 0 & (j \neq i) \end{cases} \quad (\text{A.24})$$

式(A.24)は、 N_i が節点 i 上では 1、それ以外では 0 になることを示している。式(A.23)を離散化するために、次式のベクトル公式およびガウスの発散定理を用いて変形する。

$$\mathbf{u} \cdot \text{rot} \mathbf{v} = \mathbf{v} \cdot \text{rot} \mathbf{u} - \text{div}(\mathbf{u} \times \mathbf{v}) \quad (\text{A.25})$$

$$\iiint \text{div} \mathbf{u} \, dV = \iint \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (\text{A.26})$$

$$(\mathbf{u} \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{w} = \mathbf{u} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{w}) \quad (\text{A.27})$$

(A.23)式をベクトル公式およびガウスの発散定理を用いて変形すると、次に示す(A.28)式が得られ、これを解くことで磁気スカラポテンシャル Ω が求まる。

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{oi} = & \iint N_i \mathbf{n} \cdot \mu(\mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_m - \text{grad} \Omega) \, dS - \\ & \iiint \text{grad} N_i \cdot \mu(\mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_m - \text{grad} \Omega) \, dV \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

A.2.5 電磁力の計算法

磁界内の物体に働く力を求める方法には、マクスウェルの応力法、エネルギー変位法、節点力法、磁化電流法などがあるが、本研究では比較的良好に用いられるマクスウェルの応力法を適用する。

ファラデー・マクスウェルの理論では二電荷間に作用する力は周囲の媒体を伝わり、あたかも弾性の糸を引張るときに力が弾力としてその間を伝わるように、電気作用もまた力管なるもので充たされた媒質の一種の歪みに起因して生じ、この歪んだ状態が電界であると考えている。同様に磁界においても、電磁力が働くものとしてこの歪んだ状態が磁界であると考えることができる。電磁界内にある閉曲面 S に囲まれた領域 V 内の単位体積あたりに作用する力を \mathbf{f} とすれば、閉曲面 S 内の全体積に作用する力 \mathbf{F} は、 \mathbf{f} を全領域につ

いて積分することで得られるが、それはまた面 S の単位面積あたりに作用する力、すなわち S 上の応力 \mathbf{p} を全表面について積分した値に等しく、次式で表すことができる。

$$\mathbf{F} = \iiint \mathbf{f} dV = \iint \mathbf{p} dS \quad (\text{A.29})$$

次に、 \mathbf{f} の各成分 f_x, f_y, f_z がそれぞれ未知ベクトル $\mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_z$ の発散量で表されるとすると次式を得ることができる。ここで、 i, j, k は、それぞれ x, y, z 方向単位ベクトルである。

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \iiint (\mathbf{i} \operatorname{div} \mathbf{T}_x + \mathbf{j} \operatorname{div} \mathbf{T}_y + \mathbf{k} \operatorname{div} \mathbf{T}_z) dV \\ &= \iint (\mathbf{i} \mathbf{T}_x \cdot \mathbf{n} + \mathbf{j} \mathbf{T}_y \cdot \mathbf{n} + \mathbf{k} \mathbf{T}_z \cdot \mathbf{n}) dS \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

ここで \mathbf{n} は微小面積 dS の単位法線ベクトルである。(A.29)式と(A.30)式より応力 \mathbf{p} は次式で表すことができる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}, \quad \mathbf{T} = \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_x \\ \mathbf{T}_y \\ \mathbf{T}_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{A.31})$$

ここで \mathbf{T} はマクスウェルの応力テンソルであり、次式で与えられる。

$$\mathbf{T} = [T_{ij}], \quad T_{ij} = \frac{1}{\mu} \left\{ B_i B_j - \frac{1}{2} (\delta_{ij} + \gamma) \mathbf{B}^2 \right\}, \quad (i, j = x, y, z) \quad (\text{A.32})$$

ここで μ は物質中の透磁率、 B_x, B_y, B_z はそれぞれ磁束密度 \mathbf{B} の x, y, z 方向成分、 δ_{ij} は次式に示すクロネッカのデルタ記号である。

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (\text{A.33})$$

また、 γ は物質の質量密度 m の変化による透磁率 μ の変化を表す量で、次式で表される。

$$\gamma = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dm} \quad (\text{A.34})$$

真空（空気）中では、 $\gamma=0$ としてよいので、閉曲面が真空（空気）中を取り囲む場合には(A.35)式となる。

$$\mathbf{T} = [T_{ij}], \quad T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \left\{ B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} \mathbf{B}^2 \right\}, \quad (i, j = x, y, z) \quad (\text{A.35})$$

ここで電磁石の可動部に働く力を求めるときには、可動部を囲む閉曲面 S のとり方は任意であるが、領域の分割によって計算結果に影響を生じる。最も誤差の少ない閉曲面を選ぶには、磁束分布の変化が緩やかで、かつメッシュを細かく分割しているところを選ぶ必要がある。そのため、電磁石では空気と接する可動部の表面より離れた空間（エアギャップの中央）に積分面 S を選ぶのがよい。また、トルク T は(A.36)式で表される。

$$T = \iint \mathbf{t} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} |\mathbf{r}| dS \quad (\text{A.36})$$

ここで、 \mathbf{t} は回転方向の単位ベクトル、 \mathbf{r} は回転軸からトルクを計算したい閉曲面 S に向かうベクトル（ $|\mathbf{r}|$ は回転軸からの距離）を表す。なお、3次元モデルでは、各断面のトルクを計算し、軸方向に合成すればよい。

A.3 電気回路方程式との連成法

解析領域内に定常電流が流れると仮定できる場合は、強制電流密度を直接与えることで解析が可能である。しかしながら、過渡現象を扱う場合、電流は時間的に変化するため強制電流 I_0 も未知変数として扱い、電気回路方程式と連成して解析する必要がある。このとき、電気回路方程式は、次式で与えられる。

$$\eta = V_0 - RI_0 - L \frac{dI_0}{dt} - \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (\text{A.37})$$

ここで V_0 は巻線の端子電圧、 R は抵抗、 L はインダクタンス、 ϕ は鎖交磁束密度である。また、アンペールの法則により、次式(A.38)に与える。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 \quad (\text{A.38})$$

また、強制電流 I_0 と強制電流密度 \mathbf{J}_0 の関係式は次式である。

$$\mathbf{J}_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 \mathbf{n}_s \quad (\text{A.39})$$

ここで、 n_c は巻線の巻き数、 S_c は巻線の断面積、 \mathbf{n}_s は巻線の断面の法線ベクトルと同じである。また、磁場の強さ \mathbf{H} と鎖交磁束密度 ϕ の関係式を次式(A.40)で与える。

$$\mathbf{H} = -\nabla\phi = \mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_m - \text{grad}\Omega \quad (\text{A.40})$$

式(A.40)、式(A.3)と式(A.5)を連立すると、次式(A.41)が得られる。

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot [\boldsymbol{\mu} \cdot (-\nabla\phi)] = 0 \quad (\text{A.41})$$

A.4 運動方程式との連成法

電磁アクチュエータの動作特性解析は時間ステップ毎に磁界解析を行い、可動部に働く力を計算し、運動方程式を解くことにより可動部の位置を求める。各ステップにおいてメッシュの切り直しと磁界解析を行うため計算コストはかかるが、電磁アクチュエータの動作特性を事前予測することができるため有効な手法である。ここでは、可動部が回転動作する場合の運動方程式を数値計算で解く方法について述べる。

A.4.1 可動部が回転動作をする時の運動方程式

可動部の慣性モーメントを I_i 、周囲媒体(空気)の粘性減衰係数を D_i 、可動部の回転角を θ_i 、可動部に働く θ_i 方向成分のトルクを T_{mi} とすれば、回転運動をする可動部について解くべき運動方程式は次式で表される。なお、 $i = x, y, z$ であり、それぞれの軸回転におけるパラメータを表す。

$$I_i \frac{d^2\theta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\theta_i}{dt} + T_{si} = T_{mi}, \quad (i = x, y, z) \quad (\text{A.42})$$

ここで、 T_{si} は可動部に働く各軸の機械的な摩擦によるトルクである。なお、可動部に負荷が加わる場合、負荷のトルクを上式左辺に加えた式になる。

A.4.2 可動部の位置と時間の関係

時刻 t における可動部の角速度を ω_i^t とし、(A.42)式を後退差分近似すると、時刻 t における可動部の角加速度 α_i^t は次式となる。なお、 $i = x, y, z$ である。

$$\alpha_i^t = \frac{T_{mi}^t - D_i \frac{d\theta_i^t}{dt} \mp T_{si}}{I_i} \quad (\text{A.43})$$

微小時間 Δt 間の可動部の回転角 $\Delta\theta_i^t$ は、可動部の運動を等加速度運動とみなすと次式で近似することができる。

$$\Delta\theta_i^t = \omega_i^t \Delta t + \frac{\alpha_i^t (\Delta t)^2}{2} \quad (\text{A.44})$$

次の時刻 $t+\Delta t$ の可動部の回転角 $\theta_i^{t+\Delta t}$ および角速度 $\omega_i^{t+\Delta t}$ は次式で表される。

$$\theta_i^{t+\Delta t} = \theta_i^t + \Delta\theta_i^t \quad (\text{A.45})$$

$$\omega_i^{t+\Delta t} = \omega_i^t + \alpha_i^t \Delta t \quad (\text{A.46})$$

ここで、 θ_i^t は時刻 t における可動部の回転角である。以上より(A.43)から(A.46)式までを Δt ごとに時間を追って計算すれば、可動部の任意位置と時間との関係を求めることができる。

A.5 要素分割図の修正法

有限要素法を用いて移動問題を解く場合、移動物体の移動とともに磁界解析に必要な三次元分割図を時間の経過とともに修正しなければならない。すなわち、解析の過程で分割図の修正が必要になる。そこで、本研究では多軸回転の場合に適用できる自動修正法を用いて、三自由度電磁球面アクチュエータの解析を行っている。

ここでは、可動部が回転運動をする場合の三次元分割図の自動修正法を述べる。本手法は可動部の回転動作に伴い可動部と固定部の境界部分の分割図を自動的に修正する方法

であり、主に回転機の解析に用いられる。具体的には、可動部の回転に伴い固定部との境界面に節点の不整合が生じた場合に、最も近い節点同士を自動で接続するアルゴリズムであり、分割図を再構成する度に節点番号は変化するが、境界部分の要素以外は変化しないので、計算時間の短縮に寄与する。

本手法は以下のようになる。

ステップ 1：基本となる要素分割データを作成し、固定部と可動部に分離するための境界（切断面）を決定する（Fig. A.1 (a)）。

ステップ 2：固定部と可動部を分離する（Fig. A.1 (b)）。

ステップ 3：運動方程式を解くことによって得られる回転角度に合わせて可動部を回転させる（Fig. A.1 (c)）。

ステップ 4：固定部と可動部の切断面上の最も近い節点同士を接続する（Fig. A.1 (d)）。

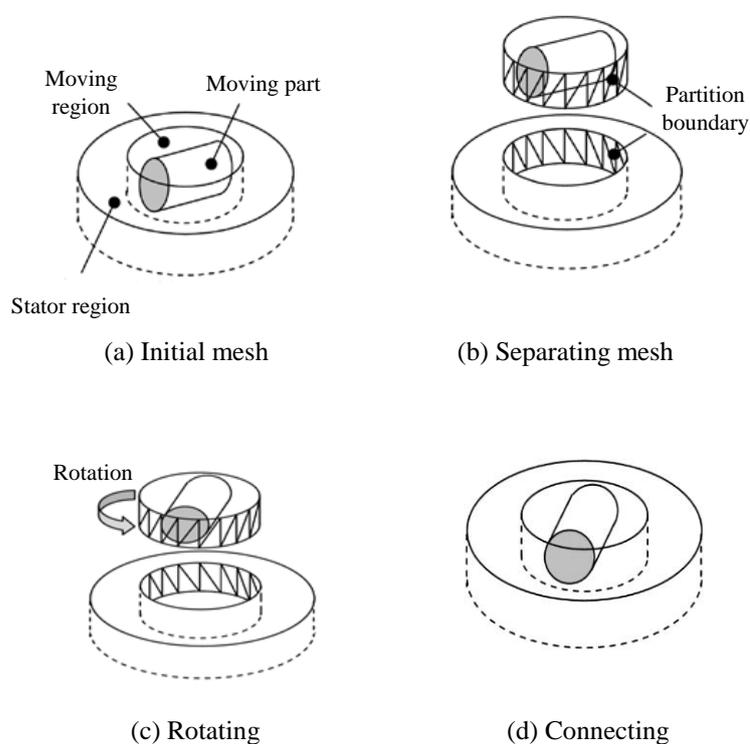


Fig. A.1 Automatic re-generation of the mesh