

博士論文

球面ステッピングモータを応用した
攪拌器とホロノミック移動台車に関する研究

平成 24 年 3 月

単 万里

岡山大学大学院

自然科学研究科

論文要旨

球面ステッピングモータを応用した 攪拌器とホロノミック移動台車に関する研究

本研究では、球殻に多数の永久磁石を配置した回転子を、半球状の固定子に配置した多数の電磁石の励磁を制御することにより作り出される回転磁界により回転させる球面ステッピングモータの応用性について検討した。

まず、第1章において、本研究の背景として、一般的に用いられるモータで多自由度システムを構成する場合の問題点を指摘している。また、球面モータを応用したシステムの特徴として、システムの小型化、省エネルギー、および、制御の簡単化が可能であることを述べている。また、想定される応用にはロボットアームの関節、ホロノミック移動台車や攪拌器があることを述べている。そして、本研究の研究目的が、球面モータの攪拌器やホロノミック移動台車への応用性の検討にあることを述べている。

第2章では、球面モータの研究動向についてサーベイして技術動向を把握し、球面モータの主なタイプを、牽引型、電磁型、および、超音波型の3種類に分類して、それぞれの技術開発状況をまとめている。また、攪拌器やホロノミック全方向移動台車に関する研究の現状を紹介している。

そして、第3章では、本研究で応用を検討する球面ステッピングモータとして、球殻の内側表面に多数の永久磁石を配置してこれを電磁石の励磁制御によって回転させるものを取り上げ、その構造、操作原理、電磁石励磁の制御回路、及び、球面ステッピングモータ設計のためのシミュレータについて述べている。

第4章と第5章では、本研究で検討した球面ステッピングモータの2つの応用について、検討方法、結果と考察を述べている。

この球面ステッピングモータの構造上の特徴は、回転子が中空であることである。そこで第4章では、まず球面ステッピングモータの応用として、様々な方向への回転による攪拌器を考え試作機を開発した。試作機では、回転子は二重球殻とし、内側球殻の内部に混合液を封入する構造とした。攪拌効果を高めるために、内側球殻の内面にはアクリル製の丸棒を31本ほぼ均等に取り付けられている。外側球殻は2つの半球殻をネジ止めして構成している。その内面には、外接円が同じとなる正十二面体と正二十面体を双対の位置関係に組み合わせた立体の頂点に、直径18 [mm]、厚さ5 [mm]のネオジム磁石（磁力335 [mT]）を91個配置している。固定子は半球状であり、80個の電磁石を配置している。電磁石は、芯直径12 [mm]の鉄芯に、太さが0.315 [mm]の銅線を35 [mm]の巻部分長さに対して1714回巻いて作成している。

そして、短い時間で回転方向を様々な方向に変化させながら液体を攪拌する攪拌方法の能力を、食塩50 [g]を水200 [g]に入れた場合の、室温状態にて一定時間攪拌した後の食塩の濃度を計測することにより検討した。比較のために攪拌方法として、ランダムな回転方向への5秒毎の回転に加えて、鉛直軸周りの連続回転、水平軸周りの連続回転、水平軸周りの時計回りと反時計回りの5秒間の交互回転、水平軸周りとは垂直軸周りの5秒間の交互回転を設定し、それぞれの攪拌能力を計測した。その結果、水平軸周りに回転させる場合の攪拌能力が最も高いが、ランダムな方向への回転でもその性能に近い攪拌性能が得られることが明らかになった。回転方向をランダムに変化させた攪拌方法は、攪拌効果の少ない回転方向が鉛直軸に近い場合も多くあることから、水平軸周りに回転させる攪拌方法よりやや攪拌性能が劣る結果となったと考えられる。しかしながら、回転方向をランダムに変化させることで重力の影響を緩和できることから、均質な材料の創成などの応用には、多少の攪拌性能の低下は許容できると考えられる。この結果から様々な方向に回転させることにより、重力の影響を緩和した攪拌が可能と考えられ、球面モータの攪拌器への応用性が示された。

また、第5章では、ホロミックな移動台車への応用を考え、球面ステッピングモータを駆動輪とし、ボールキャスターをその周りに4つ配置した移動台車の試作機を製作した。移動台車のサイズは0.22[m]×0.22[m]×0.26[m]、質量は2.80[kg]であり、球状可動子の半径は0.05[m]で質量は0.63[kg]である。また、電磁石を駆動するための駆動回路やPCは固定台上に設置し、約1[m]のケーブルで球面モータと接続している。

球面モータでは一般に減速機がなく駆動トルクを制御することができない問題の解決を図るため、球面モータの回転軸を制御することにより移動台車の駆動トルクを増大させる方法を提案し、その有効性を実験的に評価した。まず理論解析により、球状

可動子を斜めに傾いた軸周りに回転させる場合，移動ロボットの走行方向は球面モータの回転速度ベクトル（方向は回転軸の方向で大きさは回転の速さとするベクトル）の Z 軸（鉛直方向）成分 ${}^s\omega_z$ には関係しないことを示した． ${}^s\omega_z$ を変化させて，回転軸の水平方向からの上向き角度（制御角） θ を 0 から 90° まで変化させると，移動台車は移動方向を変えないまま移動速度は遅くなり，移動台車の駆動力を大きくできることを示した．一方，球面モータの回転速度の大きさ $|{}^s\omega|$ を一定として，回転速度ベクトルの水平面内の 2 つの方向成分である X 軸成分 ${}^s\omega_x$ および Y 軸成分 ${}^s\omega_y$ の比を変えずに Z 軸成分 ${}^s\omega_z$ を変化させる，すなわち回転速度を変えずに制御角 θ を変化させると，移動台車を一定方向に移動させながら，移動速度を変化させることができることを示した．

評価実験においては，移動台車の最大駆動力と移動速度を計測し，駆動力や移動速度と制御角 θ の関係を検討した．実験データによれば，制御角 θ が 50° 以下の場合には，最大駆動力の実測値と理論値はほぼ一致しており，移動台車の駆動力を高めることができることが確認された．また，作業台上面の動摩擦力をスプレー糊を塗布して大きくすると，移動速度の実測値はほぼ理論値に従うことを確認している．この結果，走行路面の状況にも依存するが，回転軸を水平方向に対して数十度傾けることにより，駆動トルクが 1.5 倍程度までは増大できる結果を得た．また，走行路面と回転子との摩擦力と駆動トルクの増大率との関係を考察した．これらの結果から，球面モータのホロノミックな移動台車への応用性を示した．

最後に，第 6 章では，本研究で得られた成果をまとめるとともに，今後の課題を述べている．本研究で対象とした球面ステッピングモータでは，オープンループの制御を行っているため，外力により回転が停止した場合には回転を継続することができない．回転子の姿勢を計測して回転制御をクローズドループで行うための，回転子の姿勢計測装置の開発が，応用性を一段と高めるためには必要である．

キーワード

1、球面モータ 2、攪拌器 3、全方向移動ロボット

目次

論文要旨	I
目次	V
図目次	IX
表目次	XI
第 1 章 緒 言	1
1.1. 球面モータの構造と特長	1
1.2. 球面モータの応用性	4
1.3. 球面モータの技術的課題	5
1.4. 本研究の目的	5
1.5. 本論文の構成	6
第 2 章 関連研究	7
2.1. 球面モータの種類	7
2.1.1. 牽引型球面モータ	7
2.1.2. 電磁型球面モータ	8
球面ステッピングモータ	8
球面同期モータ	10
球面誘導モータ	11
2.1.3. 超音波型球面モータ	11
2.2. 攪拌器の研究・開発現状	12
2.3. 全方向移動機構の研究動向	15
2.3.1. フリーローラ付き車輪を用いた機構	15
2.3.2. 車輪型機構	16
2.3.3. 球型機構	17
第 3 章 電磁石駆動の球面ステッピングモータ	19
3.1. 全体構成	19
3.2. 回転子	21
3.3. 固定子	22
3.4. 電源および電磁石の励磁回路	24
3.5. 電磁石の励磁方法	25
3.6. 球面モータのシミュレータ	27
3.6.1. 目的と操作画面	27

3.6.2.	計算モデル	29
3.6.3.	数値積分	31
3.7.	球面モータの性能	31
3.7.1.	全方位への回転	31
3.7.2.	回転角速度とトルクの関係	32
3.7.3.	励磁範囲と回転速度や回転方向誤差の関係	35
3.7.4.	電磁石の数と回転性能との関係	36
第4章	球面ステッピングモータ駆動の攪拌器	39
4.1.	開発背景	39
4.2.	球面モータ駆動の攪拌器の構造と駆動方法	41
4.2.1.	球面モータ駆動の攪拌器の全体構成	41
4.2.2.	可動子	41
4.2.3.	固定子	43
4.2.4.	駆動システム	45
4.2.5.	回転性能	46
4.3.	攪拌性能評価実験	47
4.3.1.	実験目的と方法	47
4.3.2.	実験結果	49
4.3.3.	考察	51
4.3.4.	まとめ	52
第5章	球面ステッピングモータを用いたホロノミック移動台車と球面減速駆動方式	53
5.1.	研究背景	53
5.2.	球面ステッピングモータ	55
5.3.	球面ステッピングモータを用いた移動台車	56
5.4.	球面減速	58
5.4.1.	球面減速の解析のための座標系の設定	58
5.4.2.	移動速度と回転角速度の関係	59
5.4.3.	駆動力や速度と制御角 θ の関係	61
5.5.	移動台車の走行性能評価実験	62
5.5.1.	実験目的と方法	62
5.5.2.	実験結果と考察	64
トルクと回転角速度の関係	64	
駆動力と制御角の関係	66	
移動速度と制御角の関係	69	
5.6.	まとめ	70
第6章	結 論	71
	謝辞	73
	参考文献	75
	付録A 各攪拌方法による食塩水濃度の計測値	81

付録B 各攪拌方法による食塩水濃度の時間変化	85
付録C 移動台車の走行性能評価実験の実験データ	91

目次

図 1.1 一般的なモータと球面モータ	1
図 1.2 肩関節と手首関節の特異姿勢	2
図 2.1 入れ子状弓形ステッピングモータ（矢野氏提供）	8
図 2.2 6-8 球面ステッピングモータ（矢野氏提供）	9
図 3.1 球面モータシステムの外観	20
図 3.2 回転子上の永久磁石の配置	21
図 3.3 固定子上の電磁石の配置	23
図 3.4 電磁石駆動回路の構成	24
図 3.5 電磁石の励磁石方法	27
図 3.6 球面モータのシミュレータの画面例	28
図 3.7 回転子と固定子の間の摩擦力の計算モデル	30
図 3.9 トルクを測定する方法	33
図 3.10 トルクと回転速度の関係	33
図 3.11 最大回転速度と引力が発生するように励磁される電磁石の領域の半径との関係	35
図 3.12 回転角度誤差と引力が発生するように励磁される電磁石の領域の半径との関係	36
図 3.13 固定子の電磁石数を変化させた時のトルクと回転速度との関係	37
図 3.14 回転角度誤差と固定子の電磁石数との関係	38
図 4.1 球面ステッピングモータ駆動の攪拌器の外観	41
図 4.2 可動子の外球殻と内球殻の外観	42
図 4.3 外球殻への永久磁石の配置	43
図 4.4 固定子の外観	44
図 4.5 トルクと回転角速度との関係	46
図 4.6 食塩水濃度計 MASTER-S28 α	47
図 4.7 球面モータの座標系	49
図 4.8 各攪拌方法による食塩水濃度の時間変化（2.13[rad/sec]）	50
図 4.9 各攪拌方法による食塩濃度の時間変化（5.34[rad/sec]）	51
図 5.1 球面ステッピングモータの構成図	55
図 5.2 球面ステッピングモータを用いた移動台車の外観	57
図 5.3 移動台車のモデル	58
図 5.4 球面ステッピングモータの回転性能の評価実験の方法	62
図 5.5 移動台車の推進力の評価実験の方法	63
図 5.6 移動台車の移動速度の評価実験の方法	63
図 5.7 トルクと回転速度の関係（ $\theta=0^\circ$ ）	64
図 5.8 トルクと回転速度の関係（ $\theta=24.72^\circ$ ）	65
図 5.9 制御角と駆動力の関係（ $\omega=1.92$ [rad/sec]）	66

図 5.10 制御角と駆動力の関係 ($\omega=2.88$ [rad/sec])	67
図 5.11 制御角と移動台車の速度との関係	69
図 B.0.1 攪拌方法 A による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])	85
図 B.0.2 攪拌方法 B による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])	86
図 B.0.3 攪拌方法 C による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])	86
図 B.0.4 攪拌方法 D による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])	87
図 B.0.5 攪拌方法 E による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])	87
図 B.0.6 攪拌方法 A による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])	88
図 B.0.7 攪拌方法 B による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])	88
図 B.0.8 攪拌方法 C による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])	89
図 B.0.9 攪拌方法 D による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])	89
図 B.0.10 攪拌方法 E による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])	90

表目次

表 3.1 シミュレーションにおけるパラメータ値	34
表 4.1 食塩水濃度計の仕様	47
表 5.1 制御角と駆動力の増倍率の関係	68
表 A.1 攪拌方法 A による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])	81
表 A.2 攪拌方法 B による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])	81
表 A.3 攪拌方法 C による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])	82
表 A.4 攪拌方法 D による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])	82
表 A.5 攪拌方法 E による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])	82
表 A.6 攪拌方法 A による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])	83
表 A.7 攪拌方法 B による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])	83
表 A.8 攪拌方法 C による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])	83
表 A.9 攪拌方法 D による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])	84
表 A.10 攪拌方法 E による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])	84
表 C.1 最大回転速度の測定値 ($\theta=0^\circ$)	91
表 C.2 最大回転速度の測定値 ($\theta=24.72^\circ$)	92
表 C.3 移動台車の駆動力 F' の実験値 ($\omega=1.92\text{rad/sec}$)	92
表 C.4 移動台車の駆動力 F' の実験値 ($\omega=2.88\text{rad/sec}$)	93
表 C.5 計測した時間 ($\omega=1.92\text{rad/sec}$)	93
表 C.6 計測した時間 ($\omega=2.88\text{rad/sec}$)	93
表 C.7 平均走行速度と標準偏差 ($\omega=1.92\text{rad/sec}$)	94
表 C.8 平均走行速度と標準偏差 ($\omega=2.88\text{rad/sec}$)	94

第1章 緒 言

1.1. 球面モータの構造と特長

一般的に用いられているモータは，ある 1 つの中心軸周りに回転する．これに対し，図 1.1に示すように，球形をした回転子を様々な方向に回転させることのできるモータは球面モータと呼ばれる．球面モータの動作原理には2.1節で述べるように，ワイヤーによる牽引力によるもの，電磁力によるものや，超音波の進行波を用いるものがある．多くの球面モータの構成要素には，球形の回転子，回転力を発生させて回転子に伝えるとともに回転子を支えるお椀形の固定子，回転力の発生制御機構や，電源部などのエネルギー源がある．

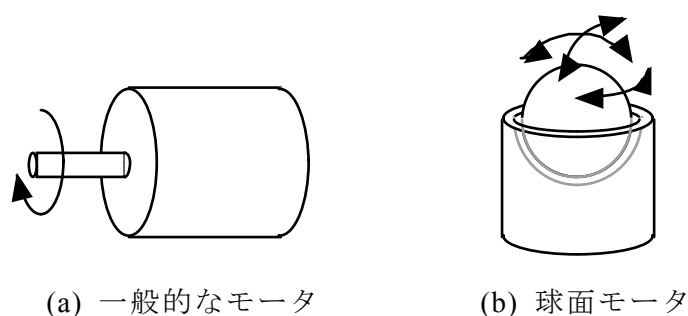


図 1.1 一般的なモータと球面モータ

一般的なモータは中心軸周りの 1 自由度の回転を行うことから，ギアを用いて利用する力を大きくすることができるが，球体を様々な方向に回転させるような多自由度の運動を行う機構を構成する場合にはいくつかの問題点が発生する．

例えば，人間の肘に対応するロボット関節を構成する場合には，肘の曲げ伸ばしとひねりを行うために 2 つのモータを組み合わせる必要がある．複数のモータを組み合わせる多自由度機構を実現する場合には，先端側に配置するモータは根元側

に配置するモータにぶら下がる格好となり，根元側のモータには先端側のモータも含めて回転させるだけの大きな出力トルクが必要となり，ロボット関節のエネルギー利用効率が悪くなる．

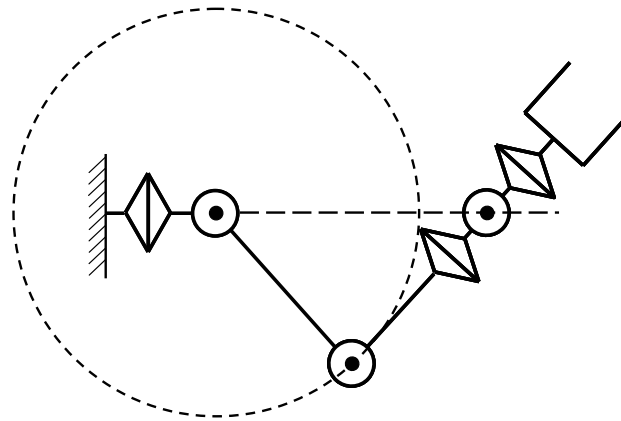


図 1.2 肩関節と手首関節の特異姿勢

また，6自由度のロボットアームは，肘が一直線に伸びた状態は特異姿勢となり^[1]，いかなる関節速度を与えてもある方向の手先速度（並進速度，回転速度，またはそれらの組合せ）が発生できない．肘が一直線に伸びた状態は作動領域の境界上の点に対応すると考え得るが，図 1.2に示すような肩の特異姿勢（手先位置が肩の真横）や手首の特異姿勢（手首が一直線に伸びた状態）は作動領域内でも存在し得る．このような特異姿勢の問題に対する機構面からの対策としては，機構を工夫して特異姿勢が生じる位置を重要でない領域に移したり，関節角制限を設けて特異姿勢に達するのを防止したり，自由度を増して冗長自由度をもつロボットアームとしたりする方法などがある^[2]．

一方，ヒューマノイドロボットのアーム機構には，肩の屈曲・伸展，内転・外転，水平屈曲・水平伸展と内旋・外旋を行うために，3つのモータを用いて関節回転中心が1点で交わる構造が多い．また，手首の特異姿勢を回避するため，回転軸が1点で交わる4自由度を持つ手首機構もある^[3]．これらの機構は，冗長自由度を利用して特異姿勢回避を行うことにより，6自由度機構よりも姿勢操作性に優れた動きを実現している．しかしながら，冗長でロボットアームの先端の位置と姿勢を指定した場合のロボット関節の回転角度の計算（逆運動学）が複雑になる．

また、電気自動車などの車両では前後方向に回転するようにモータ軸が配置されているため、直接横方向には移動できず、縦列駐車などでは切り返しのためのスペース、時間や運転技術が必要となり、必然的に狭い場所での利用は困難である。

これに対して1台で多自由度の動きを実現し、回転中心が同一となる球面モータでは、構造が単純・コンパクトであり、球形の回転子が様々な方向に回転できる。このため、一般的なモータと比較すると、

- (1) 多自由度機構を実現するためのモータ数を削減できることからシステムの小型・軽量化が可能であり、
- (2) 冗長自由度が必要ないため、ロボットアームの先端の位置と姿勢を指定された場合のモータの回転角を幾何学的に解くことができることとなり、簡単に制御でき高速化が実現できる、
- (3) 減速機構を介さずに、ロボットの眼や球面関節などを直接駆動できる、
- (4) 複雑な機構を組む込むことが困難なマイクロマシンの分野においても無駄のない多自由度の駆動機構を実現することで、マイクロ化を容易にする、
- (5) 多自由度を確保するために配置されたモータも含めた回転トルクを根元側のモータが持つ必要がないために省エネルギーが期待され、
- (6) 1軸モータの上に1軸モータを搭載する親亀子亀方式では組み付け誤差が生じることやメンテナンスが大変になることで実現が難しいサブミクロンの位置決めシステムを比較的容易に実現できる。

といった利点があると言われている^{[4]~[6]}。このような特長から、これまでに様々な駆動方式の球面モータが研究、開発されている。

1.2. 球面モータの応用性

球面モータは全方位へ回転できる特徴から、様々な応用が考えられている。

日本は2007年に、総人口の21%以上を65歳以上の老年人口が占める超高齢社会に突入している。65歳以上であっても元気な高齢者は多いが、介護が必要な高齢者も年々増加しており、また、介護期間も長くなる傾向にある。このため、高齢者ができるだけ自立的な生活をおくるための福祉機器の研究、開発も盛んである。人間の生活上、家庭内の移動は必須であるが、建物の部屋内はそれ程広くはなく、通常の手椅子では移動が困難である。球面モータは様々な方向に回転できるため、ホロノミックな移動により狭い場所で自由に移動できる手椅子の駆動装置として応用できる。

多関節ロボットの関節への応用では、逆運動学を幾何学的に簡単に解くことができる特長を生かして、ロボットアームの先端の位置決め精度の向上や制御回路の小型化が期待される。また、全方位回転できる球面モータを用いて、ロボットアームの冗長自由度を増加せず作動領域を拡大することが期待できる。また、手術における患者への負担が少なく美容的にも良いことから、内視鏡手術の範囲が広がってきているが、小型でモータ数を少なくできる利点を生かして、多自由度で多機能な鉗子などへも応用できる。

地球上では重力の影響が避けられないために、三次元的に均質な材料の製造が困難である。そこで、宇宙空間や落下を利用した無重力空間での新しい材料や高性能の材料の創成が期待されている。材料製造における重力の影響は、液状の混合原料を様々な方向に回転させて攪拌することで低減することができる。球面モータでは中空の回転子を用いる場合がほとんどであるため、材料製造のための攪拌装置へも応用できる。

さらに、回転子にレーザーポインタやLEDなどを取り付けることにより、ポインティングデバイスやリモートカメラなどの駆動や、室内イルミネーション装置の駆動源としても応用できる。また、球面モータを用いて、荷物を適切な搬送用コンベアに振り分ける応用も考えられる。

1.3. 球面モータの技術的課題

球面モータは球対称な運動を可能にすることからその実用化が望まれているが、まだ解決すべき課題がいくつかある。まず、モータ効率があまり高くなく、球面モータの広範な実用化には通常のコモータにおけるモータ効率のように50%以上を実現することが必要であろう。また、通常のコモータに対するエンコーダのような球面モータの回転を計測する小型の計測装置が手軽には用いられないため、ほとんどの球面モータはオープンループの制御となっている。回転子の姿勢を計測する小型のデバイスを用いた回転制御特性の向上のためのクローズドループ制御の確立が望まれる。

1.4. 本研究の目的

本研究では、電磁石駆動の球面モータ^{[7][8]}の応用性を検討することを目的とする。

まず、回転子が中空である構造を利用して回転子を二重球殻とし、内側球殻内に封入した液体を混合する攪拌器としての応用性を検討する。球面モータの任意方向に回転できる特長を利用して、様々な方向に回転方向を変えながら回転させることによって液体を混合させる。様々な方向への回転により重力の影響を緩和した攪拌が期待される。いくつかの攪拌方法の性能を比較することにより、攪拌器への応用性を評価する。

球面モータの非ホロミックな移動台車の駆動装置への応用を検討する。一般的なモータでは、ギアを用いることにより回転速度を小さくして回転トルクを向上させるが、球面モータでは減速機構の装備が困難であることが問題である。本研究では、回転子の回転軸を水平から傾けることにより回転トルクが向上する球面減速を検討する。そして、その有効性を、球面モータを用いた簡易型の移動台車を用いて評価する。

1.5. 本論文の構成

次章の第2章では，球面モータに関する関連研究をサーベイした結果をまとめる．第3章では，本研究で用いる電磁石駆動の球面モータの構造と回転駆動原理，回転制御回路，および，球面モータの設計に用いる球面モータのシミュレータを，参考文献に基づいて述べる．第4章では，球面モータの攪拌器への応用を提案し，攪拌性能の実験的評価を述べる．第5章では，球面モータの非ホロノミックな移動台車への応用を検討し，球面減速の提案とその有効性評価実験を述べる．最後に，第6章において，本研究で得られた成果をまとめるとともに，今後の課題を述べる．

第2章 関連研究

本章では，球面モータ，攪拌器や全方向移動機構の研究動向についてサーベイして技術動向を把握し，それぞれの技術開発状況をまとめる．

2.1. 球面モータの種類

球面モータは，その駆動原理により大きく牽引型，電磁型，および，超音波型の3種類に分類される．すなわち，回転子に複数本のワイヤーを取り付けて牽引するもの，永久磁石を配置した回転子を電磁石が作る回転磁界により回転させるもの，および，超音波振動により回転子を回転させるものである．

2.1.1. 牽引型球面モータ

ワイヤー牽引型球面モータはボール状の球殻と円筒状の軸受けで構成され，球殻表面に取り付けたワイヤーを弛ませることなく球面に沿って軸受けに開けられたワイヤー吸い込み穴に導き，このワイヤーをステッピングモータで引っ張り，または，送り出すことによって，球殻を回転，旋廻させる構造になっている．一般的にシリアル型で3自由度を構成するために3軸のピンジョイントをそれぞれ拮抗駆動した際には6本のワイヤーが必要であるが，本機構をワイヤー型パラレルリンクメカニズムと考えると，3自由度動作のためには4本のワイヤーで駆動可能である．本田らは，4本のワイヤーの配置位置における球殻の動作範囲を数値計算により明らかにし，試作機で配置と動作範囲の関係を確認した^[9]．しかしながら，球殻上に取り付けるワイヤー端部の位置およびワイヤーを導き入れる軸受け部の小穴の位置によって，回転不可能な方向が存在し，原理上回転角度や回転方向に制限がある．坂井らは，ワイヤーの本数を増やして，ロボットの肩関節機構への応用を行っている^{[10][11]}．

2.1.2. 電磁型球面モータ

電磁型球面モータでは、電磁力によって回転子を任意の方向に回転させる。これまでに、球面ステッピングモータ、球面同期モータ、および、球面誘導モータが研究開発されている。

球面ステッピングモータ

ステッピングモータと同様に、磁石間の引力と斥力を利用して回転子を回転させるタイプの球面モータである。ステッピングモータは原理的には同期モータに分類されるが、研究事例が多いため、球面同期モータとは別個に説明する。球面ステッピングモータでは、回転子に永久磁石を固定子に電磁石をそれぞれ多数配置することが多い。

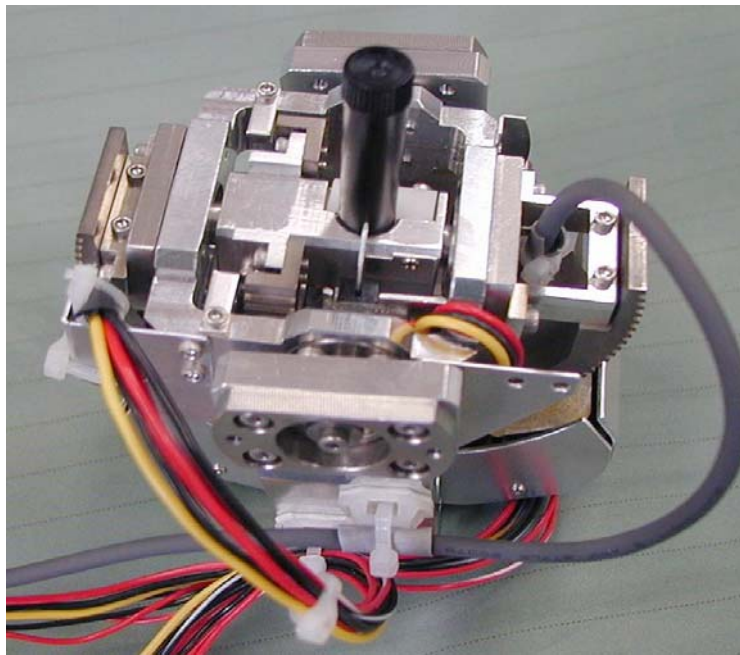


図 2.1 入れ子状弓形ステッピングモータ（矢野氏提供）

回転方向や回転角度に制限があるものとして、2つの弓形のステッピングモータを回転軸が互いに直交するように入れ子状に配置したもの^[12]（図 2.1）や、ステッピングモータの軸を傾けることで多自由度化を図ったものがある^[13]。また、8個の永久磁石を回転子に配置し、固定子には電磁石 24 個を 2 層構造に配置したもの^[14]や、直径

275mmの回転子に永久磁石を112個配置し、固定子には電磁石を96個配置したものの^[15]も開発されている。

一方、回転方向や回転角度に制限のないものでは、回転子の永久磁石や固定子の電磁石の配置が球対称であることが理想であるが、正多面体には正四面体、正六面体、正八面体、正十二面体、正二十面体しかなく、多数の永久磁石や電磁石を配置することができないため磁石配置には工夫が必要である。正多面体や準正多面体の頂点に磁石を配置することが検討されており、回転子の永久磁石を正六面体の頂点位置に配置し、固定子の電磁石は正八面体の頂点位置に配置した6-8球面ステッピングモータが試作されている^{[16]~[18]} (図 2.2)。また、直径12inch (305mm)の回転子に永久磁石を24個配置し、固定子には16個の電磁石を配置して、位置決め精度がZ軸方向で 3° 、X、Y軸方向で 15° のものも開発されている^[19]。さらに、全方位に回転して回転方向によらずに数 $^\circ$ の位置決め精度を持つ球面ステッピングモータが開発されている^{[7][18]}。なお、この球面ステッピングモータは、本研究で応用の対象とする球面モータであり、第3章でその概要を述べる。

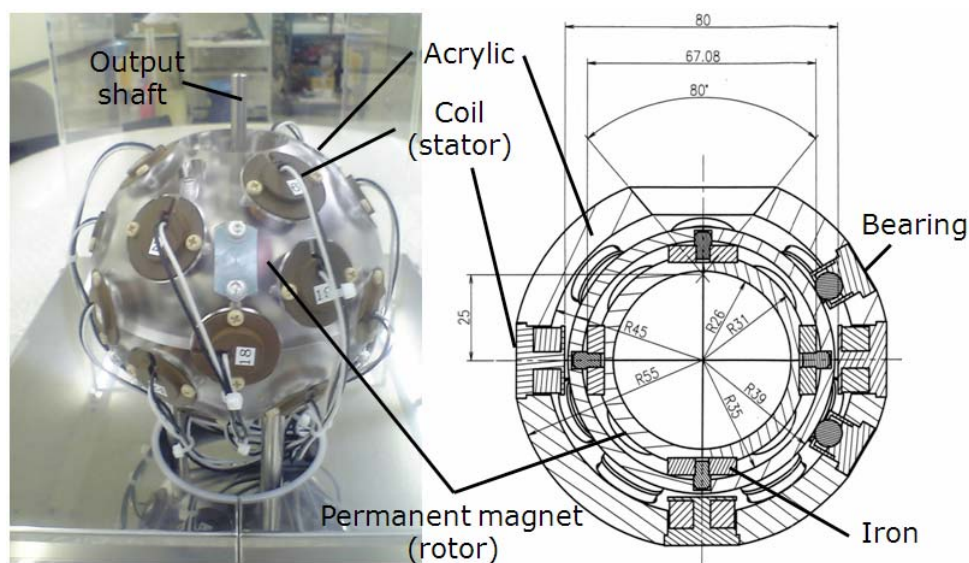


図 2.2 6-8 球面ステッピングモータ (矢野氏提供)

球面同期モータ

産総研の矢野らは、立体的に配置した3組の巻線に流す正弦波電流の振幅と位相を変えることによって回転磁界の回転軸を3次元空間の任意方向に制御した球面同期モータを開発している^{[20][21]}。この球面モータはZ軸中心に $\pm 10^\circ$ の円錐内において、回転速度が600rpmで回転しつつ回転軸の方向を決めることができる。その位置決め精度は 0.5° であり、最大トルクが0.2[Nm]である。

また、矢野らは、回転子に永久磁石を外側がN極とS極が交互になるように配置し、固定子のジンバル機構の付け根部分にはX軸方向用とY軸方向用の界磁巻線を2組配置し、各組には3個の電磁石を配置した、多極PM同期モータを開発している^[22]。この球面モータでは、ジンバル機構の付け根部分では、三相リニア同期モータと同じ構造となるため、X方向用の界磁巻線の組に三相交流を与えるとX方向に、また、X方向用とY方向用の界磁巻線の組に三相交流を与えるとX方向とY方向の合成方向に回転する。

天津大学のXiaらは、回転子上の永久磁石をそれぞれハルバッハ配列で配置することでトルクを向上させたPM同期モータの開発を目指して、磁場解析を行い、構造の設計をしている^{[23]~[25]}。

Sheffield大学のWangらは、支持機構にベアリング、位置計測にホール素子センサを用いてPI位置フィードバック制御ができる球面同期モータを開発している^[26]。開発された2自由度モータは可動範囲 $\pm 45[\text{deg}]$ 、最大トルク0.4[N・m]である。開発された3自由度モータは可動範囲 $\pm 45[\text{deg}]$ 、最大トルク0.6[N・m]である。

Georgia工科大学のLeeらは、球状ロータに多数の永久磁石、腕状ステータに多数の電磁石を配置し、電磁石に電流を流してロータの回転を制御する方法を提案した^{[27][28]}。それぞれの永久磁石と電磁石のペアに働くリラクタンストルクを計算し、その総和を所望のトルクになるようにそれぞれの電磁石に流す電流を制御する。

球面誘導モータ

球面誘導モータは、交流モータの一種である誘導モータと同様に、固定子の作る回転磁界によって、電気伝導体の回転子に発生した誘導電流による回転トルクにより回転する。球面同期モータと比べて、脱調することがないため、トルク変動の大きい負荷に向いている。

矢野らは、立体的に配置した3組の巻線に流す正弦波電流の振幅と位相差を変えることにより回転磁界の回転軸を三次元空間内の任意の方向に制御できることを示し、ロータをコイルにする球面誘導モータを開発した^[20]。しかしながら、コイルを立体的に巻くのは非常に困難である。

一方、Louvain大学のDehezらはロータを中空鉄球にする球面誘導モータを開発した。渦電流損を減らすため、薄い球殻を用いることにした。試作した球面誘導モータは、14000[rpm]で0.15[Nm]のトルクを得ている^[29]。

また、武蔵野工科大学の海老原らは、ロータを中空鉄球にする球面誘導モータを開発した。渦電流損を減らすため、球殻の表面に厚さ1[mm]のアルミを融着した。試作した球面誘導モータはZ軸周りに1000[rpm]、X、Y軸周りに60[rpm]でロータを回転させながら、回転軸の方向を調節することが可能である^[30]。

2.1.3. 超音波型球面モータ

超音波型の球面モータでは、カメラ用レンズの自動焦点機構に用いられている超音波モータと同様に、圧電素子を用いて発生させた振動（超音波）により回転子を擦動させることで、回転子を回転させる。3つの圧電素子と回転子を密着させたものが実用化されている^[31]。また、圧電素子の上にリング上の振動子を配置して、圧電素子の振動により振動子のリングの形をならせることにより駆動するものも開発されている^[32]。

2.2. 攪拌器の研究・開発現状

攪拌は流体をかき混ぜる操作に対する呼称である。流体が高度に粘稠な場合は、捏和と呼ぶ。また、粉体に対するかき混ぜる操作は混合とも呼ばれる。攪拌の主たる目的は、均一、混和、分散、溶解、希釈、乳化、沈降防止、反応、伝熱である。

用途に応じて様々な攪拌器が開発されている。工場で用いられるものは単に棒・板・プロペラ状の攪拌翼を槽内で一定速度・一方向に回転させるものが多いが、容器を回転させるものもある。また、化学実験や細胞培養実験など、実験室規模で粘性がほとんどない液体を反応、伝熱あるいは沈降防止などの目的で攪拌する場合、磁石を封入しテフロン等でコーティングした攪拌子を容器の外部から回転する磁界で動力を伝達するマグネチックスターラーと呼ばれる装置も存在する。

化学工学分野には、棒・板・プロペラ状の攪拌翼が有する攪拌器の研究が盛んに行われている。上和野らは、同心二重円筒装置、錨型翼攪拌装置、タービン翼攪拌装置および案内円筒付き螺旋軸翼攪拌装置を用い、攪拌槽内に対流によって発生する濃度むらの混和状況を写真撮影し、光学的な方法により写真フィルムの黒化度を分析して、装置特有の混和パターンを検討した。その結果、装置ごとに槽内の未混和部分のスケールの減少速度を与える解析式を導出した^[33]。また、笹倉らはパドル型翼攪拌槽内の混合特性を、パルス応答法を用いて、実験的に検討を行い、応答波形における循環の周期ならびに峰あるいは谷部の形成時間を測定して、翼条件と循環時間との相関性ならびに測定位置による応答の遅れについて明らかにした^[34]。また、加藤らは、攪拌所要動力をキーワードに、いくつもの攪拌槽に関する性能を説明できることを示し、これまでの研究成果をまとめることを試みた。乱流攪拌槽（一部層流を含む）に関しては、大まかであるが攪拌所要動力によって、流動特性、混合特性、伝熱特性および物質移動特性を推定可能なことを示した。また、動力相関式は永田の式と同様、平岡・亀井の式も有用であることを示した^[35]。また、加藤らは、球底槽と皿底槽および平底槽との攪拌所要動力の差異を明らかにした。その結果、最も差が顕著に表れる攪拌槽の条件は、標準邪魔板条件の乱流状態では、パドル翼を用いたときであることがわかった。その際、球底槽の攪拌所要動力は平底槽のそれに比べて最大約 27%低下した。皿底槽の攪拌所要動力は平底槽のそれに比べて最大約 20%低下した。また、傾斜翼およびプロペラ翼の動力数は槽底形状の影響はほとんど受けなかった^{[36][37]}。

近年、乱流による攪拌の研究が盛んに行われている。例えば、コーヒーにミルクを混ぜる場合には、スプーンを、円を描くように動かすより、ランダムにかき混ぜる方

が早く混ざる効果がある。乱流攪拌槽において最も簡単な攪拌促進の方法はパッフルと呼ばれる邪魔板を使用する方法である。加藤らは、種々の攪拌翼を備えた乱流攪拌槽の攪拌所要動力に与える邪魔板挿入深さの影響を実験的に検討した。種々の翼に対する邪魔板挿入深さ、邪魔板枚数、邪魔板幅を変数とした攪拌所要動力の相関式を提案した。本相関式は邪魔板枚数が1枚のとき測定値が相関値より若干小さくなったが、おおむね良好に動力を推算することができた。特に傾斜パドル翼の動力数は平岡らの相関式(1997)を用いて相関が可能であった^[38]。

近年ロボットなどに多く用いられているサーボモーターを攪拌操作に応用した。モーターの断続的な運転、回転方向の反転、また、翼を上下移動させるなどの非定常な操作を攪拌操作に応用し、ディスクタービンという主に低粘度領域で使用される攪拌翼でも低レイノルズ数領域で邪魔板を使用しなくても効果的に使用できることがわかった。翼の断続的な運転操作は液体の攪拌に有効であり、切換頻度を大きくした方が効果的だったが、運転切り替え時間を2秒以下にすると混合性能は低下した。また、翼の上下移動では移動速度と移動距離を大きくすることが効果的だった。トルクは、断続運転よりも正逆運転の方がより高い値を示した。単位体積当たりの動力で混合時間を評価した結果、非定常攪拌はかなり効果的であることが分かった^{[39][40]}。

一方、容器を回転させる攪拌器の開発も行われている。株式会社セイワ技研が開発した混合・攪拌機は、2自由度を組み合わせて容器を回転ながら、回転軸の向きを変える。容器を回転させることで攪拌材料を流す。また、容器壁により流れの方向や速度を変え、不規則な流れが生ずることで攪拌することができる^[41]。しかしながら、容器と攪拌材料を一緒に回転させるため、攪拌翼型のものより所要動力が高い。また、構造が対称ではないため、一般的に低速度で回転させる。流れの速度が遅いので、攪拌翼型のものより攪拌効果は低い。

一方、近年高速回転で乱流の流れ速度を上げて、攪拌効果を向上させる開発傾向がある。従来の攪拌翼の横断面の面積が大きいため、粘度が高い液体を攪拌する際、低い速度で回転させなければならない。株式会社エディプラスは、羽が無い攪拌器を開発した。回転軸方向の断面が円形状に構成されるため、攪拌軸を高速回転することができる。また、底部の吸入口と半径方向の吐出口を繋ぐ乱流を促進することができる^[42]。株式会社シンキーが開発した自転・公転ミキサーは、高速の自転で生じた遠心力が押圧力として容器中の材料に対して働き、渦状の流れが生じる。また、公転で傾いた回転軸の方向を変えて、攪拌材料の流れの方向を変え、乱流を促進することにより、材料同士が混合され、均一に分散する。対称な機構が用いるため、高速回転が可能で

あり，高粘度材料の攪拌効果は大きい^[43]．しかしながら，一般的なモータを用いるため，これらの攪拌器は，回転軸の方向には制限がある．

一方，球面モータが全ての方向へ回転することができる．これを用いて全ての方向へ回転できる攪拌器が開発すれば，同じ回転速度で上記の攪拌器より良い攪拌効果が期待される．

2.3. 全方向移動機構の研究動向

ロボットの移動機構には、車輪型移動機構が最も広く用いられている。しかしながら、この機構は移動方向の制限がある。例えば、自動車は真横に移動できないため、目的位置に到達するためには時間をかけて切り返しを行う必要がある。狭い場所を通り抜ける際や、複数ロボットが同一物体を協調搬送する際には、このことが大きな問題となる。このため、近年全方向移動ロボットの研究が盛んに行われて、様々な種類の移動機構が提案されている。本節は文献^{[44][45]}に基づき、下記の3種類の移動機構に分けて紹介する。

2.3.1. フリーローラ付き車輪を用いた機構

フリーローラ付き車輪は、ある1方向にのみ駆動力を発生することができ、それとは別の方向には、フリーローラが自由に回転することにより抵抗なく移動可能である。

あらゆる方向に移動・旋回できる機構として、車輪円周上に中心部が太く両端が細くなった円筒状フリーローラを取り付け、それらを2個重ねた車輪機構がよく用いられているものである。このような車輪を120度ごとに3つ配置し、各車輪をそれぞれのアクチュエータで駆動する研究^[46]がある。しかし、このロボットは並進安定性が機構的に得られないので、直線走行をさせようとすると複雑な制御が必要となる。また、このような車輪を4つ用いる研究^[47]もある。1自由度冗長となるため、各車輪の回転速度が一意に求められない。4つ車輪の同期制御が必要となる。浅間らは、平面内運動3自由度を3個のアクチュエータで独立に制御することより、制御を簡単とすると同時に高い移動精度を実現している^[48]。藤原らは、このような車輪を用いた全方向移動型パワーアシストカートを開発する上で、操作性と安定性を向上させる制御方法を提案した^[49]。北川らは、それを用いた全方向移動車椅子を対象とした乗り心地向上のための走行制御系を構築した^[50]。鄭らは、このような車輪を用いて、コンパクトで高い旋回能力を有する倒立振り子型全方向移動ロボットを開発した^[51]。

また、車輪円周上に車軸に対して45度傾けて円筒状フリーローラを取り付けた車輪機構（メカナムホイール）や、車輪円周上にリング状フリーローラを取り付けたもの

がある。永谷らは、メカナムホイールを用いた全方向移動車のナビゲーションの研究を行った^[52]^[53]。藤沢らは、リング状ローラを取り付けた車輪を用いて、四輪独立駆動型全方向移動ロボットを開発した^[54]。

車輪だけではなく、フリーローラ付きクローラ^[55]や、回転方向が違う球状フリーローラを組み合わせた特殊形状のもの^[56]^[57]もある。

しかしながら、この機構では、床面の凹凸に対して極めて弱く、小さな段差しか乗り越えることができない問題点を有する^[58]。

2.3.2. 車輪型機構

全車輪にステアリングを設置し、全方向移動を実現した機構である^[59]。

車輪配置に関しては、全方向移動を実現するためには、2個以上の車輪を用いればよい。しかし、安定した移動を実現するために実際には4輪を用いることが多い。ただし、各車輪の回転速度およびステアリング方向に従属関係が存在するため、与えられた軌道に追従し移動するための制御は簡単ではない。和田らは、キャストと同様な軸配置を有する車輪で構成された4車輪型ロボットの開発を行い、非ホロノミック拘束を回避する制御手法を提案した。また、実機でその有効性を確認した^[60]。

また、自由度の数に対してアクチュエータ数が多い過拘束を回避するため、2駆動輪を平行に配置し、2車輪の midpoint から前方に離れた位置に操舵輪を配置した機構^[61]や、オフセット付車輪を4輪用い、一つのアクチュエータですべての車輪の方向を同時に変化させる機構^[62]も提案されている。

一般に、車輪を用いて全方向移動を実現する場合には、ステアリング機構が必要となるため、アクチュエータ数が多くなると同時に制御が困難となる。しかし、特殊な車輪を製作する必要はなく市販のゴム製タイヤを用いることが可能であるため、製作は比較的容易である。また、少々の段差ならそのまま乗り越えることが可能であり移動時のがたつきも小さいことから、移動時の安定性は非常に高い。

2.3.3. 球型機構

球型の移動機構を用いて全方向移動を実現している。

和田らは、球を用いた機構を車椅子に応用し、狭い場所でも自由に移動できるように車輪間隔を変化させることが可能な機構も提案されている^{[63][64]}。

もっともよく用いられる球面駆動は、ボールマウスのエンコーダ部をモータに取り替えて能動的に回転させたものである^{[65]~[66]}。この方式は、基本的に球一つに対して、二つの摩擦駆動ローラを有するものであるが、臼井らの方式は球一つに対して、アクチュエーター一つですむように、配置を工夫してある^[67]。その他、一つの球のみを用いる方式の例として、中村らによるBBR^[68]、CMUのBallbot^[69]、熊谷らによる玉乗りロボット^[70]が挙げられる。

摩擦駆動であるがゆえに、路面の凹凸があった場合、また、砂やごみ、濡れた走行面では水が表面についた場合は、駆動力を伝達するのが著しく困難になると考えられる。車輪表面の摩耗により駆動力が変動しやすいという問題もある。摩擦駆動であるため、グローサを付けることが非常に困難である。埃・砂・水などがあり・走行面の凹凸などのある実環境で、全方向に高い走破性を維持することは非常に困難であると考えられる。

第3章 電磁石駆動の球面ステッピング モータ

本章では，本研究で応用を検討する，全方位に回転する球面ステッピングモータ^{[7][8]}の構成，回転子の駆動方法の概略，また，球面ステッピングモータの設計に用いるシミュレータのモデルの概要を，文献^{[7][8]}に基づき述べる．

3.1. 全体構成

球面モータは，図 3.1に試作機の外観を示すように，永久磁石を 32 個配置した可動子，84 個の電磁石が配置された固定子から構成される．また，個々の電磁石を励磁するために，電源部，励磁制御回路，および，電磁石の励磁パターンを生成してそれを励磁制御回路に送信するパソコンから構成される球面モータ駆動部がある．以下では，球面モータおよびその駆動部のそれぞれの構成要素について説明する．なお，固定子に配置されている電磁石の数は，3.6節で説明する球面モータのシミュレータを用いて，全方位回転が確実に行えると予想される個数として求められた数である．

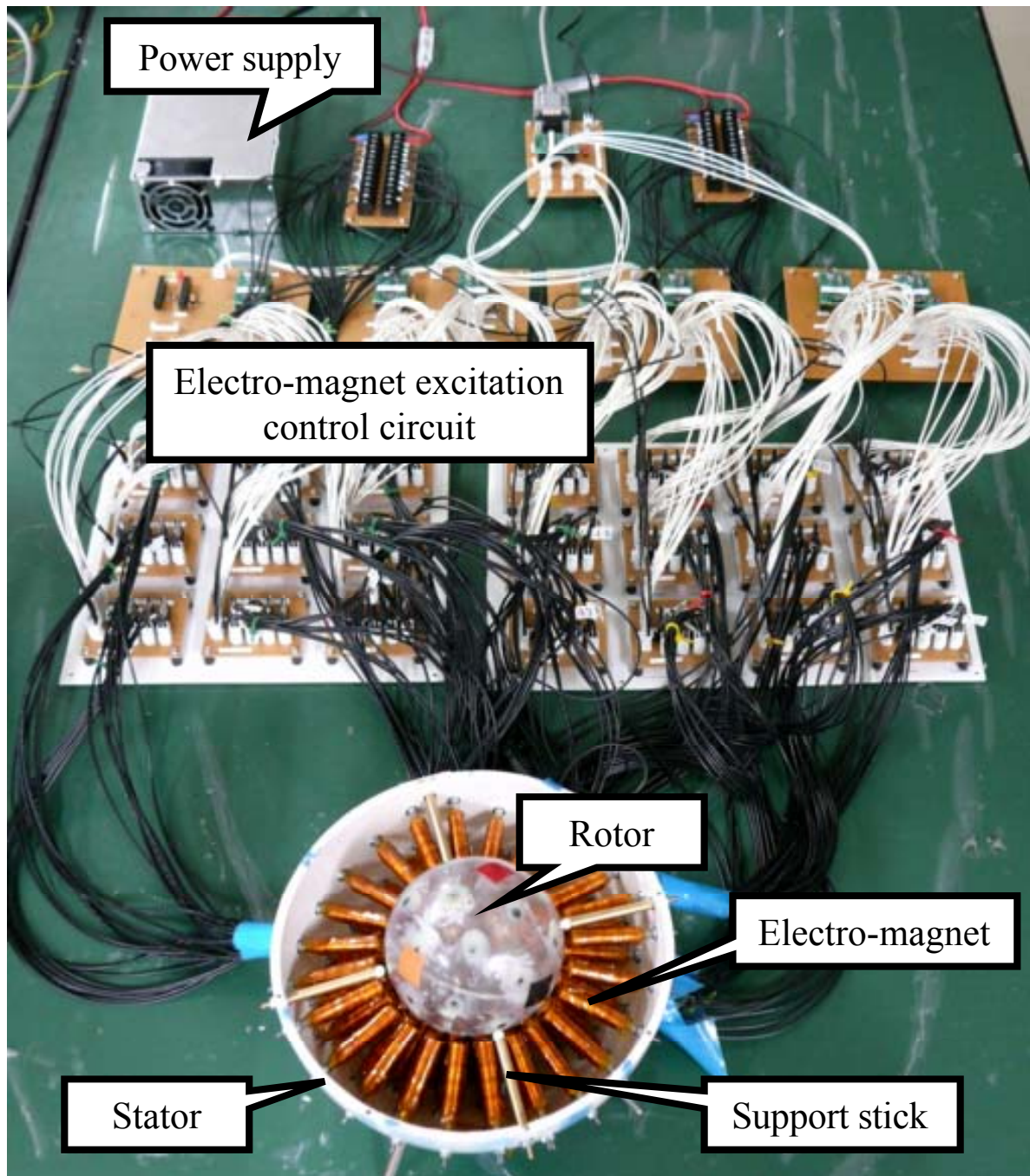


図 3.1 球面モータシステムの外観

3.2. 可動子

可動子は、塩化ビニルの中空球殻（半径： 0.05 [m]，厚さ： 0.75×10^{-3} [m]，質量： 0.075 [kg]）が用いられている．この球殻の内側に永久磁石（ネオジム磁石，半径： 3.0×10^{-3} [m]，厚さ： 5.0×10^{-3} [m]）が，球殻の外側向きがN極となるように32個配置されている．永久磁石は球内面にできるだけ均一に配置することが必要である．図3.2に示すように，1つの球に内接する正十二面体と正二十面体を組み合わせた立体の頂点に永久磁石が配置されている．ここで，一方の正多面体の頂点は，内接する球の中心から他方の面の重心を結ぶ半直線と球の交点となるように，正十二面体と正二十面体を双対の関係に組み合わせている．なお，図3.2では，白丸は正十二面体の頂点を，黒丸は正二十面体の頂点を表す．

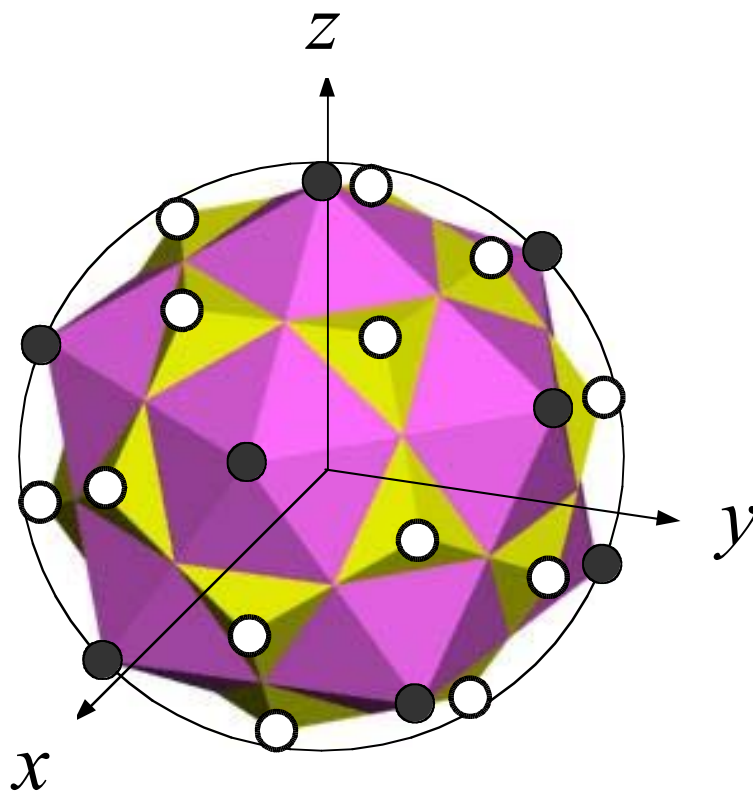


図 3.2 回転子上の永久磁石の配置

永久磁石の配置位置は以下のように計算される．まず，球殻の中心を原点とする直交座標系において，正二十面体の12の頂点のうちの2つが

$$\mathbf{r}_1 = (0, 0, r_{in}) \quad (3.1)$$

および

$$\mathbf{r}_2 = \left(\frac{2\sqrt{5}}{5} r_{in}, 0, \frac{\sqrt{5}}{5} r_{in} \right) \quad (3.2)$$

となるように正二十面体を配置する．ここで， r_{in} は球殻の内径である．また， \mathbf{r}_3 から \mathbf{r}_6 は， \mathbf{r}_2 を z 軸の周りに $72 [^\circ]$ ずつ回転させることによって求まる．残りの6つの頂点は， \mathbf{r}_1 から \mathbf{r}_6 を y 軸の周りに $180 [^\circ]$ ずつ回転させることによって求まる．そして，その他の20の頂点の座標は正二十面体の重心とする．

3.3. 固定子

固定子はポリウレタン樹脂の半球殻に84個の電磁石（鉄心部半径： 2.6×10^{-3} [m]）と，可動子を固定子から一定距離の位置に拘束するための支持部から構成されている．支持部は先端にプラスチックの小球（半径： 2.5×10^{-3} [m]）を取り付けた8本の支持棒よりなる．支持棒は，固定子の最低部から上面へ 40° と 85° の位置にそれぞれ4本ずつ設置されている．なお，この可動子の支持方法では支持棒と可動子との間の摩擦が大きいと考えられるために，実用的な球面モータにおいては，摩擦の小さい支持方法を工夫する必要がある．

電磁石の可動子側の極の位置は，図3.3に示すように，固定子上面の円を xy 平面に置き，その中心を原点とした直交座標系において，

$$x = R \sin \left(\frac{\pi}{n} i + \frac{\pi}{2n} \right) \quad (3.3)$$

$$y = R \sin \left(\frac{\pi}{n} j + \frac{\pi}{2n} \right) \quad (3.4)$$

$$z = -\sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} \quad (3.5)$$

とする．ここで， R は固定子に配置の電磁石の可動子側の極の配置半径であり， π/n は電磁石配置の角度間隔である．また， i, j は整数であり，

$$-\frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{n}i + \frac{\pi}{2n} \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.6)$$

および

$$-\frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{n}j + \frac{\pi}{2n} \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.7)$$

を満たし、そして、 $R^2 - (x^2 + y^2) \geq 0$ を満たすように x および y を決める。従って、 x および y 方向に最大 $n+1$ 個の電磁石が配置されている。

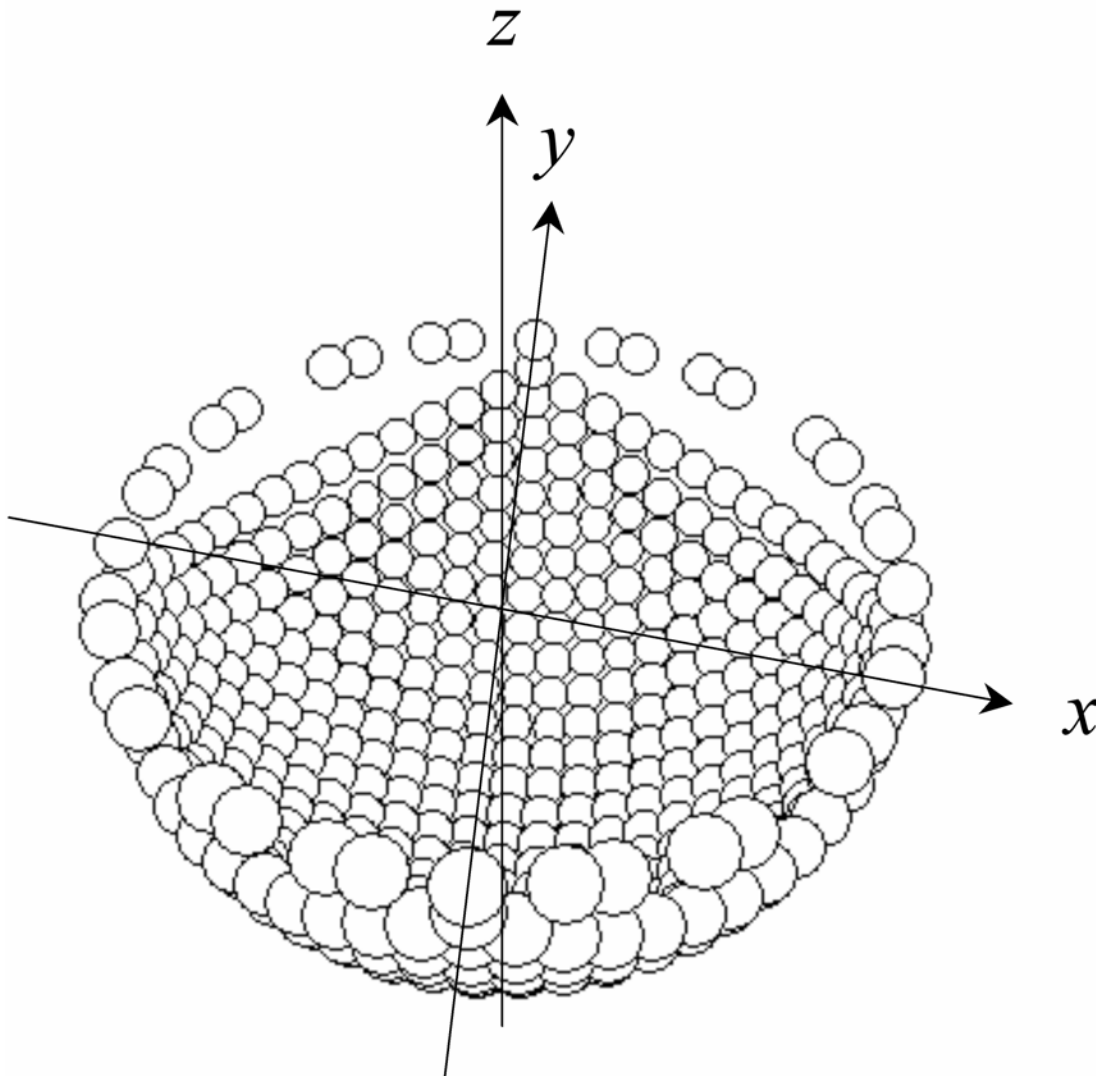


図 3.3 固定子上の電磁石の配置

3.4. 電源および電磁石の励磁回路

固定子に配置した電磁石の励磁のために、電圧 12 [V]，最大出力電力 600 [W] のスイッチング電源（COSEL製，型式PBA600F-12）が用いられている．また，電磁石のN極あるいはS極への励磁や非励磁を制御するために，図 3.4に構成を示す励磁回路が設計されている．

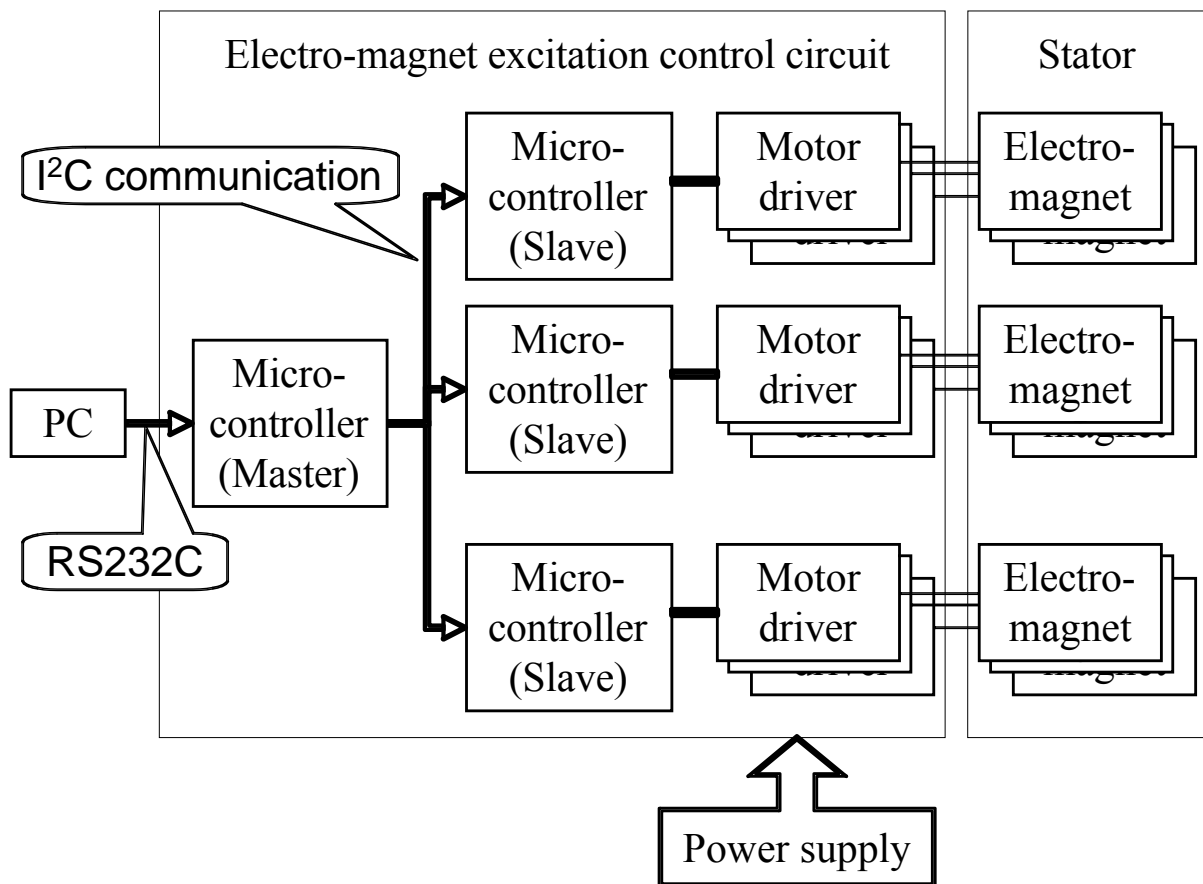


図 3.4 電磁石駆動回路の構成

図のPCでは，電磁石励磁制御プログラムにより，すべての電磁石の励磁が計算される．電磁石の励磁パターンについては3.5節で説明する．各々の電磁石はそれぞれモータドライバ素子により，電磁石を流れる電流（0.5 [A]）のON/OFFおよび方向が制御される．モータドライバ素子は 84 個と多いため，それぞれのモータドライバ素子への制御信号の伝達は階層的に行うこととされている．すなわち，PCからの制御信号は一

且マスタマイコン (H8/3694) が受け取り, それを 7 個のスレーブマイコン (H8/3694) へ分岐させる. スレーブマイコンは 12 個のモータドライバ素子に制御信号を伝達される. なお, PC とマスタマイコン間の通信には RS232C (通信速度 57600 [bps]) を, マスタマイコンとスレーブマイコン間の通信には I²C 通信^[7] が用いられている.

3.5. 電磁石の励磁方法

本球面モータでは, 短い時間きざみ幅で固定子の電磁石の励磁パターンを切り替えていくことにより, 可動子の回転制御が行われている. ここでは,

- (i) 可動子の初期姿勢がわかっている, および,
- (ii) 可動子は励磁パターンの切り替えの時間きざみ幅の間に目標姿勢に到達する

ことを前提としている.

可動子における永久磁石の配置は, 3.2 節で述べたように, 幾何学的に決まっている. また, 可動子はその任意の半径方向の軸に対して, 接線方向に 2 自由度と軸周りの 1 自由度を持って回転する. したがって, 可動子の中心を原点とした直交座標系において, 永久磁石のうちの 1 つの座標により可動子の姿勢を表すことができる.

そこで, 中心の周りの回転演算が容易な四元数^[71]を用いて可動子の姿勢が表現されている. 四元数とは, 4 つの実数からなり, 1 つは実部で残りの 3 つは虚部になっている. 実部が f であり虚部が a, b, c である四元数 A を

$$A = (f; a, b, c) \quad (3.8)$$

と表す. そして, ある座標 $P : (x, y, z)$ を, 四元数を用いて

$$P = (0; x, y, z) \quad (3.9)$$

と表す. 原点が回転中心であり, 回転軸の方向が (α, β, γ) (ただし, $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$) であるとき, 回転軸に対して左ねじの方向に回転角 θ だけ回転した後の座標 $P' : (s, t, u)$ は,

$$Q = \left(\cos \frac{\theta}{2}; -\alpha \sin \frac{\theta}{2}, -\beta \sin \frac{\theta}{2}, -\gamma \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (3.10)$$

$$R = \left(\cos \frac{\theta}{2}; \alpha \sin \frac{\theta}{2}, \beta \sin \frac{\theta}{2}, \gamma \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (3.11)$$

とするとき,

$$P' = RPQ = (0; s, t, u) \quad (3.12)$$

で与えられる. ただし, 四元数の積は, 2つの四元数を $A_1 : (f_1; a_1, b_1, c_1)$ と $A_2 : (f_2; a_2, b_2, c_2)$ とするとき,

$$\begin{aligned} A_1 A_2 &= (f_3; a_3, b_3, c_3), \\ f_3 &= f_1 f_2 - (a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2), \\ a_3 &= f_1 a_2 + f_2 a_1 + b_1 c_2 - c_1 b_2, \\ b_3 &= f_1 b_2 + f_2 b_1 + c_1 a_2 - a_1 c_2, \\ c_3 &= f_1 c_2 + f_2 c_1 + a_1 b_2 - b_1 a_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

と定義されている.

前提条件(i)により, 可動子に配置された永久磁石の初期位置は既知であるから, 回転軸の方向 (α, β, γ) (ただし, $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$) と回転角速度 ω を与えたときの, 時間きざみ幅 Δt 後, すなわち, 回転軸 (α, β, γ) の周りに回転角 $\omega \Delta t$ だけ回転した後の可動子の姿勢 (各々の永久磁石の位置) が, 四元数を用いて(3.12)式により求まる.

この目標姿勢に可動子を回転させるために, 各永久磁石の目標位置の周りの電磁石を図 3.5 に示すように励磁する. すなわち, 永久磁石の目標位置からの距離が R_1 以内の範囲にある電磁石に対しては永久磁石に引力を及ぼす極 (S極) に励磁し, それ以外の電磁石に対しては斥力を及ぼす極 (N極) に励磁する.

この励磁方法によって, 各永久磁石には目標位置に留まるように電磁力が働き, 可動子全体の姿勢が制御される. ただし, この制御方法が有効に働くためには, 永久磁石の目標位置が現在位置と近いことが必要となる. また, R_1 が大きすぎても小さすぎても, 可動子の姿勢変化が目標姿勢変化に追いつかない脱調現象が起こり易くなる. 引力を与えるように励磁される電磁石の範囲 R_1 と, 脱調の発生する最大回転角速度や可動子の姿勢の精度との関係は, 3.6節で述べる球面モータのシミュレータを用いて評価されている.

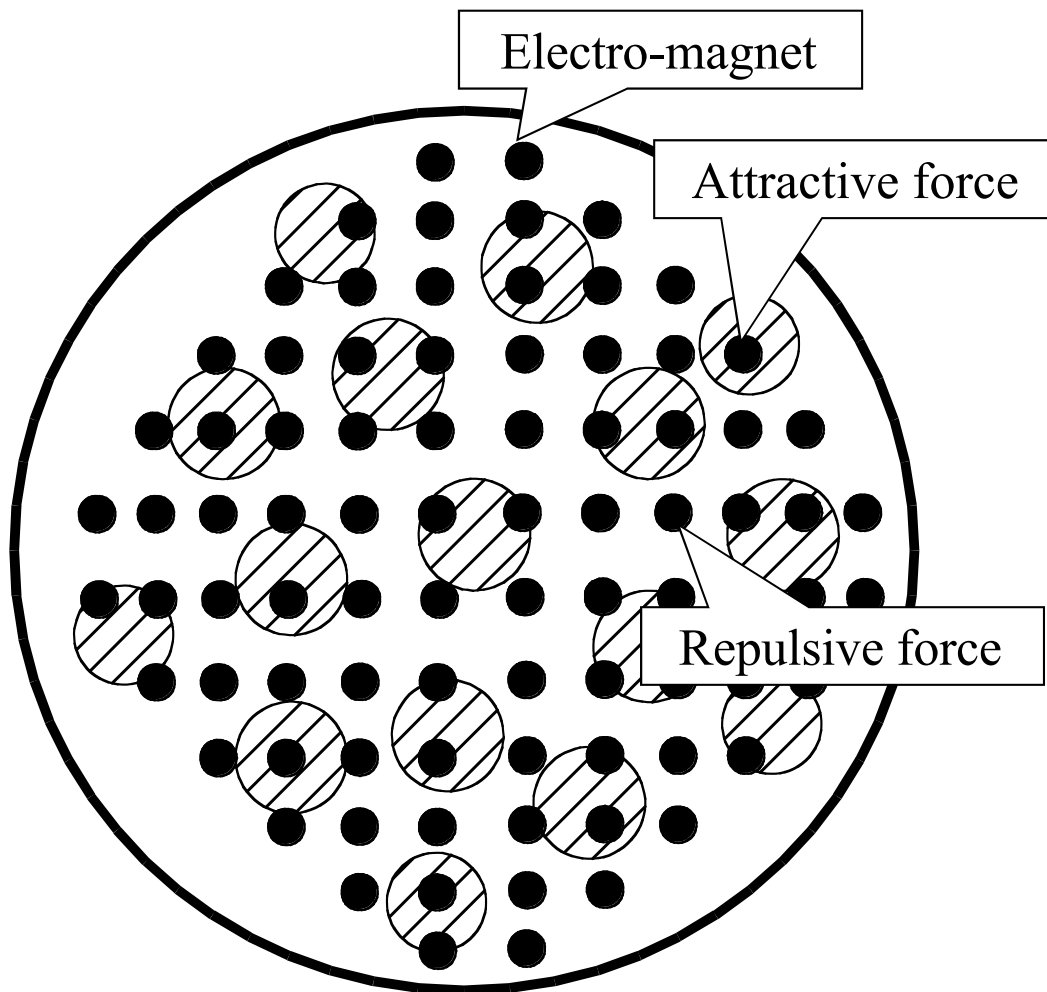


図 3.5 電磁石の励磁石方法

3.6. 球面モータのシミュレータ

3.6.1. 目的と操作画面

固定子に配置した電磁石の励磁方法や励磁パターンの検討，また，球面モータの設計や回転性能の評価のために，球面モータのシミュレータが，Windows XP 上で Visual C++を用いて実装されている．

シミュレータの操作画面例を図 3.6に示す．操作画面においては，可動子の永久磁石や固定子の電磁石の位置，また，可動子の姿勢が三次元表示されている．図 3.6 に

において、塗りつぶされた球で表示されているのが永久磁石および電磁石であり、色の濃い球は、その時間での可動子の姿勢における永久磁石の位置を表している。また、可動子の姿勢は中央のワイヤースケッチで描かれた立方体により表している。見る角度や表示の拡大縮小は、マウス操作により変更できる。また、キーボード操作により電磁石の励磁を操作して、永久磁石群を回転させることができる。なお、このシミュレータにおける可動子の目標姿勢の生成部と固定子の電磁石の励磁パターンの発生部は、試作機の電磁石励磁制御プログラムとして用いている。

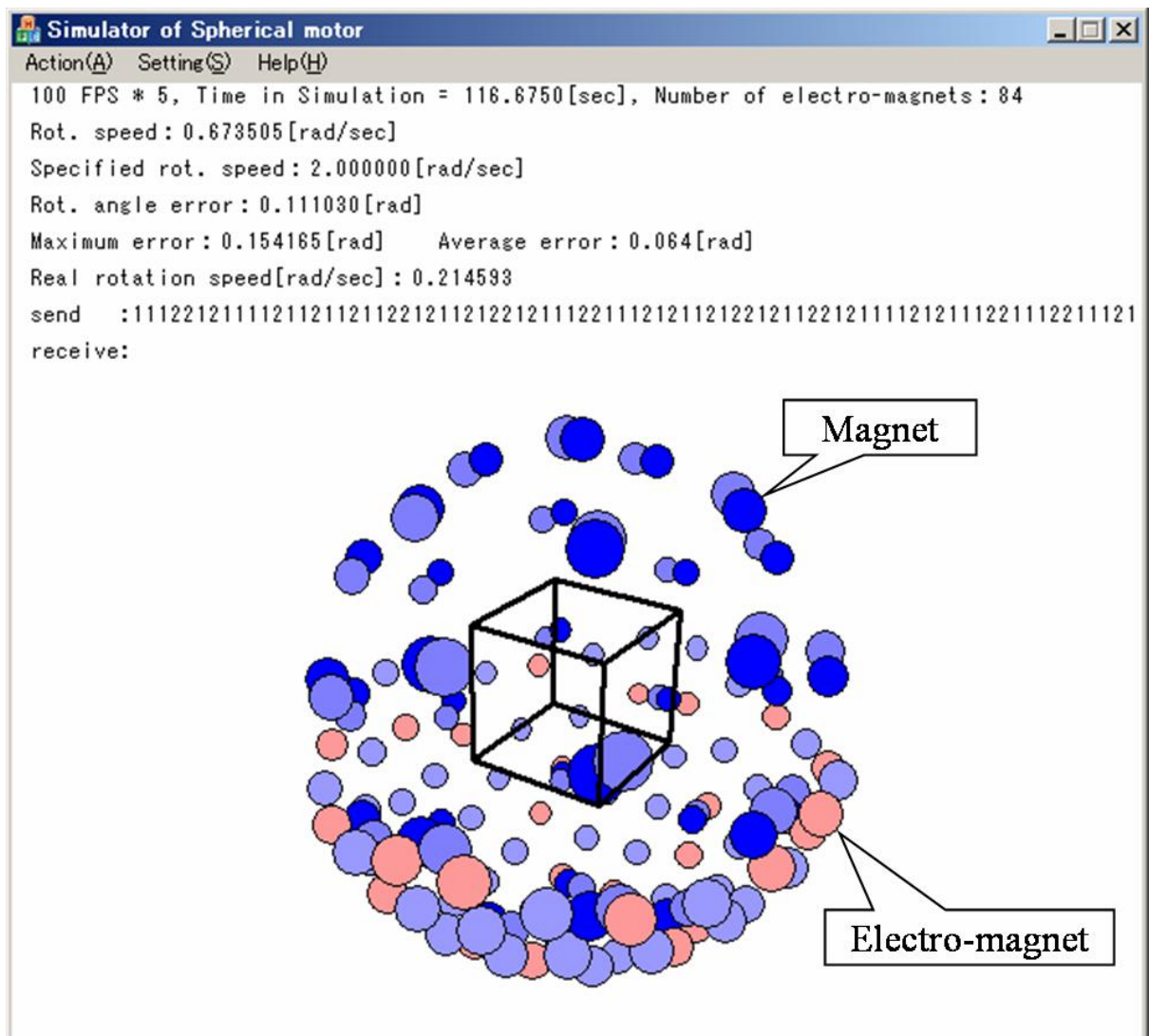


図 3.6 球面モータのシミュレータの画面例

3.6.2. 計算モデル

シミュレータにおいては、永久磁石や電磁石を全て点磁荷と近似している。また、可動子の中心を原点とする直交座標系により座標を表す。なお、固定子と可動子の間隔を小さくした場合には近似の誤差が大きくなることが予想されるが、試作した球面モータのサイズ（円筒形の永久磁石と電磁石鉄心の底面の半径は、それぞれ、 3.0×10^{-3} [m]、 2.6×10^{-3} [m]）や回転速度では近似誤差はあまり大きくないことが確認されている。

永久磁石 i と電磁石 j の磁荷をそれぞれ M_i^P および M_j^E とするとき、永久磁石 i に働く電磁石 j によるクーロン力 F_{ij} は、

$$F_{ij} = \frac{M_i^P \cdot M_j^E}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^3} \quad (3.14)$$

で与えられる。ここで、 \mathbf{r}_{ij} は永久磁石 i に対する電磁石 j の位置ベクトルであり、 μ_0 は真空の透磁率である。従って、可動子に働くクーロン力によるモーメント積 \mathbf{M}_C は、

$$\mathbf{M}_C = \sum_{i,j} (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{ij}) \quad (3.15)$$

で求められる。ここで、 \mathbf{r}_i は永久磁石 i の位置ベクトルである。

また、可動子は試作機では 8 本の支持棒により支持されているが、図 3.7 に示すように、シミュレータでは可動子に働く合力方向の 1 点 \mathbf{r} で支持されているものと近似されている。支持点での摩擦力の大きさ F_{fr} は、可動子の質量を M^G 、重力加速度を \mathbf{g} とするとき、

$$F_{fr} = \left| \mu \left(M^G \mathbf{g} + \sum_{i,j} \mathbf{F}_{ij} \right) \cdot \frac{-\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \right| \quad (3.16)$$

で求められる。なお、摩擦力の方向は、図 3.7 に示すように、可動子の支持点 \mathbf{r} において回転方向と逆向きとしている。摩擦力によるモーメント積の減少を考慮すると、可動子に働くトータルのモーメント積 \mathbf{M}_T は、

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_C - F_{fr} \cdot \mathbf{r} \cdot \frac{\mathbf{M}_C}{|\mathbf{M}_C|} \quad (3.17)$$

となる.

したがって, 可動子の角加速度 a は,

$$a = \frac{M_T}{I} \quad (3.18)$$

で求められる. ここで, I は可動子の慣性モーメントであり, 可動子の質量 M^G が半径 r_1 と r_2 ($r_1 < r_2$) の間に均一に分布しているとして, 以下のようにして求めることができる.

可動子の半径 r_1 と r_2 ($r_1 < r_2$) の間の密度 q は

$$q = \frac{3M^G}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad (3.19)$$

で与えられる. また, 慣性モーメント I は, 密度 q と半径 r_1 , r_2 を用いて

$$I = \frac{2}{5} \left(\frac{4}{3} \pi r_2^3 q \right) r_2^2 - \frac{2}{5} \left(\frac{4}{3} \pi r_1^3 q \right) r_1^2 \quad (3.20)$$

と表される. したがって, 式 (3.20) に式 (3.19) を代入して,

$$I = \frac{2M^G(r_2^5 - r_1^5)}{5(r_2^3 - r_1^3)} \quad (3.21)$$

となる.

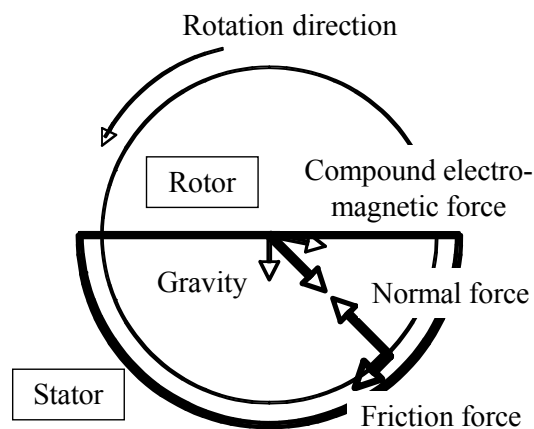


図 3.7 回転子と固定子間の摩擦力の計算モデル

3.6.3. 数値積分

シミュレータにおける数値積分は、タイムステップ Δt を 10 [mS] と小さくとっていることから、回転角速度 $\mathbf{w}_{t+\Delta t}$ は、

$$\mathbf{w}_{t+\Delta t} = \mathbf{w}_t + \mathbf{a}_t \cdot \Delta t \quad (3.22)$$

で近似計算されている。そして、回転角速度 \mathbf{w}_t の方向から回転軸の方向を求め、回転角 $|\mathbf{w}_t \Delta t|$ だけ回転した後の姿勢 $P_{t+\Delta t}$ は、式(3.10)～(3.12)を用いて

$$P_{t+\Delta t} = (0, x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t}, z_{t+\Delta t}) \quad (3.23)$$

と計算されている。

3.7. 球面モータの性能

3.7.1. 全方位への回転

球面モータが3.5節で述べた制御方法で全方位に回転するかどうかを確認することであり、球面モータの姿勢を定量的に評価するのではなく、球面モータの表面に小さな色テープを貼付けて回転の様子を撮影したビデオにより検討されている。

撮影したビデオ映像の連続コマの一部を図 3.8 に示す。可動子表面の色テープの移動から、可動子が様々な方向に回転している様子がわかる。①から②の最初の3コマまでは、図の白い矢印に対して垂直方向に回転している。その後、固定子の上面にほぼ平行な回転面で上から見て時計回りに回転している。④の最初のコマからは、斜めに手前から奥に数コマ回転し、その後、再び上から見て時計回りに回転している。



図 3.8 回転子の回転の様子

3.7.2. 回転角速度とトルクの関係

図 3.9に示すように、一方向に負荷がかかるように重りをつけ、重りの質量をパラメータとして、その負荷において球面モータを停止状態から反対側へ目標回転角速度で脱調せずに回転するように電磁石を励磁し、最大の目標回転角速度が求められている。

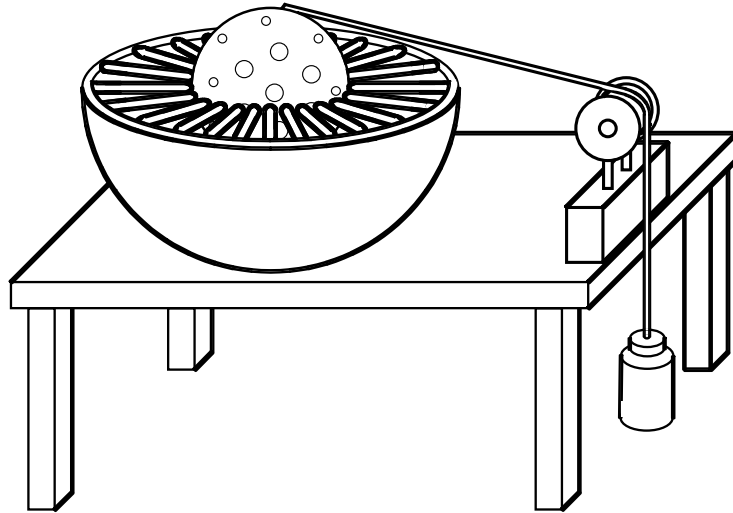


図 3.9 トルクを測定する方法

回転角速度とトルクの関係は図 3.10 のようになっている。図から、最大トルクは $0.06 \text{ [N}\cdot\text{m]}$ であり、最大回転角速度は 6.5 [rad/sec] であることがわかる。

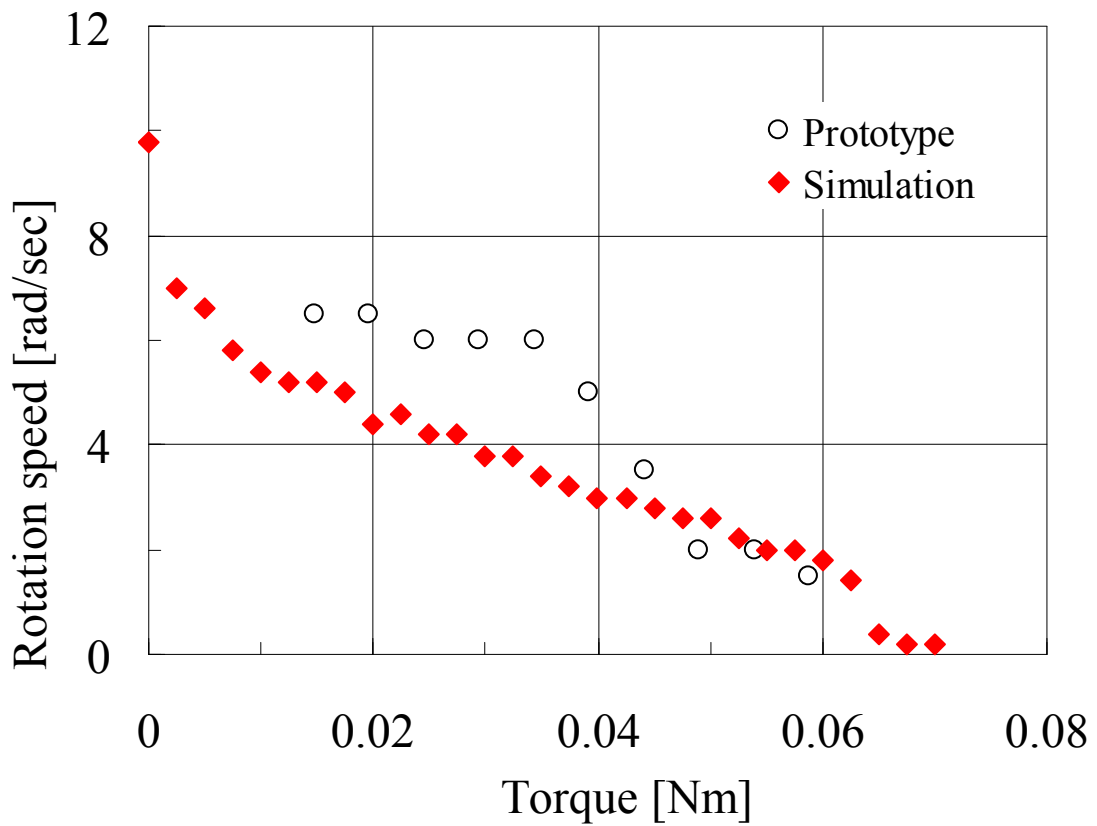


図 3.10 トルクと回転速度の関係

図 3.10には、トルクの大きな範囲で実験カーブに合うように、3.6節で述べたシミュレータのいくつかのパラメータを調節し、シミュレータを用いて求めた回転角速度とトルクの関係も示されている。シミュレータで用いたパラメータ値を表 3.1 に示す。これらのパラメータのうち、可動子の質量や半径、可動子と固定子間の距離、および、電磁石の個数は、試作機での値が用いられている。また、慣性モーメントは、可動子の質量が可動子表面から 1.0×10^{-3} [m]の深さで均一に分布しているものとして、式 (3.21)により求められている。可動子に配置した永久磁石と電磁石の磁荷の設計値は、それぞれ、 1.4×10^{-5} [Wb]、および、 8.9×10^{-5} [Wb]であるが、トルクの大きな範囲で実験カーブに合うように、それぞれ、1.3 倍の値とされている。また、摩擦係数についても、実験カーブに合うように調節して表の値が用いられている。トルクが小さい範囲では、回転角速度はシミュレーション結果の方が実験結果より低い値となっている。このように、シミュレーション結果が実験結果と異なるのは、固定子と可動子間での摩擦の計算方法が実際の支持構造と異なっていることや、慣性モーメントの計算に際して可動子質量が表面からある深さに均一に分布していると近似したことが考えられている。

表 3.1 シミュレーションにおけるパラメータ値

Parameter	Value
Magnetic charge of magnet [Wb]	1.9×10^{-5}
Magnetic charge of electro-magnet [Wb]	1.2×10^{-4}
Mass of rotor [kg]	7.5×10^{-2}
Radius of rotor [m]	5.0×10^{-2}
Inertia of rotor [N·m]	1.2×10^{-3}
Distance between rotor and stator [m]	5.0×10^{-3}
Friction coefficient [-]	0.2
Number of electro-magnets [-]	84
Time step in numerical simulation [s]	1.0×10^{-2}

3.7.3. 励磁範囲と回転速度や回転方向誤差の関係

パラメータ調節したシミュレータを用いて、引力を与えるように励磁される電磁石の範囲 R_1 (試作機では 0.012 [m]) と、脱調が発生する回転角速度や回転方向の誤差の関係が、試作機と同じ電磁石数の球面モータに対して検討されている。ここでは、回転方向の誤差の検討では、ランダムな回転方向への 0.2 [rad] ずつの回転を 20 回させ、その姿勢に可動子が移動して停止した時の目標値との誤差が求められている。

脱調が発生する回転角速度と R_1 の関係を図 3.11 に、回転方向の誤差と R_1 の関係を図 3.12 に示す。図 3.11 では、回転子に与えるトルクを 0.01, 0.03, および, 0.05 [N m] に設定している。図 3.11 からわかるように、 R_1 が 0.009 から 0.016 [m] の範囲では脱調せずに回転することができるが、回転子に与えるトルク (図 3.9 の実験の負荷に対応) が大きくなると脱調せずに回転する最大回転速度が小さくなっている。そして、この範囲以外では脱調により回転できない。また、図 3.12 から、回転方向誤差は、 R_1 が 0.009 から 0.013 [m] の範囲ではほぼ一定であり、平均誤差は 0.05 [rad] (3 [°]) 以下に抑えられていることがわかる。

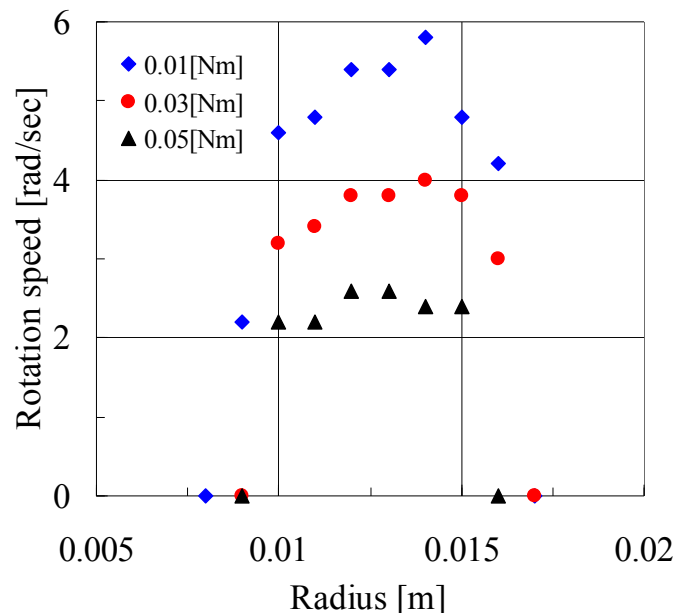


図 3.11 最大回転速度と引力が発生するように励磁される電磁石の領域の半径との関係

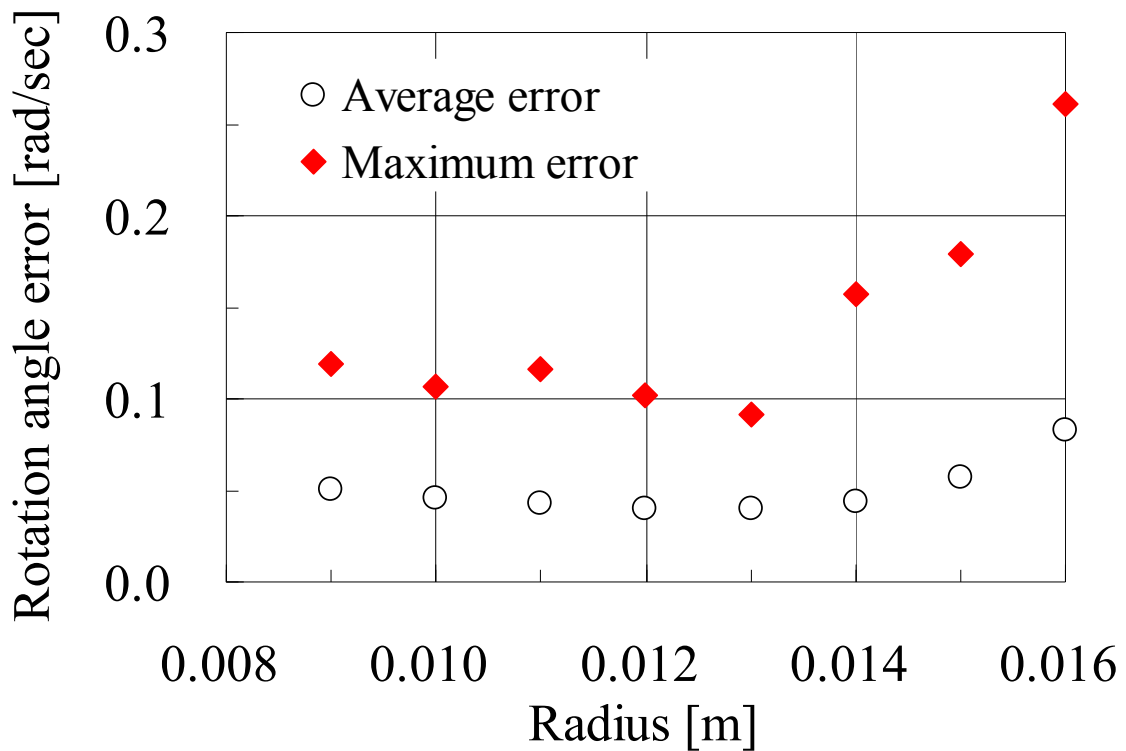


図 3.12 回転角度誤差と引力を発生するように励磁される電磁石の領域の半径との関係

3.7.4. 電磁石の数と回転性能との関係

パラメータ調節したシミュレータを用いて、固定子に配置する電磁石の数を変化させた場合の、(a)回転角速度とトルクの関係と、(b)回転方向の誤差が検討されている。ここで、回転角速度とトルクの関係は3.7.2節と同じ方法により、回転方向の誤差は3.7.3節と同じ方法により求められている。

図 3.13 に電磁石数を変化させた場合の、回転角速度とトルクとの関係を示す。電磁石の個数を多くすると、最大トルクや最大角速度がほぼ比例して大きくなることがわかる。

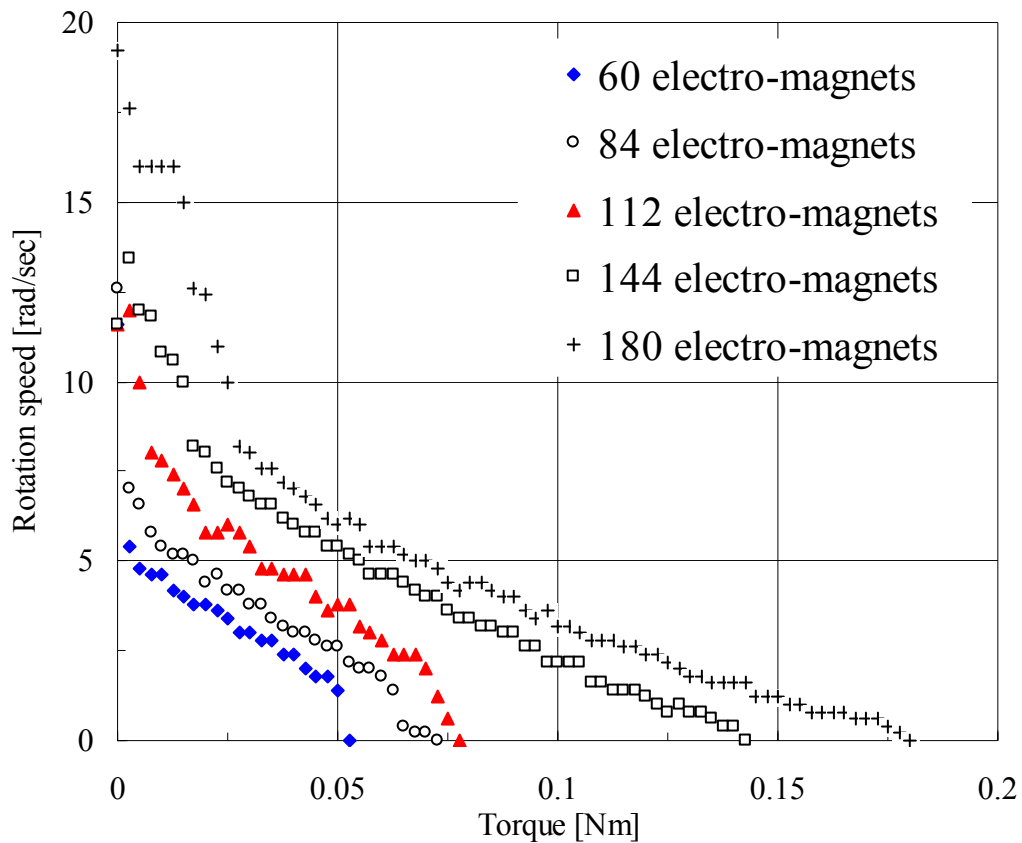


図 3.13 固定子の電磁石数を変化させた時のトルクと回転速度との関係

また、図 3.14 に電磁石数と回転方向誤差との関係を示す。図から電磁石数の増加によって回転方向誤差が反比例的に減少することがわかる。なお、電磁石を 60, 84, 112, 144, および, 180 個配置した場合の電磁石間隔の最小値は, それぞれ, 2.9×10^{-1} , 2.4×10^{-1} , 2.1×10^{-1} , 1.8×10^{-1} , および, 1.7×10^{-1} [rad] であることから, 電磁石数を 84 個以上配置すれば, 回転の最大誤差は電磁石間隔の最小値の半分程度以下に, 平均誤差は数度以下にすることができることがわかる。

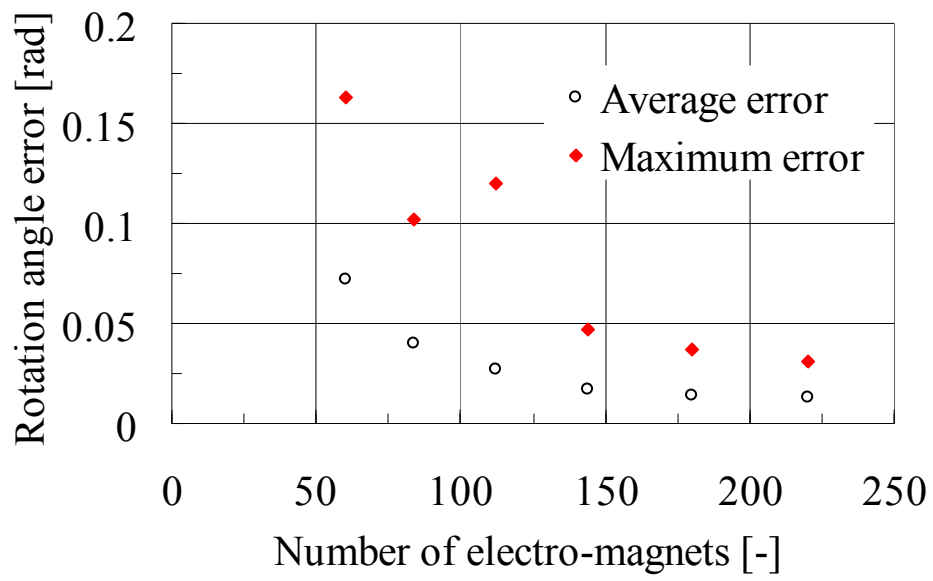


図 3.14 回転角度誤差と固定子の電磁石数との関係

第4章 球面ステッピングモータ駆動 の攪拌器

開発した球面ステッピングモータの構造上の特徴は、回転子が中空であることである。そこで本章では、まず球面ステッピングモータの応用として、様々な方向への回転による攪拌器を考え試作機を作成した。試作機では、回転子は二重球殻とし、内側球殻の内部に混合液を封入する構造とした。そして、短い時間で回転方向を様々な方向に変化させながら液体を攪拌する攪拌方法の攪拌能力を実験的に検討した。

4.1. 開発背景

攪拌は流体をかき混ぜる操作に対する呼称である。流体が高度に粘稠な場合は、捏和混練と呼ぶ。また、粉体に対する攪拌作業は混ぜ合わせとも呼ばれる。用途に応じて様々な攪拌器が開発されている。工場には単に棒・板・プロペラ状の攪拌子を槽内で一定速度・一方向に回転させるものが多いが、容器を各方向へ回転させるものもある。また、化学実験や細胞培養実験など、実験室規模で粘性がほとんどない液体を攪拌する場合、磁石を封入しテフロン等でコーティングした攪拌子を容器の外部から回転する磁界で動力を伝達するマグネチックスターラーと呼ばれる装置も存在する。

高速・多方向の回転は攪拌効果を大きく左右する。株式会社シンキーが開発した自転・公転ミキサーは、高速の自転・公転で生じた遠心力が押圧力として容器中の材料に対して働き、渦状の上下対流が生じる。この上下対流が連続的に発生することにより、材料同士が混合され、均一に分散する。対称な機構が用いるため、高速回転が可能、高粘度材料の攪拌効果は大きい。しかしながら、容器の形状によって対流しにくいところがある。一方、株式会社セイワ技研が開発した混合・攪拌機は、2自由度を組み合わせ容器を回転ながら、回転軸の向きを変える。しかしながら、一般的なモータを用いるため、全ての方向への回転はできない。また、構造が対称ではないため、回

転速度が低い。

また、材料創製の分野においては、重力が一方向に働くことによる影響を緩和して、均質な材料を作ったり大きな単結晶を作成したりするために、様々な方向に回転することが求められている。例えば、液晶テレビ等で広く使われているオルトシリケート蛍光体には、密度 5g/cm^3 、平均粒子径 15 ミクロンで、1-30 ミクロン程度の粒度分布幅を持つものがあり、これらを低粘度のシリコーン樹脂中に均一分散させて、LED チップの封止剤として使用されている。また、用途の拡大により素子構造にも進化がみられ、蛍光体粒子が大型化する傾向や数種の蛍光体を併用する試みなどもある。

しかしながら、攪拌器に用いられるモータは 1 自由度のものであり、多自由度の回転を実現するには複数のモータを組み合わせなければならない。また、対称な機構ではないため、高速の回転はできない。このため、近年、多方向・高速回転ができる球面モータや球型機構の研究が盛んに行われている。一般的なモータに対して、球面モータは

- (1) 3 自由度を持つために、システム構築において必要なモータの個数を軽減して小型化が可能である、
- (2) 各自由度の回転中心が一致することから、制御の簡単化により高速化を実現できる、また、
- (3) 組み付け誤差や難メンテナンス化による超高精度化の困難さが解消される

という特徴を持つ^{[4][5]}。

材料創製の分野においては、重力が一方向に働くことによる影響を緩和して、均質な混合液を作ったり大きな単結晶を作成したりするために、様々な方向に回転することが求められている。この要求に対して、球面モータは全ての方向に瞬時に回転方向を変化させることができることから、攪拌器への応用が期待されている。

そこで、本研究では、瞬時に回転方向を変化させることが可能な球面モータ機構^{[7][8]}を応用して、攪拌器を開発した。以下では、開発した攪拌器の構造、回転駆動方法、および、攪拌性能について述べる。

4.2. 球面モータ駆動の攪拌器の構造と駆動方法

4.2.1. 球面モータ駆動の攪拌器の全体構成

開発した球面モータ駆動の攪拌器の外観を図 4.1 に示す。図において、右側が球面モータ本体であり、永久磁石を配置した回転子と電磁石を配置した固定子から構成されている。また、左上は電源、左下は球面モータの電磁石の駆動回路である。なお、写真には写っていないが、固定子の電磁石の励磁パターンを生成するために、制御用PCがある。

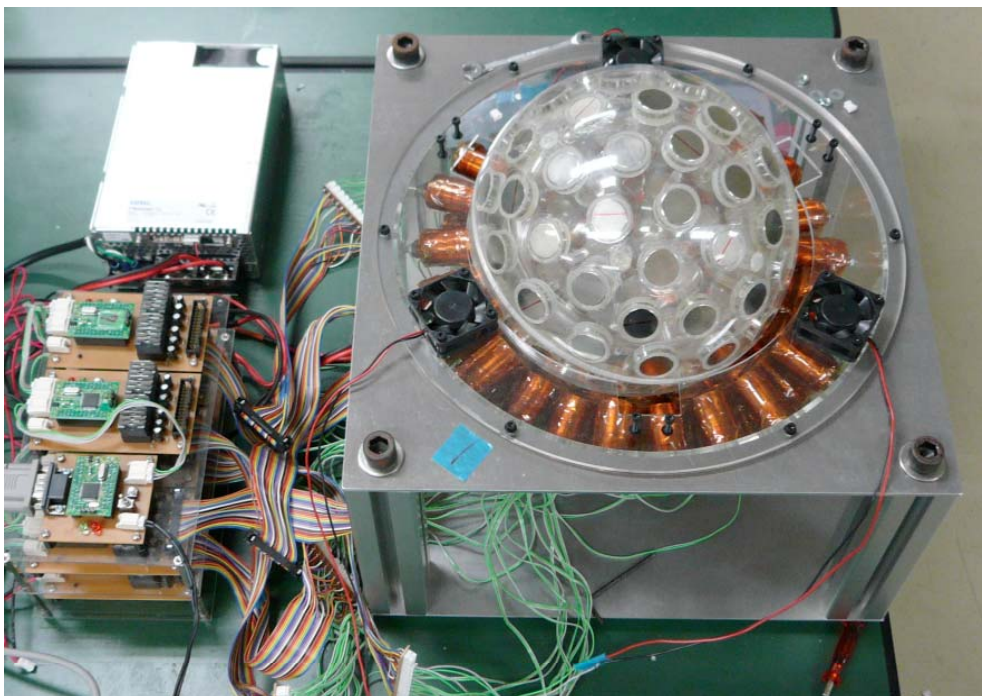


図 4.1 球面ステッピングモータ駆動の攪拌器の外観

4.2.2. 可動子

球状の可動子は外側球殻と内側球殻を同心に配置して構成している。どちらの球殻もアクリルで作成した。図 4.2 に外側球殻の上半球殻を取り除いた可動子の外観を示す。外側球殻と内側球殻との間隔は 22 [mm] である。

外側球殻の外直径は 200 [mm] であり、厚みは 3 [mm] である。外側球殻は 2 つの半球殻をネジ止めして構成している。外側球殻の内面には、直径 20 [mm]、厚さ 5 [mm] の

ネオジム磁石（磁力 335 [mT]）を 91 個配置している．その配置方法を図 4.3 に示す．外接円が同じとなる正十二面体と正二十面体を双対の位置関係に組み合わせて，その頂点（合計 32 個）にネオジム磁石を外側がN極となるように配置する．そして，それらの隣接する 3 つの頂点の重心に，外側がS極となるようにネオジム磁石を配置する．ただし，そのうちの 1 カ所については，内側球殻にある液体を入れるための蓋のスペース確保のために，ネオジム磁石は配置していない．従って，可動子に配置されるネオジム磁石は合計 91 個となる．

一方，内側球殻の外直径は 150 [mm]，厚さは 3 [mm] である．その内面には，攪拌効果をもとめるために，図 4.2 からわかるように，長さ 15 [mm]，直径 5 [mm] のアクリルの丸棒を 31 本ほぼ均等に取り付けている．また，液体の入れるための蓋（内直径 20 [mm]）を取り付けている．

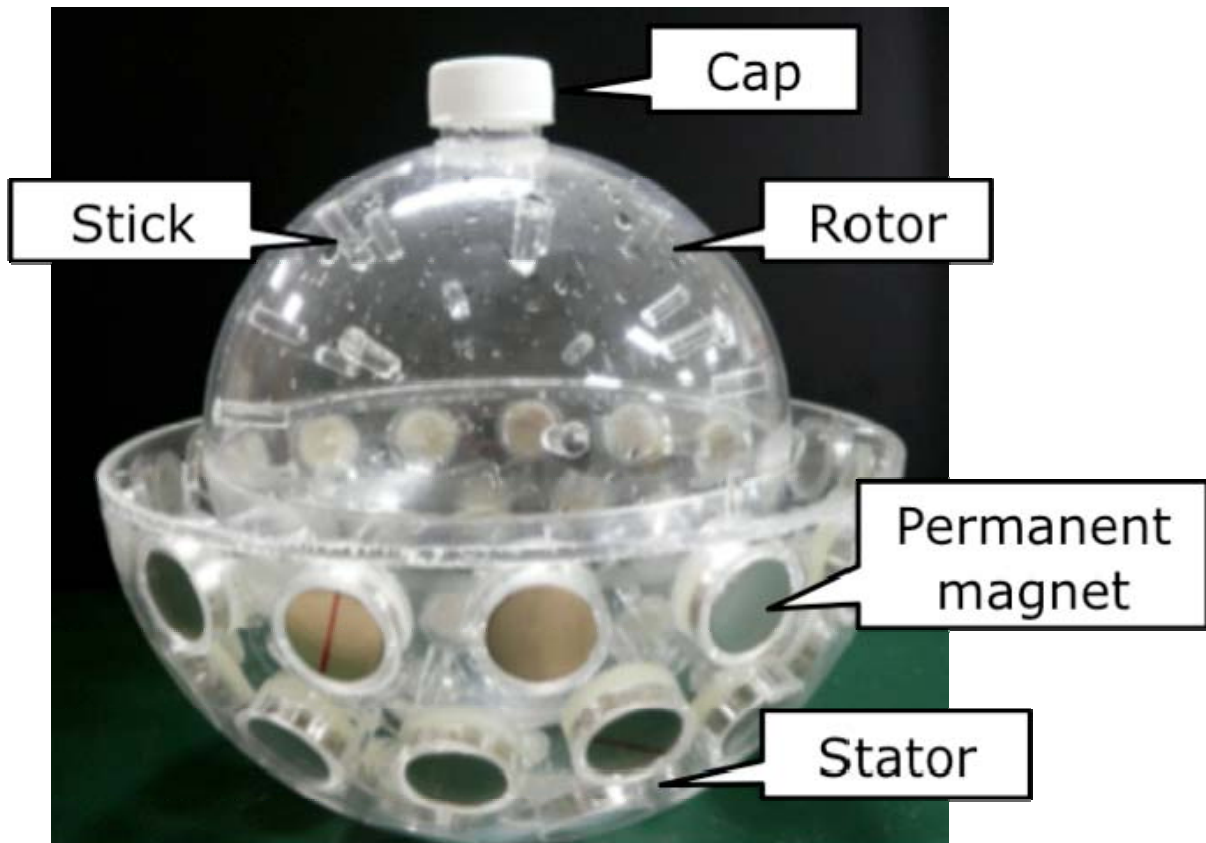


図 4.2 可動子の外球殻と内球殻の外観

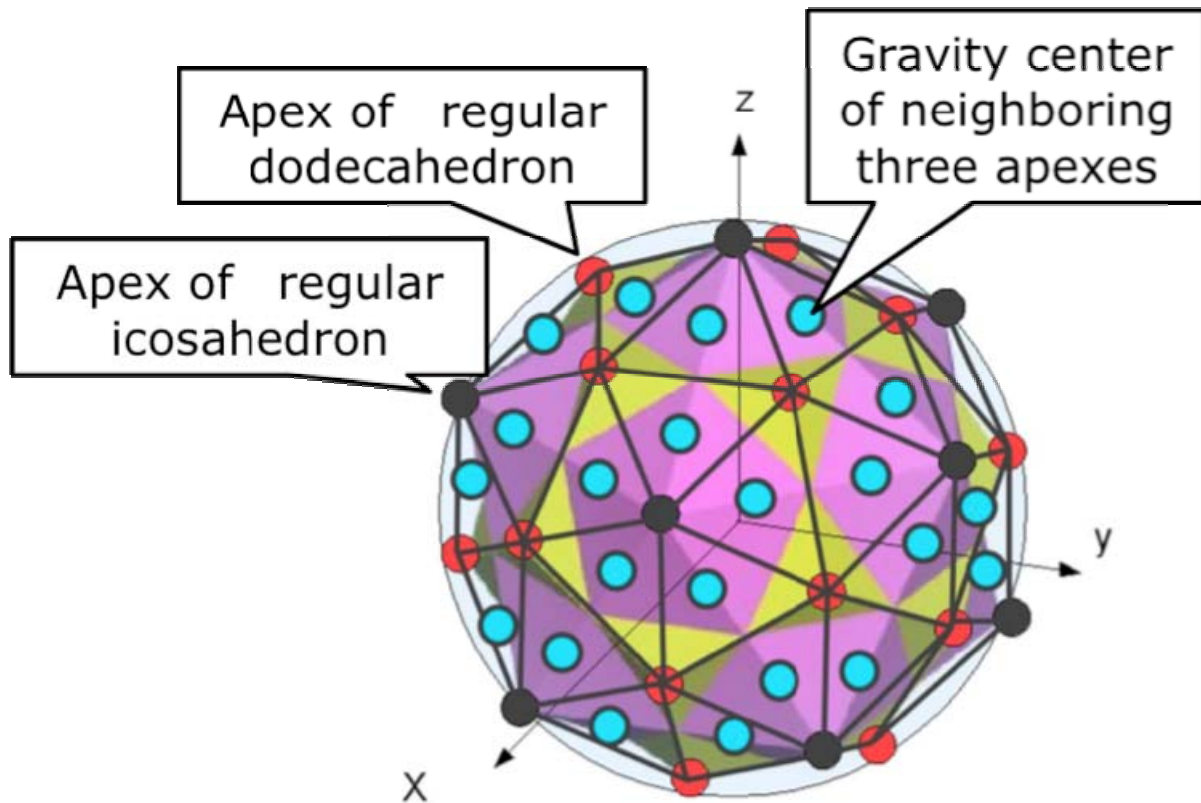


図 4.3 外球殻への永久磁石の配置

4.2.3. 固定子

固定子は半球状であり，図 4.4に示すように，80 個の電磁石が配置されている．電磁石は，芯直径 12 [mm]の鉄芯に，太さが 0.315 [mm]の銅線を 35 [mm]の巻部分長さに対して 1714 回巻いて作成している．

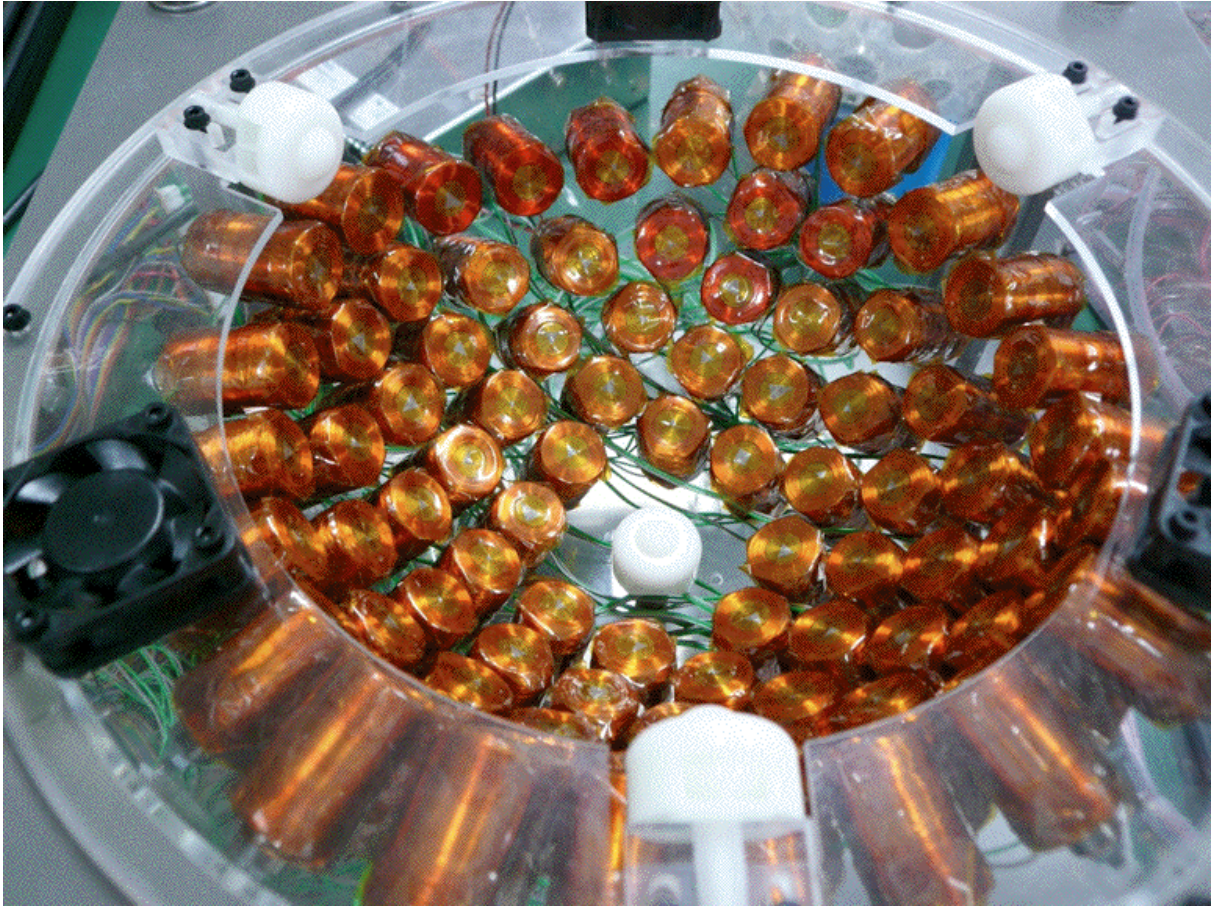


図 4.4 固定子の外観

電磁石の固定子への配置方法は、半球殻の固定子上面の円の中心を原点とし、その円を $x-y$ 平面に含む直交座標系 (z 軸は上側方向を正にとる) において、

$$x = R \sin\left(\frac{\pi}{12}i + \frac{\pi}{24}\right) \quad (4.1)$$

$$y = R \sin\left(\frac{\pi}{12}j + \frac{\pi}{24}\right) \quad (4.2)$$

$$z = -\sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} \quad (4.3)$$

の位置に電磁石の内側先端がくるように配置している。ただし、 R は固定子の内側半径であり、 i, j は以下の(4.4)、(4.5)および(4.6)式を満たす整数である。

$$-\frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{12}i + \frac{\pi}{24} \leq \frac{\pi}{2} \quad (4.4)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{12}j + \frac{\pi}{24} \leq \frac{\pi}{2} \quad (4.5)$$

$$R^2 - (x^2 + y^2) \geq 0 \quad (4.6)$$

また、回転子を小さな摩擦係数で固定子上の電磁石の先端から 5 [mm]の間隔で保持するために、図 4.4に示すように、固定子の底部の 1 カ所、側面の 3 カ所にボールキャスターを配置している。このため、底面のボールキャスターと重なる位置となる 4 カ所には電磁石を配置していない。電磁石が 4 個欠けることで、電磁石と永久磁石間の電磁力による回転トルクは回転方向に依存して多少異なることになるが、その影響は小さいと考えられる。

4.2.4. 駆動システム

固定子に配置した電磁石の励磁のために、電圧 12 [V]、最大出力電力 600 [W] のスイッチング電源（COSEL 製、型式 PBA600F-12）を用いた。また、電磁石の N 極あるいは S 極への励磁や非励磁を制御するための励磁回路を製作した。

電磁石の励磁パターンは、制御用 PC に実装された電磁石励磁制御プログラムにより計算される。制御用 PC が発生した励磁パターンに基づき、各々の電磁石はそれぞれモータドライバ素子により、電磁石を流れる電流（0.42[A]）の ON/OFF および方向が制御される。

球面モータは、短い時間きざみ幅で固定子の電磁石の励磁パターンを切り替えていくことにより、可動子の回転制御を行っている。ここでは、

- (i) 可動子の初期姿勢がわかっている、および、
- (ii) 可動子は励磁パターンの切り替えの時間きざみ幅の間に目標姿勢に到達する

ことを前提としている。

可動子における永久磁石の配置は幾何学的に決まっていることから、可動子の中心を原点とした直交座標系において、永久磁石のうちの 1 つの座標により可動子の姿勢を四元数により表すことができる。前提条件 (i)により、可動子に配置された永久磁石の初期位置は既知であるから、回転軸の方向 (α, β, γ) （ただし、 $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$ ）と回転角速度 ω を与えたときの、時間きざみ幅 Δt 後、すなわち、回転軸 (α, β, γ) の周りに回転角 $\omega \Delta t$ だけ回転した後の可動子の姿勢（各々の永久磁石の位置）は、四元数を用いて求めることができる。

この目標姿勢に可動子を回転させるために、各永久磁石の目標位置の周りの電磁石を、永久磁石の目標位置からの距離が R_1 以内の範囲にある電磁石に対しては永久磁石に引力を及ぼす極（S 極）に励磁し、それ以外の電磁石に対しては斥力を及ぼす極（N 極）に励磁する。

4.2.5. 回転性能

攪拌機能を持つ球面モータの回転性能を評価した。ここでは、内側球殻には液体を入れず、その代わりにひも付きの重りを、滑車を介してひもの先端を可動子頂部に水平に取り付けて、重りの質量を変化させた場合の脱調が発生しないで回転する最大回転角速度を計測した。ここで脱調とは、回転子に回転方向とは異なる方向に大きな力が働くことにより、制御用PCが予測した姿勢とは異なる姿勢となることにより、回転子の回転が継続できなくなった状態である。回転性能の評価結果を図 4.5 に示す。図より、最大回転速度は無負荷時の 8.87 [rad/s]、最大回転トルクは 1.18 [Nm] であることがわかる。なお、内側球殻がほぼ満水状態となる水 1.5 [kg] を内側球殻に封入した状態で回転することを確認している。

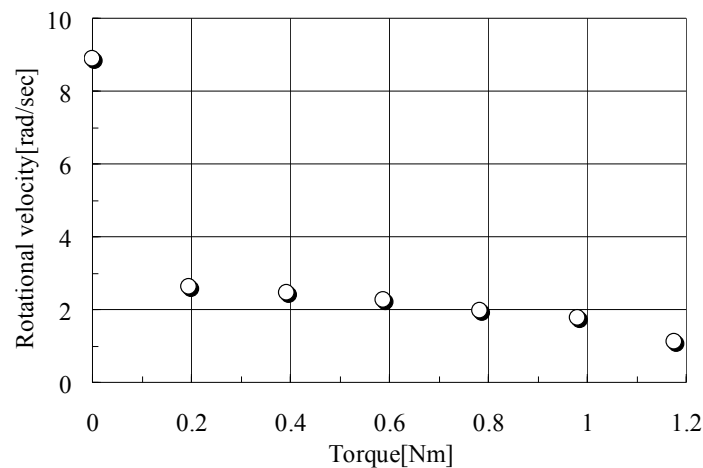


図 4.5 トルクと回転角速度との関係

4.3. 攪拌性能評価実験

4.3.1. 実験目的と方法

球面モータ駆動の攪拌器の攪拌能力は、食塩 50 [g]を水 200 [g]に入れた場合の、室温状態にて一定時間攪拌した後の食塩の濃度を計測することにより評価した。なお、食塩の濃度は図 4.6に示す食塩水濃度屈折計（アタゴ製，型式MASTER-S28 α ）により計測した。表 4.1には食塩水濃度計の仕様を示す。食塩水濃度計の測定精度は $\pm 0.2\text{g}/100\text{g}$ である。本研究で用いた球面モータはエネルギー利用効率が低く、電磁石で熱が発生する。これにより内側球殻内の液体の温度が時間とともに上昇する。食塩は水に対する溶解度の温度依存性が非常に小さいため、温度が変化する状況下で攪拌性能を簡便に評価するには適切な材料である。



図 4.6 食塩水濃度計 MASTER-S28 α

表 4.1 食塩水濃度計の仕様

測定範囲	食塩水濃度 0.0~28.0g/100g
自動温度補正	あり
最小目盛	食塩水濃度 0.2g/100g
測定精度	$\pm 0.2\text{g}/100\text{g}$ (10~30 $^{\circ}\text{C}$)
寸法・重量	3.2 \times 3.4 \times 20.3cm, 105g

球面モータの特長は、様々な方向への回転ができることと、瞬時に回転方向を変化させることができることである。そこで、攪拌性能の評価では、回転の方向性や回転方向変化の攪拌能力との関係を調べた。すなわち、球面モータの座標系を、水平面を x - y 平面として図 4.7 のように定義し、

- (A) z 軸周りに一方向へ連続回転させる、
- (B) x 軸周りに一方向へ連続回転させる、
- (C) z および x 軸周りに 5 秒毎に交互に回転させる。
- (D) x 軸周りに時計回り、反時計回りに 5 秒毎に交互に回転させる。
- (E) ランダムな回転方向に 5 秒毎に変化させる

の 5 種類の攪拌方法について、攪拌能力を比較した。実験は、球面モータの回転角速度を 2.13 [rad/sec] と 5.34 [rad/sec] の 2 種類設定し、それぞれの攪拌方法に対して 3 回ずつ行った。1 回の実験は、

1. 回転子の内側球殻内を水で十分洗浄する、
2. 回転子の内側球殻内に水 200 [g] を入れ、食塩 50 [g] を静かに入れる、
3. 90 秒間で回転子をセットする、
4. 攪拌方法 A から E のいずれかで t 秒間攪拌する、
5. 攪拌停止 90 秒後の食塩水の濃度を計測する

ことを 1 バッチとして、攪拌時間 t を 0 秒から 10 秒ずつ 90 秒まで増加させる 10 バッチから構成した。ここで、攪拌を停止して 90 秒後に食塩水の濃度を計測しているのは、回転子の外側球殻を分解し攪拌された食塩水を食塩水濃度屈折計に入れるまでの時間を見込んでいるためである。

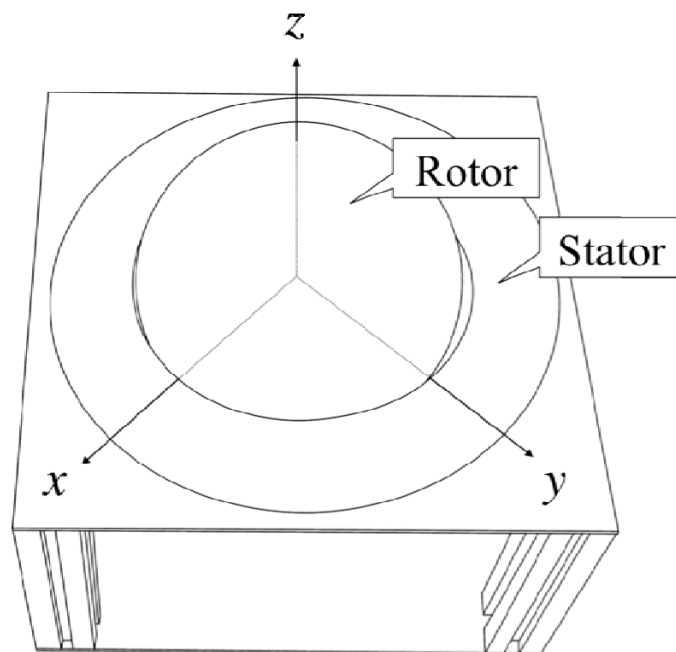


図 4.7 球面モータの座標系

4.3.2. 実験結果

球面モータの回転角速度は $2.13[\text{rad}/\text{sec}]$ の場合、各々の攪拌方法における、攪拌時間に対する食塩水濃度の 3 回ずつの実験での計測値を付録表 A.1～表 A.5 に示す。また、計測値の平均値と標準偏差を付録図 B.1～図 B.5 に示す。図 4.8 には、各方法の食塩水濃度の時間変化を示す。

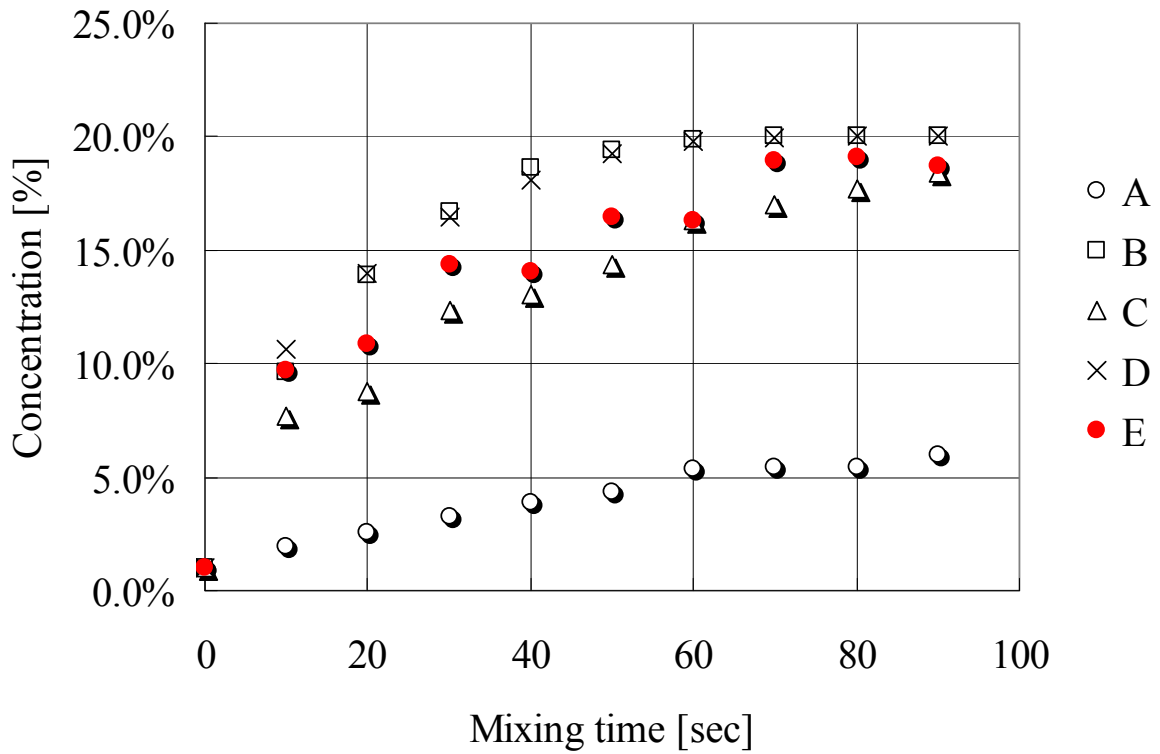


図 4.8 各攪拌方法による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])

また、球面モータの回転角速度は 5.34[rad/sec]の場合、各々の攪拌方法における、攪拌時間に対する食塩水濃度の3回ずつの実験での計測値を付録表A.6～表 A.10に示す。また、計測値の平均値と標準偏差を付録図B.6～図B.10に示す。図 4.9には、各方法の食塩水濃度の時間変化を示す。

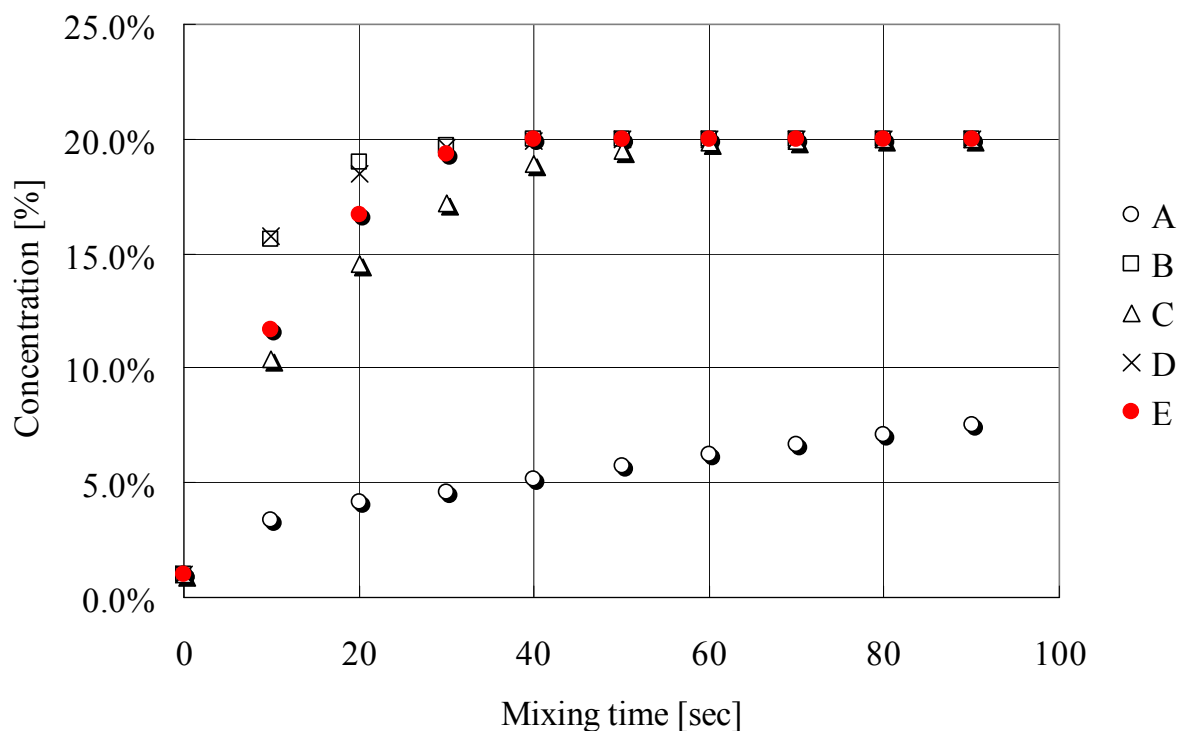


図 4.9 各攪拌方法による食塩濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])

図からわかるように、 x 軸周り（水平軸周り）に一方向へ連続回転した場合（攪拌方法 B）が最も攪拌性能が良く、 x 軸周りに時計回りと反時計回りの 5 秒毎の交互回転（攪拌方法 D）、5 秒毎に回転方向をランダムに変化させた回転（攪拌方法 E）、 z および x 軸周りに 5 秒毎に交互回転（攪拌方法 C）の順に攪拌性能が徐々に悪くなっていき、 z 軸周り（鉛直軸周り）に一方向へ連続回転した場合（攪拌方法 A）は攪拌性能が大きく悪い結果となった。また、各々の攪拌方法において、回転角速度の大きい方が攪拌性能は良くなっている。

4.3.3. 考察

攪拌時にまだ溶けていない食塩の様子を観察すると、 z 軸周り（鉛直軸周り）の回転では回転子の内側球殻の底に溜まっていたが、 x 軸周り（水平軸周り）の回転では内側球殻に拡散する傾向にあった。このことから、食塩粒子と水との接触面積の大きさの差が攪拌性能に影響していることがわかる。また、回転角速度の大きい方が良い攪

拌性能となっていることは、水が食塩粒子を巻き込む時の相対速度が大きいためである。回転方向が変化する時に働く加速度による食塩粒子の拡散効果の観点では、回転方向を5秒毎に変化させる攪拌方法D (x 軸周りに時計回りと反時計回りの5秒毎の交互回転)の方が攪拌方法B (x 軸周りに一方向へ連続回転)の方よりも有利とも考えられるが、回転方向切り替え時に水や食塩粒子が一瞬止まったように見えることから、水が食塩粒子を巻き込む相対速度の点で不利であったことが影響していると考えられる。

回転方向をランダムに変化させた攪拌方法Eは、回転方向変化時の拡散効果の点で有利ではあるが、相対速度の点で不利であり、また、攪拌効果の少ない回転方向が鉛直軸に近い場合も多くあることから、攪拌方法BやDよりやや攪拌性能が劣る結果となったと考えられる。しかしながら、回転方向をランダムに変化させることにより、重力の影響を緩和することができることから、均質な材料の創成などの応用には、この程度の攪拌性能の低下は許容できると考えられる。

4.3.4. まとめ

本研究では、瞬時に回転方向を変化させることが可能な球面モータ機構を応用し、回転子を二重球殻として内側球殻に液体を入れることができるようにした攪拌器を開発した。回転トルクの計測実験により、攪拌器の回転駆動力が内側球殻を水で満たしても十分であることを確認した。また、水に食塩を溶かす攪拌性能評価実験により、回転方向をランダムに変化させる攪拌方法は、最も攪拌性能が高かった水平軸周りに連続回転させる攪拌方法に比べて、攪拌性能は多少低下するものの高い攪拌性能を示すことを確認した。これらの実験結果から、球面モータ駆動の攪拌器は、重力の影響を緩和した材料創製の分野への応用の見通しができたと結論づけられる。

試作した球面モータ駆動の攪拌器は、回転子に永久磁石を91個、固定子に電磁石を80個配置しているが、回転角度誤差が数度あり回転も滑らかとは言えない。また、生物学での細胞培養においては、ある回転角度範囲内でゆりかごを揺らすような動揺が求められている。ステップ状の加速度は細胞組織にダメージを与えると予想されるため、永久磁石や電磁石の数を増加させるとともに、回転制御方法を拡張して滑らかな回転動作を実現させることが今後の課題の1つである。

第5章 球面ステッピングモータを用いたホロノミック移動台車と球面減速駆動方式

本章では，ホロノミックな移動台車への応用を考え，球面ステッピングモータを駆動輪とし，キャストをその周りに4つ配置した移動台車の試作機を製作した．球面モータでは一般に減速機がなく駆動トルクを制御することができない問題の解決を図るため，球面モータの回転軸を制御することにより移動台車の駆動トルクを増大させる方法を提案し，その有効性を実験的に評価した．

5.1. 研究背景

現在，ロボットの移動機構として，車輪型機構が広く用いられている．2輪独立駆動型，乗用車型（駆動輪＋操舵輪）などがその代表的なものである．これらのロボットは真横に移動できないため，目的位置に到達するためには時間をかけて切り返しを行う必要がある．狭い場所を通り抜ける際や，複数ロボットが同一物体を協調搬送する際には，この制約が大きな問題となる．このため，全方向移動ロボットの研究が盛んに行われている．あらゆる方向に移動・旋回できる機構として，車輪円周上に中心部が太く両端が細くなった円筒状あるいはリング状フリーローラを配置した車輪機構がよく用いられているもの^{[48]~[51]}である．また，車輪円周上に車軸に対して45度傾けて円筒状フリーローラを取り付けた車輪機構（メカナムホイール）^{[52][53]}や，車輪円周上にリング状フリーローラを取り付けたもの^[54]もある．車輪だけではなく，フリーローラ付きクローラ^[55]や，回転方向が異なる球状フリーローラを組み合わせた特殊形状のもの^{[56][57]}もある．これらの機構は，ある1方向のみ駆動力を発生することができ，

それと別の方向には，フリーローラが自由に回転することにより移動可能である．しかしながら，この機構では，小さな段差しか乗り越えることができない問題点を有する^[58]．また，車輪にステアリングを設置し，全方向移動を実現した機構^{[59]~[62]}もある．しかしながら，この機構は全方向移動を実現するため，2個以上の車輪が必要となる．ステアリング機構を加えて，アクチュエータ数が増加すると同時に制御が困難となる．

一方，球型の駆動機構により駆動される移動ロボットは，真横に移動できないような拘束条件がないため，あらゆる方向に移動，旋回できる性質（全方向性）を有する．つまり，いつでも任意な3自由度（平面X，Yおよび姿勢 ϕ ）の速度を発生することができるというホロノミック性を有する．このため，球面モータ^{[12]~[32]}や球型機構駆動する移動ロボット^{[63]~[70]}の研究が盛んに行われている．また，全方位回転可能な電磁石駆動の球面モータの研究，開発が進められている^{[71][8]}．また，研究の活発化に伴って球面モータの応用事例もロボット関節やレーザトラックなど多岐にわたるようになっている^{[31][71]}．しかしながら，球型の駆動機構には，歯車を用いた駆動トルクの増幅機構がなく，大きな駆動トルクを必要とする台車への応用は不利であるという問題を有する．

このような背景をふまえ，本研究では，全方位回転可能な球面モータを用いたホロノミック全方向移動台車を試作するとともに，駆動用球面モータの回転軸を傾けることにより，移動速度は減少するが駆動トルクを増大させることのできる手法を提案する．本論文では，その手法を「球面減速」と呼ぶ．そして，球面減速を用いた移動台車の走行性能を評価する．

本章では，まず球面モータと試作した移動台車を説明する．次に，球面減速について説明し，球面モータの回転軸の傾きと移動速度および駆動トルクの関係を導く．そして，試作した移動台車を用いた走行実験を述べ，その結果を考察する．

5.2. 球面ステッピングモータ

本研究で用いる球面モータ^{[7][8]}は、図 5.1に示すように、永久磁石が外向きをN極として 32 個配置された可動子、80 個の電磁石が配置された固定子から構成される。また、個々の電磁石を励磁するために、電源部、励磁制御回路、および、電磁石の励磁パターンを生成してそれを励磁制御回路に送信するパソコンから構成される球面モータ駆動部がある。

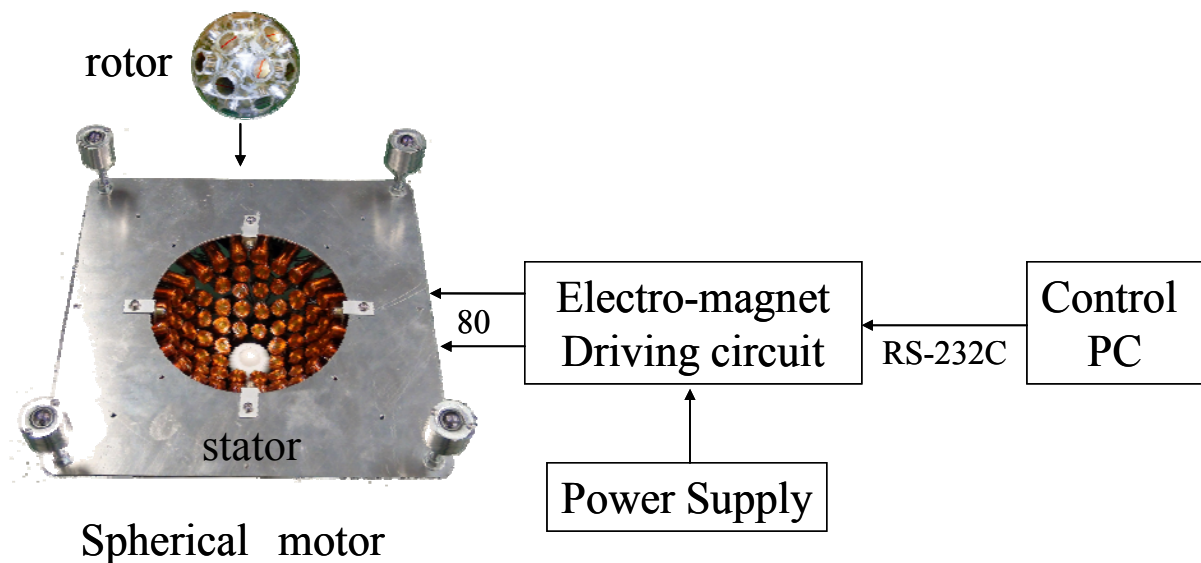


図 5.1 球面ステッピングモータの構成図

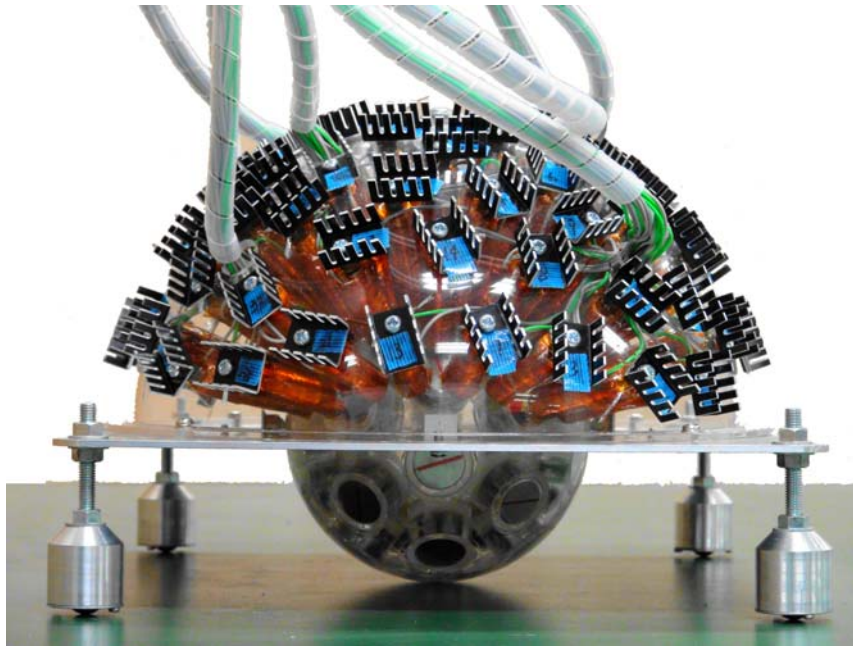
可動子に配置された永久磁石の初期位置が既知のとき、可動子を回転軸 ω の周りに回転速さ $|\omega|$ で回転させた場合の、微小時間きざみ幅 Δt 後、すなわち、回転軸 ω の周りに回転角 $|\omega|\Delta t$ だけ回転した後の可動子の姿勢（各々の永久磁石の位置）を求めることができる。本研究では、回転後の可動子の姿勢は四元数^[72]を用いて求めている。

この目標姿勢に可動子を回転させるために、各永久磁石の目標位置の周りの固定子の電磁石を3章の図 3.5 に示すように励磁する^{[7][8]}。図中「●」印は電磁石の位置を示し、ハッチングされた円は、球状可動子の永久磁石の目標位置を半球状の固定子上に投影した位置から距離 R_1 以内の範囲を表す。永久磁石の目標位置からの距離が R_1 以内の範囲にある電磁石に対しては永久磁石に引力を及ぼす極（S極）に励磁し、それ以外の電磁石に対しては斥力を及ぼす極（N極）に励磁する。

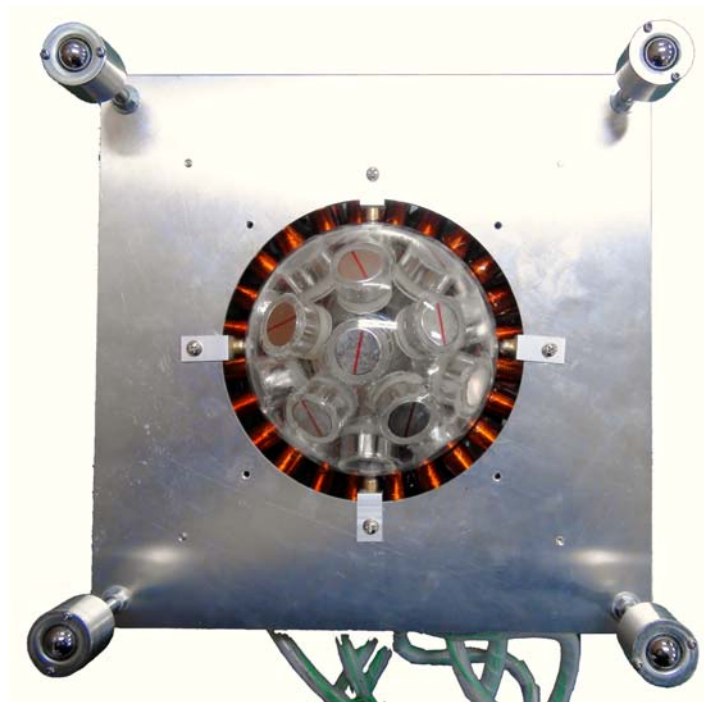
5.3. 球面ステッピングモータを用いた移動台車

前節で述べた球面モータを用いて製作した移動台車の試作機の外観を図 5.2に示す。球面モータを上下反転させ、固定子は球状可動子の上に載せている。移動台車は、縦横が $0.22[\text{m}] \times 0.22[\text{m}]$ で高さは $0.26[\text{m}]$ であり、球状可動子の半径は $0.05[\text{m}]$ である。移動台車の姿勢を保つために、ボールキャスターを先端に備えた足を四隅に取り付けている。また、電磁石の駆動回路やPCは固定台上に設置し、図 5.2 (a)の上部に見えるケーブルにより、球面モータと接続されている。このため、移動台車の可動範囲は $1[\text{m}]$ 程度となっている。移動台車の質量は $3.43[\text{kg}]$ であり、このうち球状可動子の質量は $0.63[\text{kg}]$ である。また、その上部に接続されたケーブルの質量は $0.41[\text{kg}]$ である。

ボールキャスターと床面の間の静止摩擦係数は、球状可動子を取り外した移動台車に滑車を介してペットボトルをぶら下げて、ペットボトルに入れる水の量を変化させて移動台車が動き出す水の量から測定し、 0.2702 を得た。また、球状可動子とケーブルを取り外した状態の移動台車に滑車を介してぶら下げたペットボトルの重力により、移動台車が一定距離 (0.54m) を移動する時間を計測して動摩擦係数を測定したところ、 0.2041 であった。一方、球状可動子と床面の間の静止摩擦係数は、ボールキャスターとケーブルを取り外し、球状回転子を固定子に固定した移動台車に滑車を介してペットボトルをぶら下げて、ペットボトルに入れる水の量を変化させて移動台車が動き出す水の量から測定し、 0.5093 を得た。



(a) Side view



(b) Bottom view

図 5.2 球面ステッピングモータを用いた移動台車の外観

5.4.2. 移動速度と回転角速度の関係

球面モータの可動子を回転軸 ${}^s\vec{\omega} = [{}^s\omega_x, {}^s\omega_y, {}^s\omega_z]^T$ 周りに回転速さ $|{}^s\vec{\omega}|$ で回転させた場合を考える。このとき、ロボット座標系原点 O_r の世界座標系における速度 ${}^w\vec{v}_{O_r}$ を求める。球面モータの可動子は、世界座標系の $X_w - Y_w$ 平面に接しながら滑ることなく動くことと仮定して、

$${}^w\vec{v}_{O_r} = [{}^w\dot{x}_{O_r}, {}^w\dot{y}_{O_r}, 0]^T \quad (5.1)$$

と表すことができる。

今、可動子の半径を R とし、点 A を $X_r - Y_r$ 平面上の $(\frac{{}^s\omega_x}{\omega_z}R, \frac{{}^s\omega_y}{\omega_z}R, 0)$ にとり、 $\angle O_r A O_s = \theta$ とする。

また、 O_r から AO_s に引いた垂線の足を B とし、球面モータ座標系における \vec{BO}_r と $\vec{O_sO_r}$ を、それぞれ、 ${}^s\vec{r}_1$, ${}^s\vec{R}$ とする。ここで、 $|{}^s\vec{R}| = R$ である。すると、 $|{}^s\vec{r}_1|$ は

$$|{}^s\vec{r}_1| = R \cos \theta = R \frac{\sqrt{{}^s\omega_x^2 + {}^s\omega_y^2}}{\sqrt{{}^s\omega_x^2 + {}^s\omega_y^2 + {}^s\omega_z^2}} \quad (5.2)$$

で計算される。また、 ${}^s\vec{R}$ は

$${}^s\vec{R} = [0, 0, R]^T \quad (5.3)$$

で与えられる。そして、 ${}^s\vec{r}_1 \perp {}^s\vec{\omega}$ から

$$|{}^s\vec{r}_1 \times {}^s\vec{\omega}| = |{}^s\vec{r}_1| |{}^s\vec{\omega}| \quad (5.4)$$

であり、 $({}^s\vec{r}_1 \times {}^s\vec{\omega}) // ({}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega})$ から、

$$\frac{{}^s\vec{r}_1 \times {}^s\vec{\omega}}{|{}^s\vec{r}_1 \times {}^s\vec{\omega}|} = \frac{{}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega}}{|{}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega}|} \quad (5.5)$$

であるから、

$${}^s\vec{r}_1 \times {}^s\vec{\omega} = |{}^s\vec{r}_1| |{}^s\vec{\omega}| \frac{{}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega}}{|{}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega}|} \quad (5.6)$$

となる.

従って, 速度 ${}^w\vec{v}_{O_r}$ は

$${}^w\vec{v}_{O_r} = {}^w\mathbf{T}_s ({}^s\vec{r}_1 \times {}^s\vec{\omega}) = {}^w\mathbf{T}_s (|{}^s\vec{r}_1| |{}^s\vec{\omega}| \frac{{}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega}}{|{}^s\vec{R} \times {}^s\vec{\omega}|}) = {}^w\mathbf{T}_s \begin{bmatrix} -{}^s\omega_y R \\ {}^s\omega_x R \\ 0 \end{bmatrix} = [{}^s\omega_y R, -{}^s\omega_x R, 0]^T \quad (5.7)$$

となる. ただし, ${}^w\mathbf{T}_s$ は球面モータ座標系から世界座標系への変換行列であり,

$${}^w\mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\pi & \sin\pi \\ 0 & \sin\pi & \cos\pi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

で与えられる. (5.7)式を書き直すことにより, 以下の移動台車の順運動学モデルが求められる.

$$\begin{bmatrix} {}^w\dot{x}_{O_r} \\ {}^w\dot{y}_{O_r} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -R & 0 \\ -R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^s\omega_x \\ {}^s\omega_y \\ {}^s\omega_z \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

これより, 移動ロボットの走行方向は球面モータの回転速度の z 軸成分 ${}^s\omega_z$ に関係しないことがわかる. 従って, 球面モータの回転速度の大きさ $|{}^s\omega|$ を一定として, 回転速度の x 軸成分 ${}^s\omega_x$ および y 軸成分 ${}^s\omega_y$ の比を変えずに z 軸成分 ${}^s\omega_z$ を変化させると, すなわち回転速度を変えずに制御角 θ を変化させると, 移動台車を一定方向に移動させながら, 移動速度 ${}^w\vec{v}_{O_r}$ を変化させることができる.

一方, 移動台車の移動速度 ${}^w\vec{v}_{O_r}$ を与える球面モータの回転角速度は, 移動台車の逆運動学モデルから,

$$\begin{bmatrix} {}^s\omega_x \\ {}^s\omega_y \\ {}^s\omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R} & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 0 \\ k_x & k_y & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w\dot{x}_{O_r} \\ {}^w\dot{y}_{O_r} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

で与えられる．ここで， k_x ， k_y ， k_z は任意の実数である．

5.4.3. 駆動力や速度と制御角 θ の関係

球面モータの回転軸 ${}^s\bar{\omega}$ 周りのトルクを T とすると，球面モータの可動子が地面に与える駆動力 F は，回転軸と接地点との距離 $R \cos \theta$ を用いて，

$$F = \frac{T}{|{}^s\bar{r}_1|} = \frac{1}{\cos \theta} \frac{T}{R} \quad (5.11)$$

により計算される．本研究で製作した移動台車には，ボールキャスターがついた足を4本装備している．ボールキャスターと地面との動摩擦力 f が，どの足に対しても同じで移動速度によらずに一定であると仮定すると，移動台車の駆動力 F' は，

$$F' = F - 4f = \frac{1}{\cos \theta} \frac{T}{R} - 4f \quad (5.12)$$

で与えられる．従って，動摩擦力 f は，球面モータの回転速度に対して移動台車の駆動力 F' の最大値を実験的に求めれば，その回転速度での球面モータのトルク T の最大値から(5.12)式により求められる．

また，移動ロボットの移動速度は，(5.7) 式から，

$$|{}^w\bar{v}_{O_r}| = R \sqrt{{}^s\omega_x^2 + {}^s\omega_y^2} = R |{}^s\bar{\omega}| \cos \theta = |{}^s\bar{r}_1| |{}^s\bar{\omega}| \quad (5.13)$$

により，計算される．

(5.12)式と(5.13)式から， ${}^s\omega_z$ を変化させて，制御角 θ を0から90°まで変化させると，移動台車の移動方向を変えないまま，移動速度は $R|{}^s\bar{\omega}|$ から0まで遅くなり，移動台車

の駆動力 F' は $T/R-4f$ から ∞ まで大きくできることが分かる。ただし、実際には可動子表面と X_w-Y_w 平面との摩擦力には限界があることから、制御角 θ はあまり大きくはできないと予想される。

5.5. 移動台車の走行性能評価実験

5.5.1. 実験目的と方法

試作した移動台車の動作確認と、球面減速を用いた走行性能の評価を以下の3つの実験によって行った。

- 実験1：球面モータの回転特性を評価する。
- 実験2：最大駆動力を測定する。
- 実験3：移動速度を計測する。

実験1の目的は、球面モータの出力トルクと回転角速度の関係を調べることである。ここでは、図5.4に示すように、一方向に負荷がかかるように重りをつけ、重りの質量をパラメータとして、その負荷において球面モータを停止状態から反対側へ目標回転角速度で回転するように電磁石を励磁し、脱調せずに回転する最大の目標回転角速度を求める。なお、球面モータの可動子は、固定子の電磁石の鉄心への永久磁石の引力と電磁石の励磁によるクーロン力によって、固定子に吸着している。

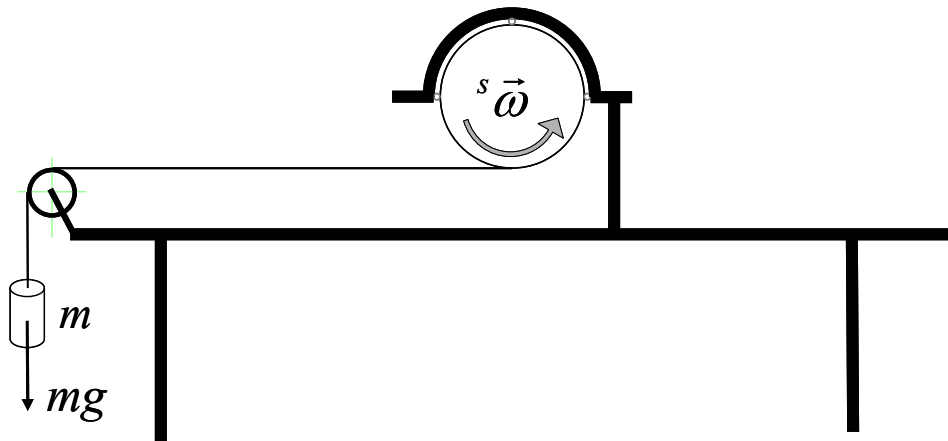


図 5.4 球面ステッピングモータの回転性能の評価実験の方法

実験2の目的は、移動台車の駆動力と制御角 θ の関係が(5.12)式に従うかを評価することである。図5.5に示すように、一方向に負荷がかかるように重りをつけ、球面モータの回転角速度を一定にして、移動台車を一定方向へ移動させる。制御角 θ をパラメータとして、移動台車が一定の距離を脱調せずに移動できる最大の重りの質量を求める。

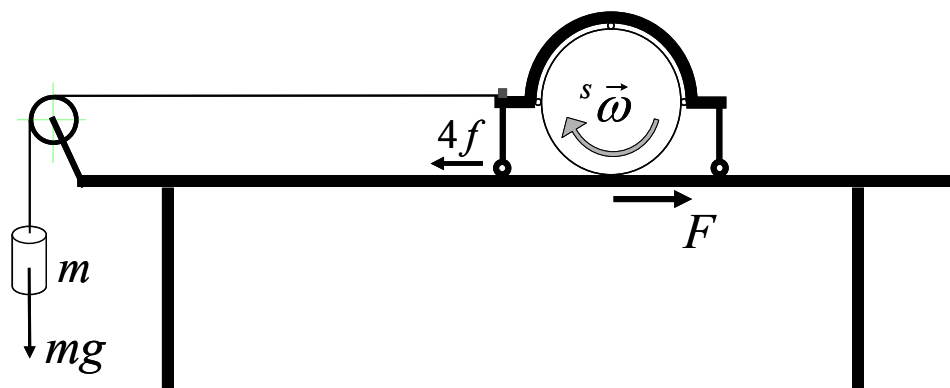


図 5.5 移動台車の推進力の評価実験の方法

実験3の目的は、移動台車の移動速度と制御角 θ の関係が(5.13)式に従うかを評価することである。図5.6に示すように、球面モータの回転角速度を一定として、移動台車を作業台上で一定方向へ移動させる。制御角 θ をパラメータとして、移動ロボットを一定の距離を移動させて、その間の時間を計測することで、移動速度と制御角の関係を求める。

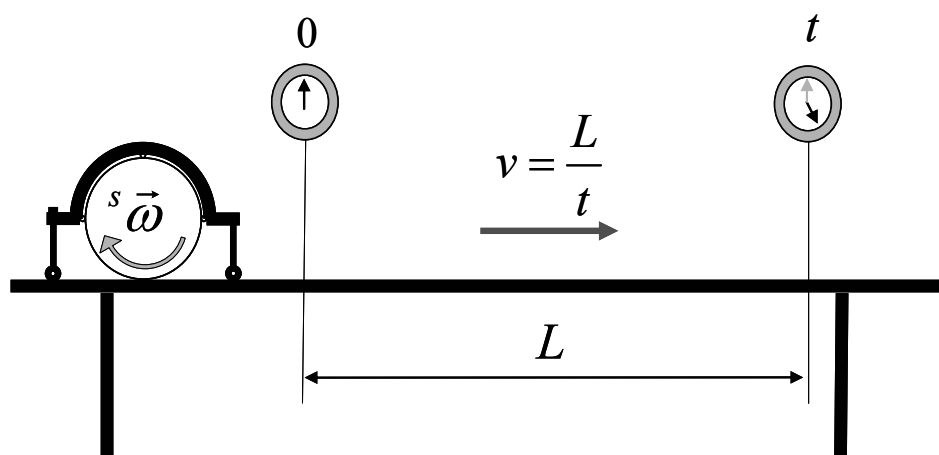


図 5.6 移動台車の移動速度の評価実験の方法

5.5.2. 実験結果と考察

トルクと回転角速度の関係

実験1で測定した脱調せず可動子の最大回転角速度の測定値は付録表C.1と表C.2に示す。この結果から球面モータの出力トルクと回転角速度の関係を求めると、図5.7と図5.8のようになった。

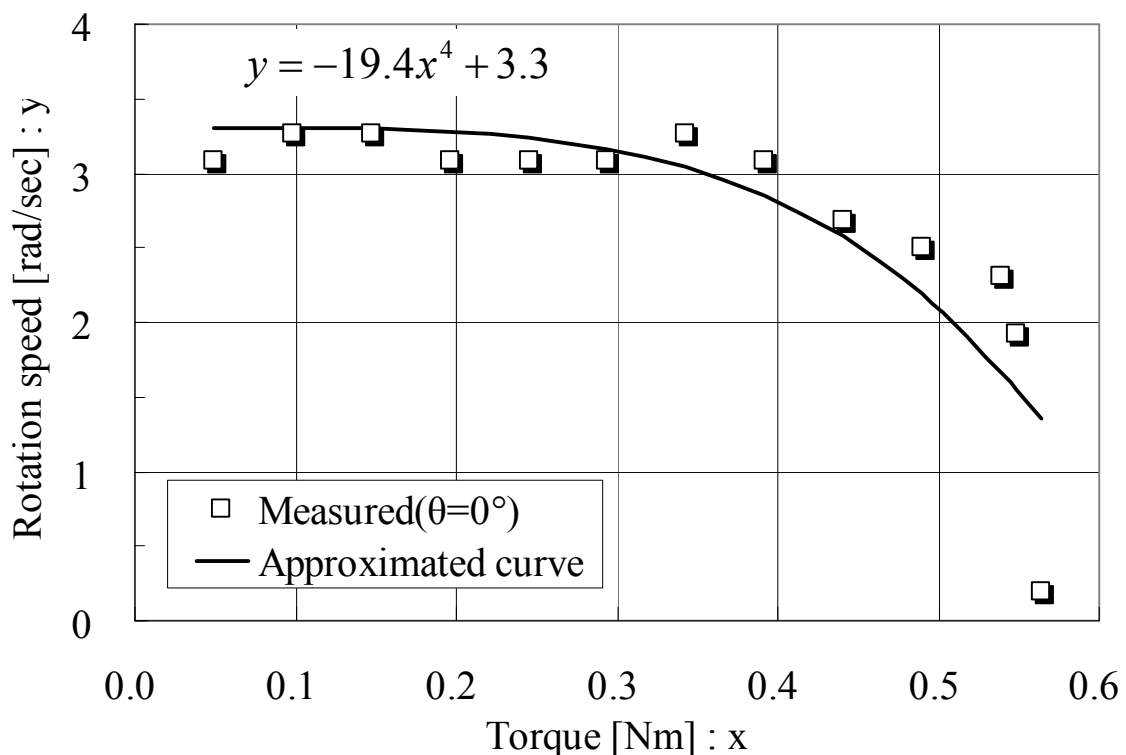


図 5.7 トルクと回転速度の関係 ($\theta=0^\circ$)

図5.7と図5.8は、それぞれ、制御角 θ が 0° および 24.72° の場合である。図中に示した4次関数は、横軸を x 軸、縦軸を y 軸として、実験結果を軸が y 軸となる4次関数で実験結果を最小二乗法によりフィッティングした結果である。図から、制御角 θ にかかわらず球面モータの出力トルクと回転速度の関係が変わらないこと、球面モータの最大トルクは 0.57 [Nm]、最大回転角速度は 3.3 [rad/sec]であることがわかる。

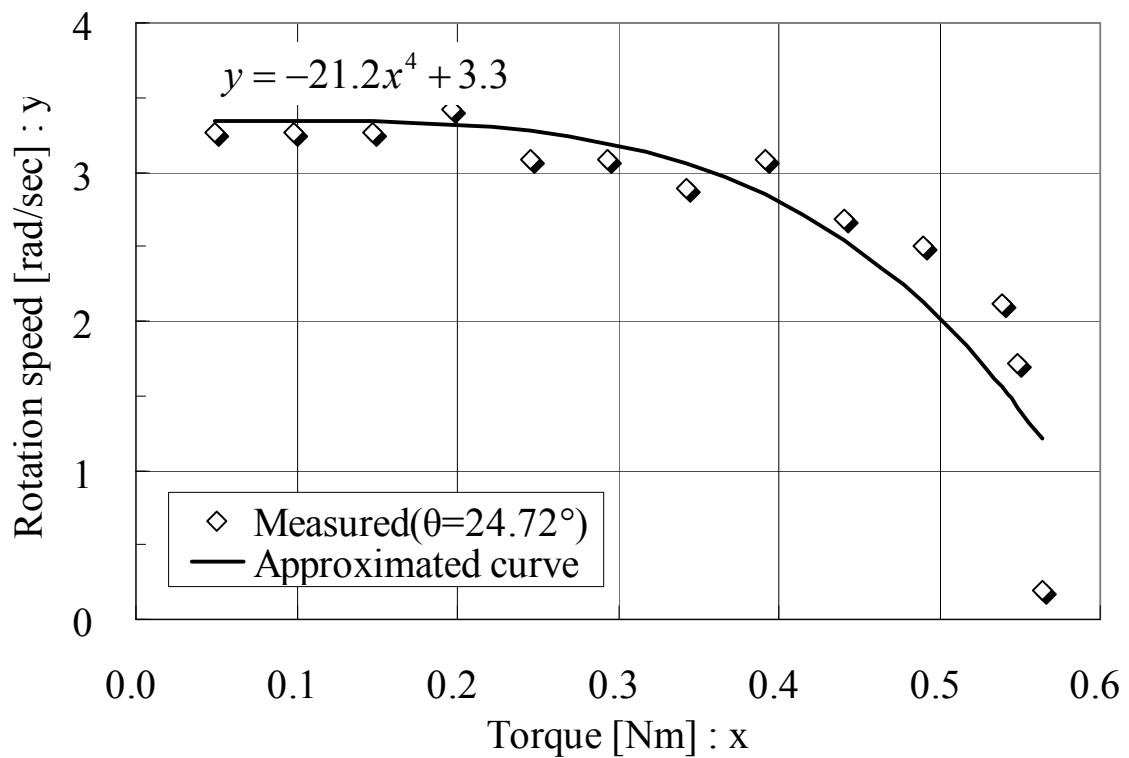
図 5.8 トルクと回転速度の関係 ($\theta=24.72^\circ$)

図 5.7と図 5.8の特性をみると、トルクが0~0.4 [Nm]の範囲で限界回転速度がほぼ一定の値を示している。本研究での球面モータと同じ動作原理で動作するステッピングモータでは、ダンパがない状態では回転を上げて行くと振動により脱調することが知られている^[73]。本研究の球面モータでもこの原因により、限界回転速度がほぼ一定の値を示すと考えられる。

駆動力と制御角の関係

球面モータの回転角速度を 1.92, 2.88 [rad/sec]としたときの, 移動台車の駆動力 F' と制御角 θ の関係に対する理論値と実験値の比較を, 図 5.9 と図 5.10 に示す.

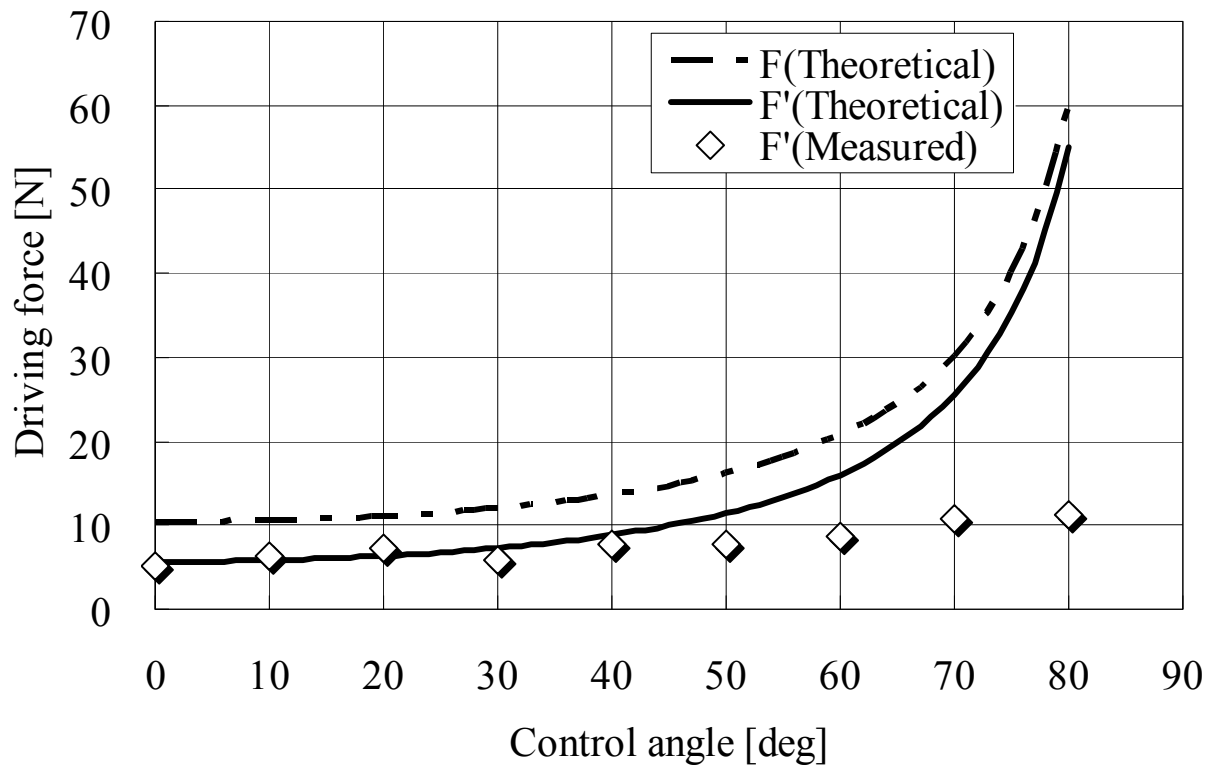


図 5.9 制御角と駆動力の関係 ($\omega=1.92$ [rad/sec])

図の実験値は, それぞれの制御角 θ に対する値であり, 付録表C.3と表C.4に示す.

これらの図において, 破線と実線は, それぞれ, 図 5.7で示される球面モータの回転角速度に対する限界トルクを用いた場合の, (5.11) 式で計算される球面モータの可動子が床面に与える駆動力 F と, (5.12) 式で計算される移動台車の駆動力 F' の理論値である. ここで, 4本のボールキャスターの床面との摩擦力 $4f = F - F'$ は以下のように見積もっている.

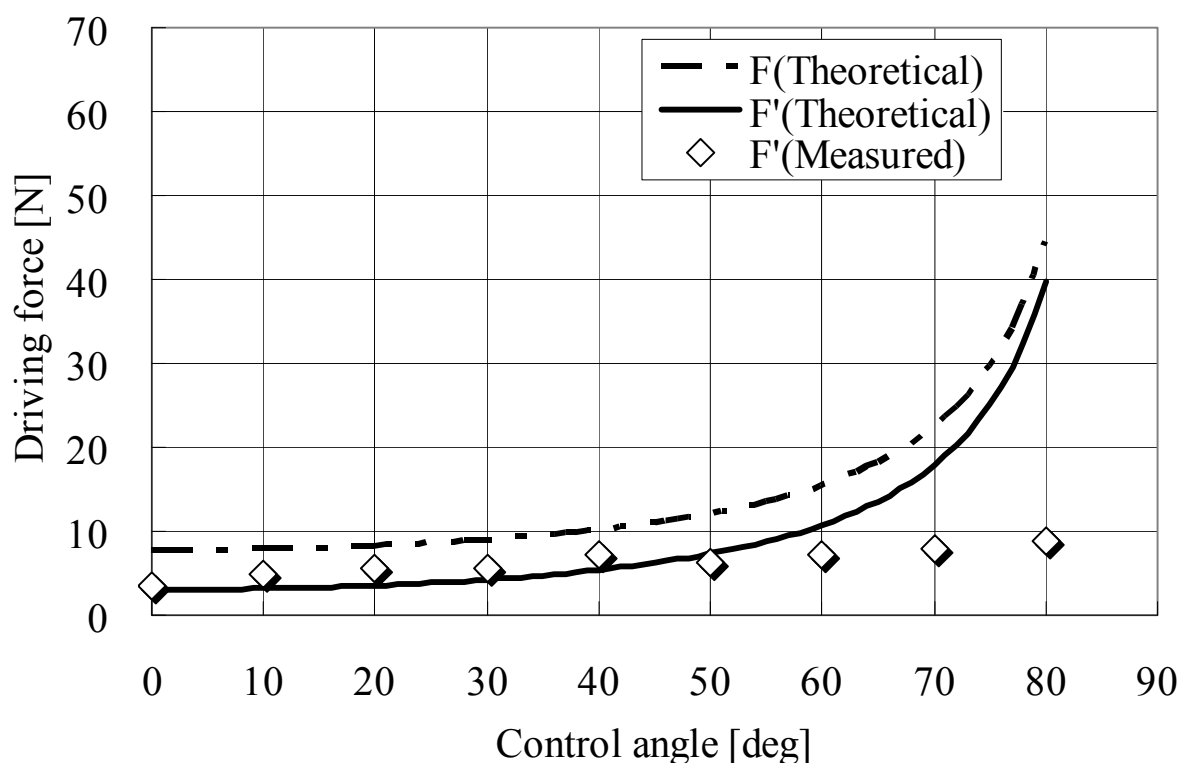


図 5.10 制御角と駆動力の関係 ($\omega=2.88$ [rad/sec])

図 5.9や図 5.10の実験での計測値は、これ以下では移動台車が動かなくなる限界駆動力を示しているため、ボールキャスターと床面の摩擦力は静止摩擦力を採用の方が妥当と考えられる。図 5.7の4次関数でフィッティングしたトルク-回転速度カーブからトルクを読み取ると、回転角速度 $\omega=1.92$ [rad/sec]の場合はトルク $T=0.52$ [Nm]、回転角速度 $\omega=2.88$ [rad/sec]の場合はトルク $T=0.39$ [Nm]となる。制御角 θ が 0° の場合に対して、球面モータの限界駆動トルクを用いた場合の(5.11)式により与えられる駆動力 F_M の計算結果と移動台車の駆動力 F' の最大値の測定結果から $F_M - F'$ として静止摩擦力を求めた結果、 ω が 1.92 [rad/sec]と 2.88 [rad/sec]のそれぞれの場合に 5.15 [N]と 4.18 [N]となる。そして、これらの平均値 4.67 [N]を静止摩擦力 $4f$ とする。図 5.9や図 5.10の移動台車の駆動力 F' は、 F_M からこの平均値を引いた値としている。

表 5.1 制御角と駆動力の増倍率の関係

θ [deg]		0	10	20	30	40	50	60	70	80
Amplification rate	$\omega=1.92$	1.0	1.2	1.4	1.1	1.5	1.5	1.7	2.1	2.2
	$\omega=2.88$	1.0	1.4	1.6	1.6	2.1	1.8	2.1	2.2	2.5

また、表 5.1に、制御角 θ を変化させた場合の、移動台車の駆動力 F' が制御角 0° の時の値の倍率を示す。この表と図 5.9 や図 5.10 から、制御角 θ が 50° 以下の場合には、実測値と理論値はほぼ一致しており、移動台車の駆動力を 2 倍程度まで高めることができることがわかる。しかしながら、制御角 θ が 50° 以上の場合、実測値は理論値より小さく、制御角が大きいほど差が大きくなっている。その原因は、制御角が大きい場合には、ボールと地面の間ですべりが発生して駆動力が地面に十分伝わらないことや、移動台車の駆動トルク F' から逆算した可動子の駆動トルクが、球面モータが発生できる限界トルクを超えるためである。大きくなってその反作用により脱調し易くなることが考えられる。

以下では、制御角 θ が 50° 前後で実験値が理論値からずれていく原因を考察する。ここで、球状可動子と床面との間の静止摩擦係数を μ_1 (0.5093)、ボールキャスターと床面との間の静止摩擦係数を μ_2 (0.2702) とし、球状可動子と床面との間の垂直抗力を N_1 、ボールキャスターと床面との間の垂直抗力を N_2 とする。また、ケーブルを取り付けた移動台車の質量 M は 3.84[kg] であり、このうちケーブルの質量は 0.41[kg] である。

移動台車の限界駆動力では、静止摩擦力 $4f$ を 4.67[N] と見積もっているので、 $4f = 4\mu_2 N_2 = 4.67$ から $N_2 = 4.32$ [N] となり、 $N_1 + 4N_2 = Mg$ から $N_1 = 20.35$ [N] と計算される。従って、球状可動子が床面上をすべらない最大の駆動トルク F_{\max} は $F_{\max} = \mu_1 N_1$ から $F_{\max} = 10.35$ [N] と求められる。図 5.9, 図 5.10 をみると、球面モータの駆動力 F の理論値が F_{\max} を超えるあたりから、実測値が理論値から乖離し始めている。従って、実測値の理論値からの乖離は、球状可動子と床面とのすべり発生によるものと考えられる。なお、 F_{\max} 以下の球面モータの駆動力 F では、移動台車の限界駆動力を制限しているのは、図 5.7 の制御角 θ に対する限界トルクである。

以上の考察から、球状回転子と床面との間の静止摩擦係数が増えると、実測値と理論値が乖離する制御角 θ が変わると考えられる。図 5.9 と図 5.10 からは、実測値と理論値が一致する最大の制御角 θ は、 ω が 1.92 [rad/sec] では 40° 、 ω が 2.88 [rad/sec] では 50° となっている。乖離の理由が球状回転子と床面との間のすべりであることから、

乖離が発生しない最大の制御角 θ が、静止摩擦係数等により予測できる。従って、移動台車の質量がある程度大きければ、静止摩擦力が大きくなり制御角 θ を大きくしても乖離しないようにすることが可能と考えられる。

移動速度と制御角の関係

球面モータの回転角速度を 1.92, 2.88 [rad/sec] としたときの、1[m] 走行する場合の測定した時間を付録表 C.5 と表 C.6 に示す。それに基づく計算した移動ロボットの平均走行速度と標準偏差は付録表 C.7 と表 C.8 に表す。

これらの結果に基づいて、球面モータの回転角速度を 1.92, 2.88 [rad/sec] としたときの、移動速度と制御角の関係に対する (5.13) 式から計算される理論値と実験値の比較を図 5.11 に示す。

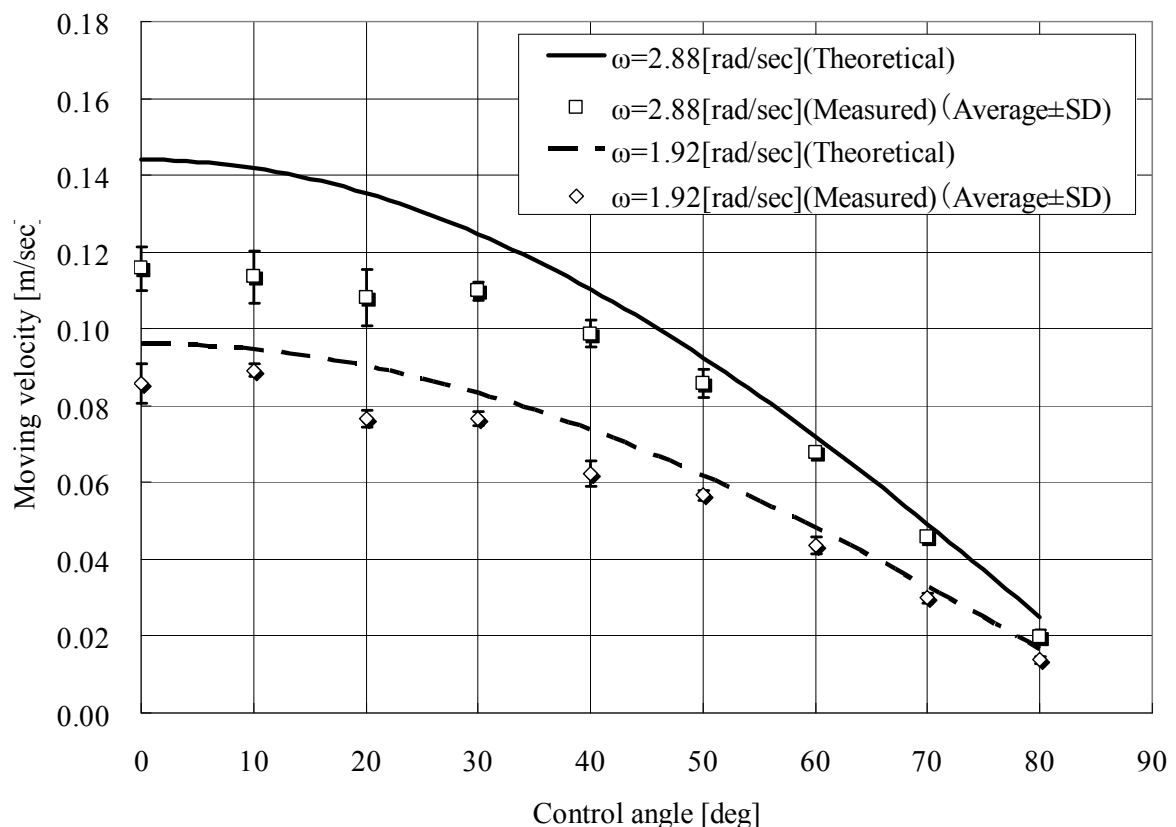


図 5.11 制御角と移動台車の速度との関係

図のプロットは、それぞれの制御角 θ に対する 10 回の実験での平均値であり、I 字形のシンボルの長さの半分は標準偏差を表す。制御角が小さい場合に実測値が理論値より下まわっているが、これは球面モータの可動子と作業台上面との間にすべりが発生したためである。なお、作業台上面の動摩擦力をスプレー糊を用いて大きくすると、実測値はほぼ理論値に従うことを確認している。

5.6. まとめ

全方位回転可能な球面モータにより駆動されるホロノミック全方向移動台車に関して、球面モータの回転軸を傾けることにより、移動速度は減少するが駆動力を増大させる球面減速を提案した。そして、その効果を評価するために、移動台車を試作して走行性能を評価した。

その結果、試作した移動台車と走行実験での床面の場合には、制御角が約 50° 以下で移動台車の駆動力の実測値と理論値はほぼ一致し、制御角が 0° の場合の 2 倍程度まで駆動力を高めることができることができた。ここで、球面減速によって球面モータの球状可動子が地面に与えることができる最大の駆動トルクは、球面モータの回転速度に対する限界トルクと制御角から計算されるトルクに一致することを確認した。また、移動速度に関しては、駆動用球面モータの可動子と走行路面との間にすべりが生じない場合には、実測値はほぼ理論値に従うことを確認した。

第6章 結 論

本研究では、球殻に多数の永久磁石を配置した回転子を、電磁石の励磁を制御することにより作り出される回転磁界により回転させる球面ステッピングモータの応用性について検討した。

まず、球面モータの研究動向についてサーベイし、技術動向を把握した。また、本研究で応用を検討する球面ステッピングモータの構造、操作原理、制御回路、及び、設計のためのシミュレータについて述べた。

球面ステッピングモータの応用として、攪拌器を考え試作機を作成した。そして、様々な方向に回転させる攪拌方法の攪拌能力を実験的に検討した。その結果、攪拌性能が最大の場合に近い攪拌性能が得られることが明らかになった。様々な方向に回転させることにより、重力の影響を緩和した攪拌が可能と考えられ、球面モータの攪拌器への応用性が示された。

また、ホロノミックな移動台車への応用を考え、試作機を作成した。そして、球面モータの回転軸を制御することにより、移動台車の駆動トルクを増大させる方法を提案し、その有効性を実験的に評価した。また、走行路面と回転子との摩擦力と駆動トルクの増大率との関係を考察した。これらの結果から、ホロノミックな移動台車への応用性を示した。

本研究で対象とした球面ステッピングモータでは、オープンループの制御を行っているため、外力により回転が停止した場合には回転を継続することができない。回転子の姿勢を計測して回転制御をクローズドループで行うための、回転子の姿勢計測装置の開発が、応用性を一段と高めるためには必要である。

謝辞

本研究を進める上で、大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 五福 明夫 教授には指導教員として、本研究の実施の機会を与えて戴き、研究の計画から実施、また、まとめ、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 則次 俊郎 教授、並びに、大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 鈴森 康一 教授には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。また、大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 亀川 哲志 講師には、研究実施上有益なコメントをいただきました。ここに深謝の意を表す。工学部創造工学センター 柴田 光宣 技術職員には、試作機等の開発では設計、製作においてご協力をいただきました。ここに深謝の意を表す。そして、機械インターフェイス学の皆様にもお世話になりました。ここに深謝の意を表す。

参考文献

- [1] 内山勝, “人工の手の運動制御に関する研究 (第1報, 特異点を考慮した協調運動の計算)”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 45, No. 391 (1979), pp. 314-332.
- [2] 吉川恒夫, “ロボット制御基礎論”, コロナ社, (1988).
- [3] 吉川恒夫, 桐山茂生, “ロボットアームの4関節手首機構”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 21, No.5 (1985), pp. 111-113.
- [4] 矢野智明, “球面モータ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21 No. 7 (2003), pp.740-743.
- [5] 矢野智昭, “高トルク球面モータの開発”, 第50回自動制御連合講演会講演論文集 (CD-ROM) (2007), pp. 84-87 (119.pdf).
- [6] 矢野智昭, 巖 龍洙, “切頂八面体と正十二面体にもとづく球面ステッピングモータの設計”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 77, No. 775 (2011), pp. 651-659.
- [7] 五福明夫, 永井孝和, 池下聖治, 柴田光宣, 亀川哲志, “全方位回転可能な球面モータの開発”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 74, No. 747 (2008), pp. 2713-2720.
- [8] Seiji Ikeshita, Akio Gofuku, Tetsushi Kamegawa, Takakazu Nagai, “Development of a Spherical Motor Driven by Electro-magnets”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1 (2010), pp. 43-46.
- [9] Hirokazu Nagasawa, Satoshi Honda, "Development of a Spherical Motor Manipulated by Four Wires" The Fifteenth Annual Meeting of American Society for Precision Engineering, Scottsdale, Arizona, U. S. A., (2000).
- [10] 坂井伸朗, 村上輝夫, 澤江義則, “ヒト肩関節を規範としたロボットアーム関節機構の開発”, バイオメカニズム, Vol. 17 (2004), pp. 143-155.
- [11] 坂井伸朗, 澤江義則, 村上輝夫, “ヒト肩関節ロボットシミュレータの肩甲骨モデルの構成”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (2009), 1A1-K02.
- [12] Tomoaki Yano, T. Suzuki, “Basic Characteristics of the Small Stepping Motor”, Proc. 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'02), (2002).

- [13] Mingyu Tong, Katsuhiro Hirata, Shuhei Maeda, "Dynamic Analysis of 3 DOF Actuator Employing 3 D Finite Element Method", *電気学会論文誌 D*, VOL.131, No.10 (2011), pp.1240-1245.
- [14] Liang Yan, I-Ming Chen, Guilin Yang, and Kok-Meng Lee, "Analytical and Experimental Investigation on the Magnetic Field and Torque of a Permanent Magnet Spherical Actuator", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 11, No. 4 (2006), pp. 409-419.
- [15] E. h. M. Weck, T. Reinartz, G. Henneberger, R. W. De Doncker, "Design of Spherical Motor with Three Degrees of Freedom", *Annals of CIRP*, Vol. 49 (2000), pp. 289-294.
- [16] 矢野智昭, "高トルク球面モータの開発-第1報-球面ステッピングモータの提案", *電気学会産業応用部門大会講演論文集*, Vol.3, (2007), pp.135-136.
- [17] 矢野智昭, "高トルク球面モータの開発 -正六面体と正四面体に基づく球面ステッピングモータの提案-", *日本 AEM 学会誌*, Vol. 16, No. 2 (2008), pp. 108-113.
- [18] 矢野智昭, 巖 龍洙, "正六面体と正八面体に基づく球面ステッピングモータの性能評価", *日本 AEM 学会誌*, Vol. 18, No. 2 (2010), pp. 116-121.
- [19] David Stein, Gregory S. Chirikjian, "Experiments in the Commutation and Motion Planning of a Spherical Stepper Motor", *Proc. DETC'00 ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, (2000).
- [20] 矢野智昭, 金子真, "回転中心を同一とする多自由度アクチュエータの基礎的検討", *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 6 (2003), pp. 875-882.
- [21] T.Yano, M. Kaneko and M. Sonoda, "Position Control of a Developed Synchronous Motor with Three Degree of Freedom", *Proc. of the 3rd France-Japan Congress on Mechatronics*, Vol. 2 (1996), pp. 127-132.
- [22] <http://yokota-www.pi.titech.ac.jp/index-A.html> (矢野智昭, 科学研究費補助金研究成果報告書, 平成 21 年 6 月), (参照日 2010 年 4 月 28 日).
- [23] Changliang Xia, Hongfeng Li, and Tingna Shi, "3-D Magnetic Field and Torque Analysis of a Novel Halbach Array Permanent-Magnet Spherical Motor", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 44, No. 8 (2008), pp. 2016-2020.
- [24] Changliang Xia, Peng Song, Hongfeng Li, Bin Li and Tingna Shi, "Research on Torque Calculation Method of Permanent-Magnet Spherical Motor Based on the Finite-Element Method", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 45, No. 4 (2009), pp. 2015-2022.
- [25] Bin Li, Gui-Dan Li and Hong-Feng Li, "Magnetic Field Analysis of 3-DOF Permanent Magnetic Spherical Motor Using Magnetic Equivalent Circuit Method", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 47, No. 8 (2011), pp. 2127-2133.

- [26] J. Wang, K. Mitchell, G. W. Jewell and D. Howe, "Multi-Degree-of-Freedom Spherical Permanent Magnet Motors", Proc, the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation (2001), pp. 1798-1805.
- [27] K.M. Lee, G. Vachtsevanos and C.K. Kwan, "Development of a Spherical Stepper Wrist Motor", Journal of Intelligent and Robotic Systems 1(1988), pp.225-242.
- [28] K.M. Lee and C.K. Kwan, "Design concept development of a spherical stepper for robotic applications", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 1 (1991), pp. 175-180.
- [29] B. Dehez, G. Galary, D. Grenier, and B. Raucent, "Development of a Spherical Induction Motor With Two Degrees of Freedom", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 42, No. 8 (2006), pp. 2077-2089.
- [30] 田中, 和多田雅哉, 鳥居肅, 海老原大樹, "多自由度球体アクチュエータの提案と設計", 第 11 回電磁現象及び電磁気に関するコンファレンス講演論文集(2002), pp. 169-172.
- [31] 遠山茂樹・張国強・杉谷滋・長谷川慎一・中村和人・宮谷保太郎, "超音波モータを用いたロボット用アクチュエータの開発 - 第 2 報 球面超音波モータの試作 -", 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 2 (1995), pp. 235-241.
- [32] 前野隆司, "超音波モータ", 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 1 (2003), pp. 10-14.
- [33] 上和野満雄, 古閑俊通, 大矢公夫, "高粘度液の攪拌混合 -種々の攪拌装置における対流混合作用-", 化学工学論文集, Vol. 5 (1979), pp. 520-525.
- [34] 笹倉寿介, 加藤悦昌, 山室渉一, 大井信一, "攪拌槽内における混合過程", 化学工学論文集, Vol. 4 (1978), pp. 595-601.
- [35] 加藤禎人, 平岡節郎, 亀井登, 多田豊, "攪拌槽の設計・操作における攪拌所要動力の重要性", 化学工学論文集, Vol. 35 (2009), pp. 211-215.
- [36] 加藤禎人, 多田豊, 浦野邦彦, 中岡梓, 長津雄一郎, "皿底円筒槽と平底円筒槽における攪拌所要動力の差異", 化学工学論文集, Vol. 36 (2010), pp. 25-29.
- [37] 加藤禎人, 塩原克己, 古川陽輝, 多田豊, 長津雄一郎, 高承台, 李泳世, "球底乱流攪拌槽の攪拌所要動力", 化学工学論文集, Vol. 37 (2011), pp. 305-309.
- [38] 加藤禎人, 亀井登, 多田豊, 中岡梓, 伊吹竜彦, 長津雄一郎, 高承台, 李泳世, "乱流攪拌槽の攪拌所要動力に及ぼす邪魔板挿入深さの影響", 化学工学論文集, Vol. 37 (2011), pp. 377-380.
- [39] 加藤禎人, 多田豊, 仲道真也, 長津雄一郎, 岩田修一, 岩石真一, 梶原進, 李泳世, 高承台, "サーボモータを用いた非定常攪拌の性能評価", 化学工学論文集, Vol. 32 (2006), pp. 465-470.
- [40] 加藤禎人, 多田豊, 武田康弘, 長津雄一郎, 岩田修一, 岩石真一, 梶原進, 李泳世, 高承台, "乱流攪拌槽における非定常攪拌の効果", 化学工学論文集, Vol. 35 (2009), pp. 152-157.
- [41] 株式会社セイワ技研: <http://www.kongou-ki.com/> (参照日 2012 年 2 月 12 日).
- [42] 村田和久, 攪拌用回転体および攪拌装置, 日本国特許第 4418019 号 (2010).

- [43] 株式会社シンキー：<http://www.thinky.co.jp/> (参照日 2012 年 2 月 12 日)。
- [44] 山下淳，浅間一，新井民夫，太田順，金子透，“ロボットの移動機構に関する研究動向”，日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 3 (2003), pp. 282-292.
- [45] 多田隈建二郎，“全方向移動・駆動機構”，日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 6 (2011), pp. 516-519.
- [46] B. Carlisle, “An Omni-Directional Mobile Robot,” *Developments in Robotics 1983*, IFS Publications Ltd. (1983), pp.79-87.
- [47] P.F. Muir and C.P. Neuman, “Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robots”, *Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1987), pp. 1772-1778.
- [48] 浅間一，佐藤雅俊，嘉悦早人，尾崎功一，松元明弘，遠藤勲，“3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発”，日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2 (1996), pp. 249-254.
- [49] 藤原茂喜，北野斉，山下秀樹，前田裕史，福永秀雄，“全方向移動型パワーアシストカートの操作性向上”，日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 2 (2004), pp. 223-229.
- [50] 北川秀夫，別府達哉，大野義則，三好孝典，寺島一彦，“全方向移動車椅子の乗り心地向上のための走行制御”，日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 7 (2004), pp. 933-939.
- [51] 鄭聖熹，松川文厚，西山達也，井代直也，“倒立振り子型全方向移動体および基本走行制御”，日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 8 (2011), pp. 710-715.
- [52] 立花智史，永谷圭司，永井伊作，田中豊，“メカナムホイールを用いた全方向移動車のナビゲーションの研究”，ロボティクス・メカトロニクス講演概要集 2A-44-050 (2000), p.67.
- [53] Keiji Nagatani, Satoshi Tachibana, Makoto Sofue, Yutaka Tanaka, “Improvement of Odometry for Omnidirectional Vehicle using Optical Flow Information”, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems* (2000), pp.468-473
- [54] 藤沢正一郎，大久保慶治，師玉康成，山浦弘夫，“四輪独立駆動型全方向移動ロボットの運動学と走行特性”，日本機械学会論文集 (C 編) , 62 巻, 604 号(1996), pp. 4573-4579.
- [55] P. Chen et al., “Omni-Directional Robot and Adaptive Control Method for Off-Road Running”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.18, no.2 (2002), pp.251-256.
- [56] F. G. Pin and S. M. Killough, “A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.10, no.4 (1994), pp.480-489.
- [57] 湯軍，渡辺桂吾，栗林勝利，白石大和，“直交車輪機構を用いた全方向移動ロボット車の自律制御”，日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1 (1999), pp. 51-60.
- [58] L. Ferrière, B. Raucent and G. Campion, “Design of Omnimobile Robot Wheels”, *Proc.1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1996), pp. 3664-3670.

- [59] A. Betourne and G. Campion, "Kinematic Modelling of a Class of Omnidirectional Mobile Robot," Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1996), pp. 3631–3636.
- [60] 和田正義, 森俊二, "ホロノミック全方向移動ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.8 (1997), pp. 1139–1146.
- [61] 和田正義, 高木昭, 森俊二, "双輪キャスト型駆動機構を用いたホロノミック全方向移動ロボット", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8 (2000), pp. 1166–1172.
- [62] 和田正義, "同期キャスト駆動機構によるホロノミック全方向移動ロボットの設計と運動解析", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6 (2001), pp. 784–792.
- [63] M. Wada, H.H. Asada, "Design and Control of a Variable Foot Point Mechanism for Holonomic Omnidirectional Vehicles and its Application to Wheelchairs", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.15, no.6 (1999), pp.978-989.
- [64] 高橋隆行, 横田尚大, 王志東, 森 善一, 中野栄二, "車両幅可変型全方向移動ロボットの機構と制御", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.5 (2001), pp. 638–645.
- [65] T. B. Lauwers, G.A. Kantor, R.L. Hollis, "A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot With Inverse Mouse-Ball Drive", *Proc. of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2006), pp.2884-2889.
- [66] Y.F. Peng, C.H. Chiu, W.R. Tsai, and M.H. Chou, "Design of an Omni-directional Spherical Robot: Using Fuzzy Control", *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists*(2009), pp.168-173.
- [67] 山田健介, 宮本共生, 臼井清一, "4個の球を用いた全方向移動機構に関する研究", 日本機械学会論文集 (C編), vol. 71, no. 708 (2005), pp. 2557–2562.
- [68] T. Endo, Y. Nakamura, "An Omnidirectional Vehicle on a Basketball", *IEEE International Conference on Advanced Robotics* (2005), pp.573-578.
- [69] Umashankar Nagarajan, Anish Mampetta, George A. Kantor and Ralph L. Hollis, "State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot", *Proc. of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2009), pp.998-1003.
- [70] M. Kumagai and T. Ochiai, "Development of a Robot Balanced on a Ball –First Report, Implementation of the Robot and Basic Control–", *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.22, no. 3 (2010), pp.348-355.
- [71] T. Yano, T.Takatuji, S.Osawa, Y.Motomura, T.Itabe and T.Suzuki, "Development of a Small Spherical Motor for Driving Laser Tracker", *The 1st International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology* (2005), pp.1-2.
- [72] 堀源一郎, "ハミルトンと四元数 人・数の体系・応用", 海鳴社(2007).

-
- [73] Gritex Intemational Ltd., “ステッピングモータの諸問題とは？”, <http://www.gritex.com/gritex.pdf>
(参照日 2011 年 8 月 8 日)

付録 A 各攪拌方法による食塩水濃度の計測値

表 A.1 攪拌方法 A による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	2.2%	1.2%	2.4%	1.9%	0.52%
20[sec]	2.4%	2.0%	3.2	2.5%	0.50%
30[sec]	3.0%	3.2%	3.6%	3.3%	0.25%
40[sec]	3.8%	3.8%	4.0%	3.9%	0.09%
50[sec]	4.0%	4.4%	4.6%	4.3%	0.25%
60[sec]	5.0%	5.6%	5.4%	5.3%	0.25%
70[sec]	5.2%	5.0%	6.0%	5.4%	0.43%
80[sec]	4.8%	5.6%	6.0%	5.5%	0.50%
90[sec]	5.8%	5.6%	6.6%	6.0%	0.43%

表 A.2 攪拌方法 B による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	9.0%	9.2%	10.6%	9.6%	0.71%
20[sec]	13.2%	14.4%	14.2%	13.9%	0.52%
30[sec]	15.8%	17.2%	17.0%	16.7%	0.62%
40[sec]	18.0%	18.8%	19.0%	18.6%	0.43%
50[sec]	19.2%	19.6%	19.4%	19.4%	0.16%
60[sec]	19.8%	19.8%	20.0%	19.9%	0.09%
70[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
80[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
90[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%

表 A.3 攪拌方法 C による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	7.0%	7.0%	9.0%	7.7%	0.94%
20[sec]	8.8%	8.6%	9.0%	8.8%	0.16%
30[sec]	12.2%	11.8%	13.0%	12.3%	0.50%
40[sec]	12.6%	12.6%	14.0%	13.1%	0.66%
50[sec]	14.2%	14.4%	14.6%	14.4%	0.16%
60[sec]	15.0%	16.4%	17.4%	16.3%	0.98%
70[sec]	16.8%	17.2%	17.0%	17.0%	0.16%
80[sec]	18.0%	17.6%	17.6%	17.7%	0.19%
90[sec]	17.4%	18.8%	19.0%	18.4%	0.71%

表 A.4 攪拌方法 D による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	11.2%	10.0%	10.6%	10.6%	0.49%
20[sec]	14.0%	13.6%	14.4%	14.0%	0.33%
30[sec]	16.4%	16.2%	16.8%	16.5%	0.25%
40[sec]	18.0%	18.4%	17.8%	18.1%	0.25%
50[sec]	19.4%	19.4%	19.0%	19.3%	0.19%
60[sec]	19.6%	20.0%	19.8%	19.8%	0.16%
70[sec]	19.8%	20.0%	20.0%	19.9%	0.09%
80[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
90[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%

表 A.5 攪拌方法 E による食塩水濃度の計測値 (2.13[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	9.4%	10.0%	9.8%	9.7%	0.25%
20[sec]	9.8%	9.8%	13.0%	10.9%	1.51%
30[sec]	15.0%	15.4%	12.6%	14.3%	1.24%
40[sec]	15.4%	16.4%	10.4%	14.1%	2.62%
50[sec]	15.6%	18.4%	15.4%	16.5%	1.37%
60[sec]	16.8%	13.6%	18.4%	16.3%	2.00%
70[sec]	18.4%	19.4%	19.0%	18.9%	0.41%
80[sec]	18.4%	19.4%	19.4%	19.1%	0.47%
90[sec]	20.0%	19.6%	16.6%	18.7%	1.52%

表 A.6 攪拌方法 A による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	3.6%	3.2%	3.2%	3.3%	0.19%
20[sec]	4.5%	4.0%	4.0%	4.2%	0.24%
30[sec]	5.0%	4.4%	4.4%	4.6%	0.28%
40[sec]	5.2%	4.8%	5.4%	5.1%	0.25%
50[sec]	6.0%	5.6%	5.6%	5.7%	0.19%
60[sec]	6.4%	5.8%	6.6%	6.3%	0.34%
70[sec]	6.8%	6.5%	6.6%	6.6%	0.12%
80[sec]	7.0%	7.2%	7.0%	7.1%	0.09%
90[sec]	7.8%	7.4%	7.4%	7.5%	0.19%

表 A.7 攪拌方法 B による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	15.0%	16.2%	15.6%	15.6%	0.49%
20[sec]	19.0%	19.0%	19.0%	19.0%	0.00%
30[sec]	19.6%	19.8%	19.8%	19.7%	0.09%
40[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
50[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
60[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
70[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
80[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
90[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%

表 A.8 攪拌方法 C による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	10.2%	10.0%	11.0%	10.4%	0.43%
20[sec]	14.8%	15.2%	13.6%	14.5%	0.68%
30[sec]	16.4%	17.2%	18.0%	17.2%	0.65%
40[sec]	18.4%	19.0%	19.4%	18.9%	0.41%
50[sec]	19.0%	19.6%	19.8%	19.5%	0.34%
60[sec]	19.6%	20.0%	20.0%	19.9%	0.19%
70[sec]	19.8%	20.0%	20.0%	19.9%	0.09%
80[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
90[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%

表 A.9 攪拌方法 D による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	15.8%	16.4%	15.0%	15.7%	0.57%
20[sec]	18.4%	18.6%	18.4%	18.5%	0.09%
30[sec]	19.4%	19.8%	19.6%	19.6%	0.16%
40[sec]	20.0%	20.0%	19.8%	19.9%	0.09%
50[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
60[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
70[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
80[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
90[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%

表 A.10 攪拌方法 E による食塩水濃度の計測値 (5.34[rad/sec])

攪拌時間	1 回目	2 回目	3 回目	平均	標準偏差
0[sec]	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.00%
10[sec]	13.8%	7.0%	14.2%	11.7%	3.30%
20[sec]	18.6%	15.6%	15.8%	16.7%	1.37%
30[sec]	19.8%	18.4%	19.8%	19.3%	0.66%
40[sec]	20.2%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
50[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
60[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
70[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
80[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%
90[sec]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.00%

付録 B 各攪拌方法による食塩水濃度の時間変化

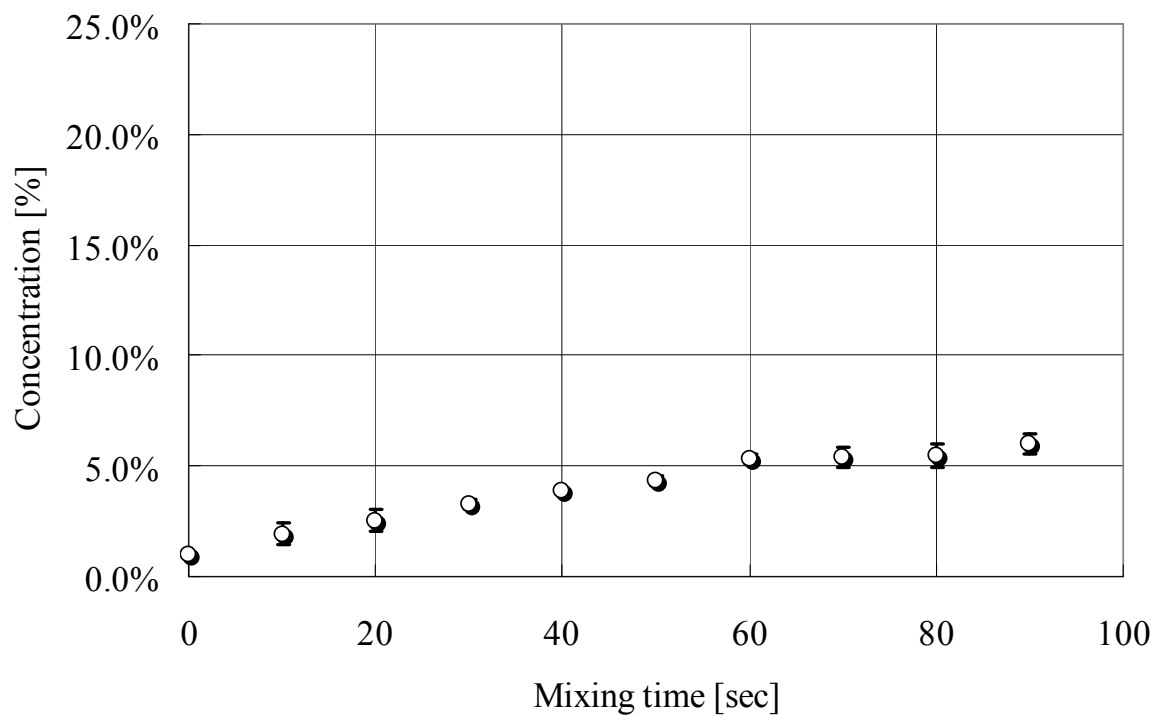


図 B.1 攪拌方法 A による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])

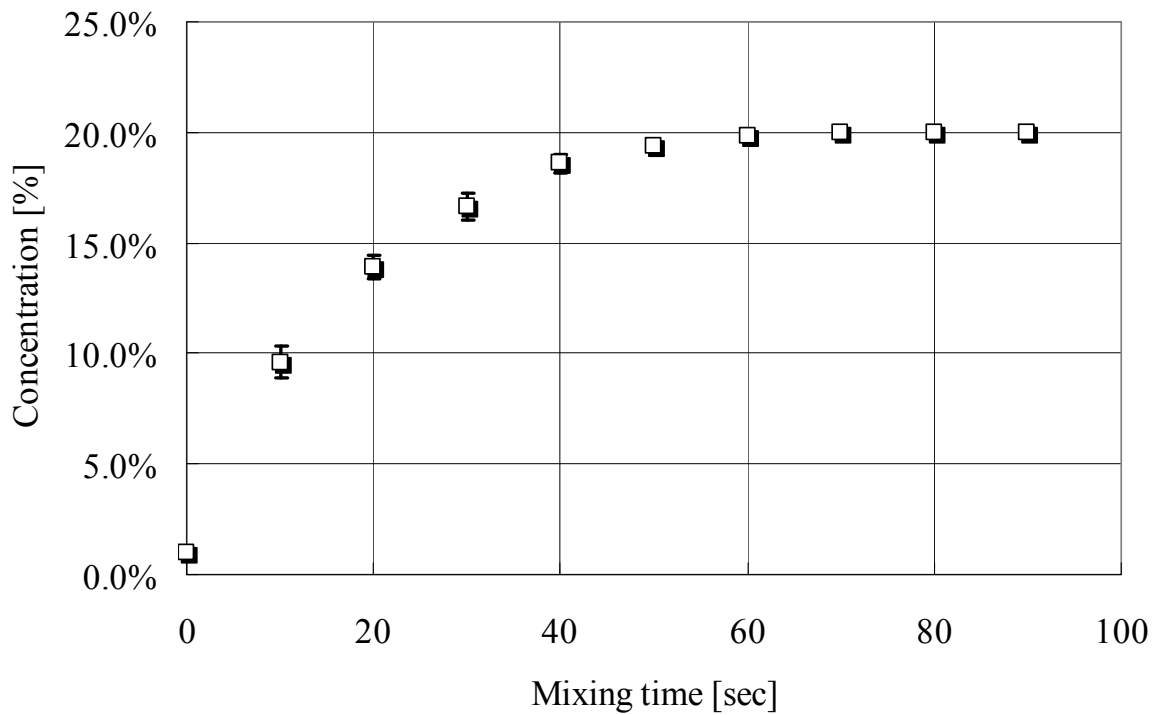


図 B.2 攪拌方法 B による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])

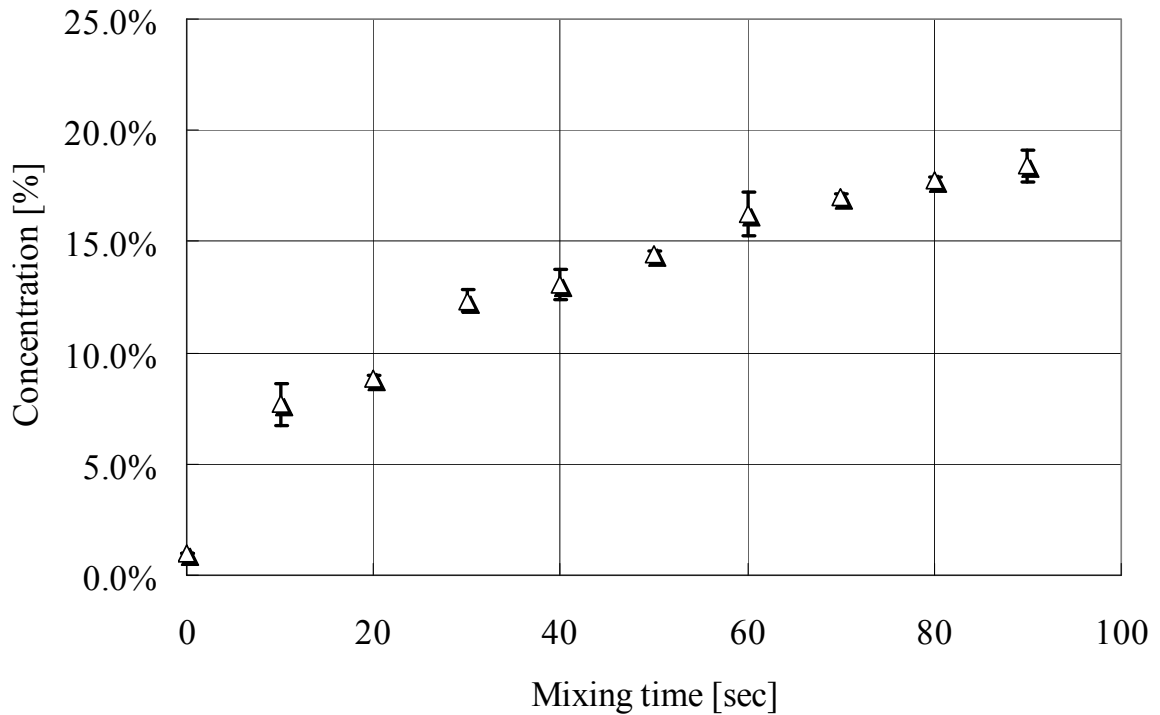


図 B.3 攪拌方法 C による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])

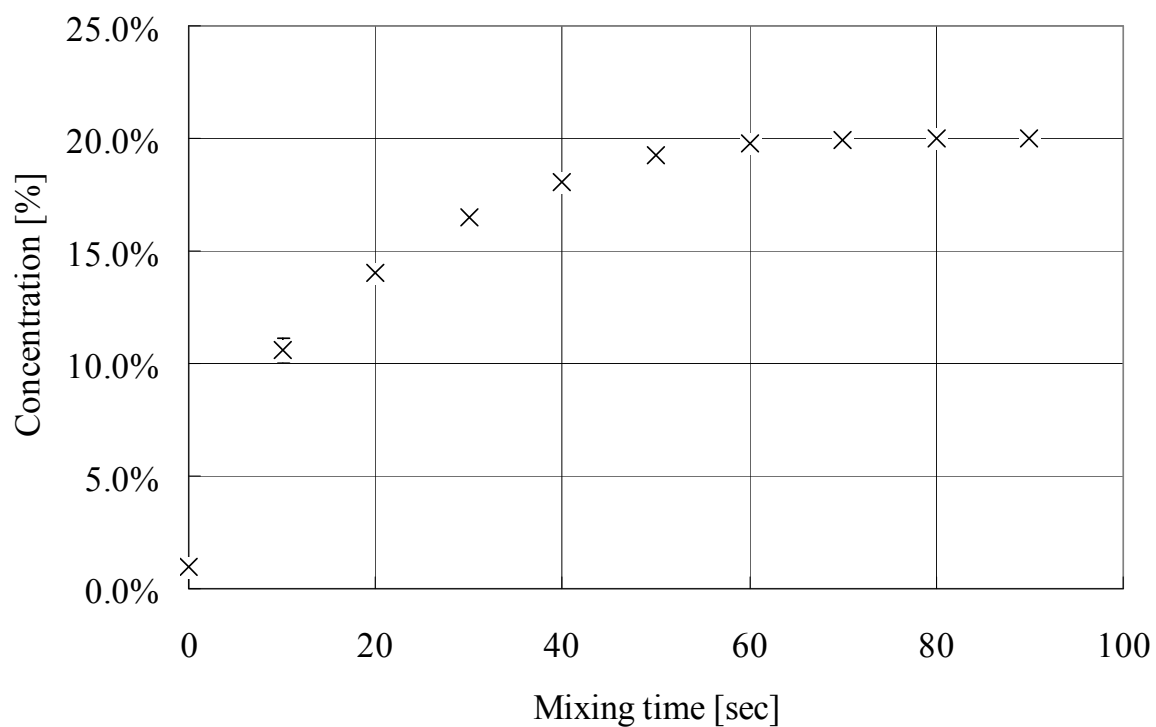


図 B.4 攪拌方法 D による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])

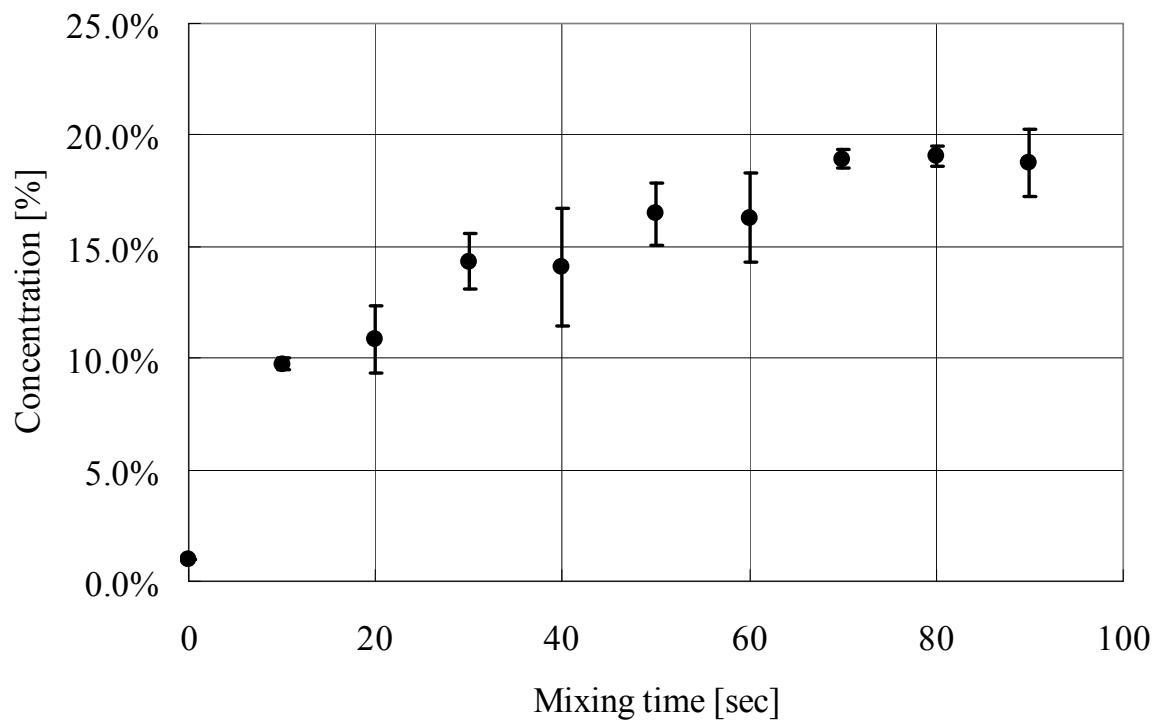


図 B.5 攪拌方法 E による食塩水濃度の時間変化 (2.13[rad/sec])

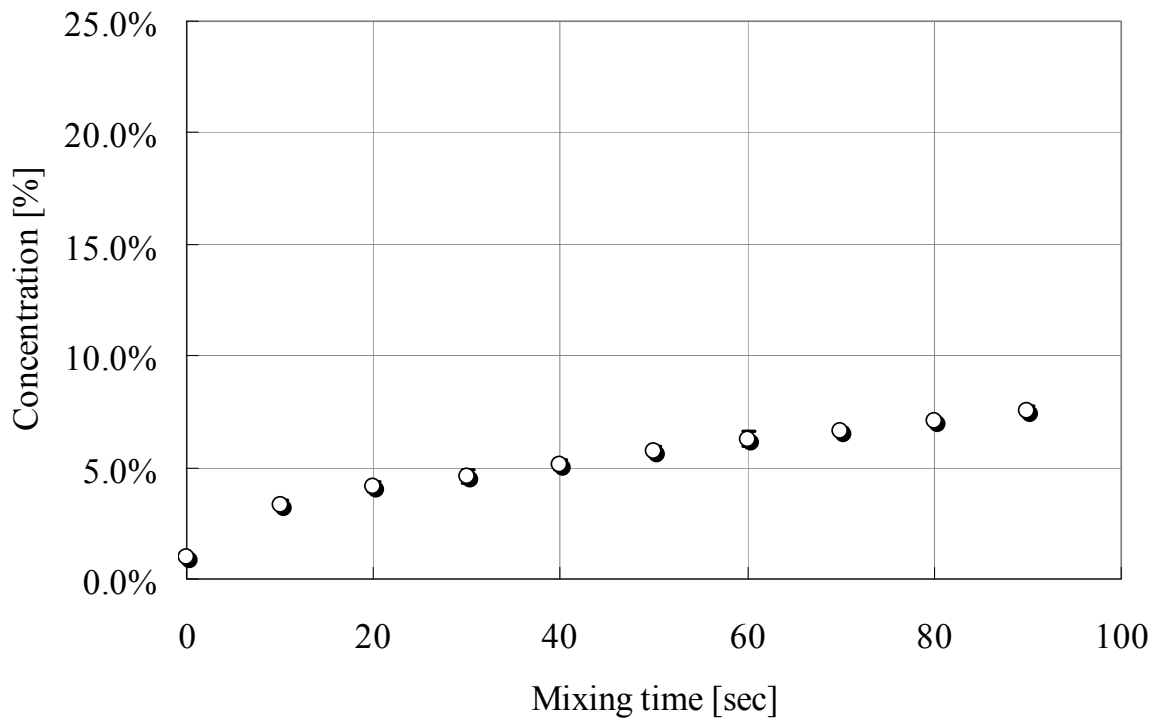


図 B.6 攪拌方法 A による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])

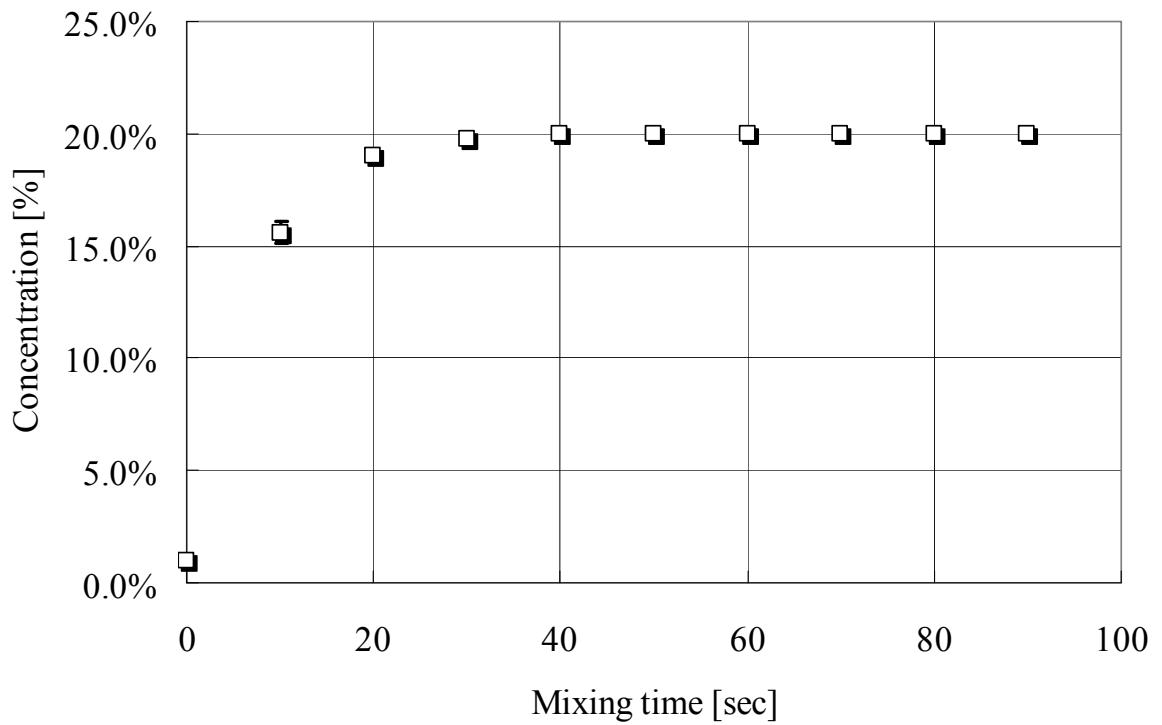


図 B.7 攪拌方法 B による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])

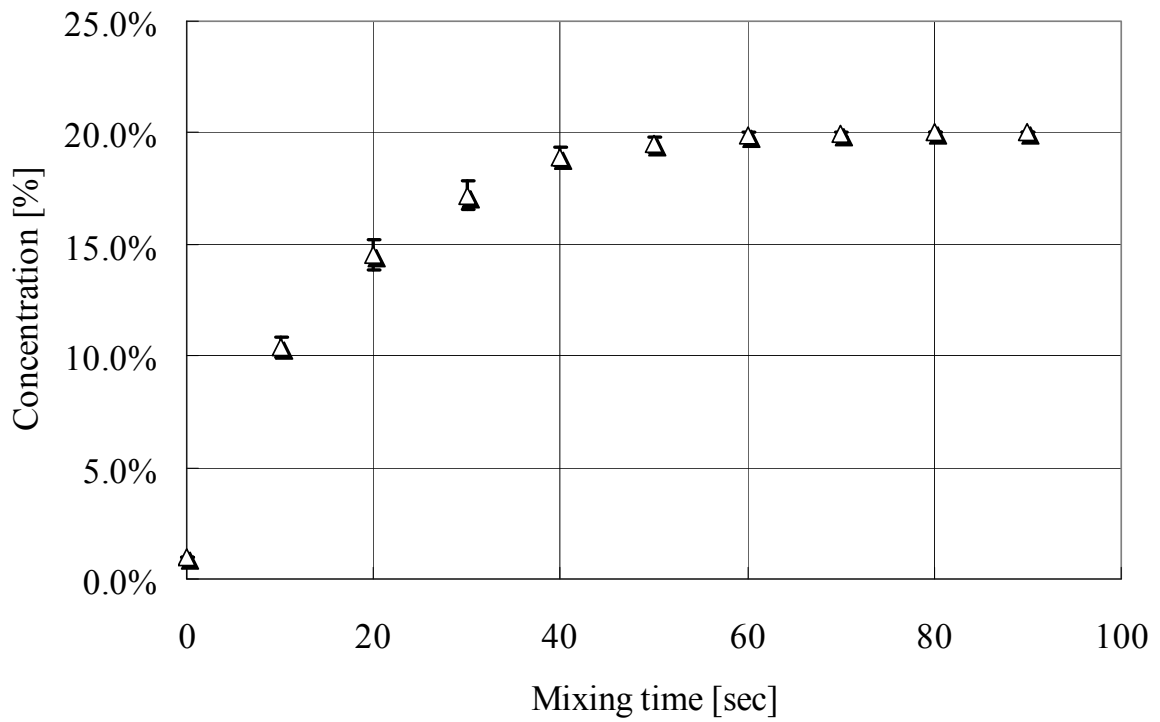


図 B.8 攪拌方法 C による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])

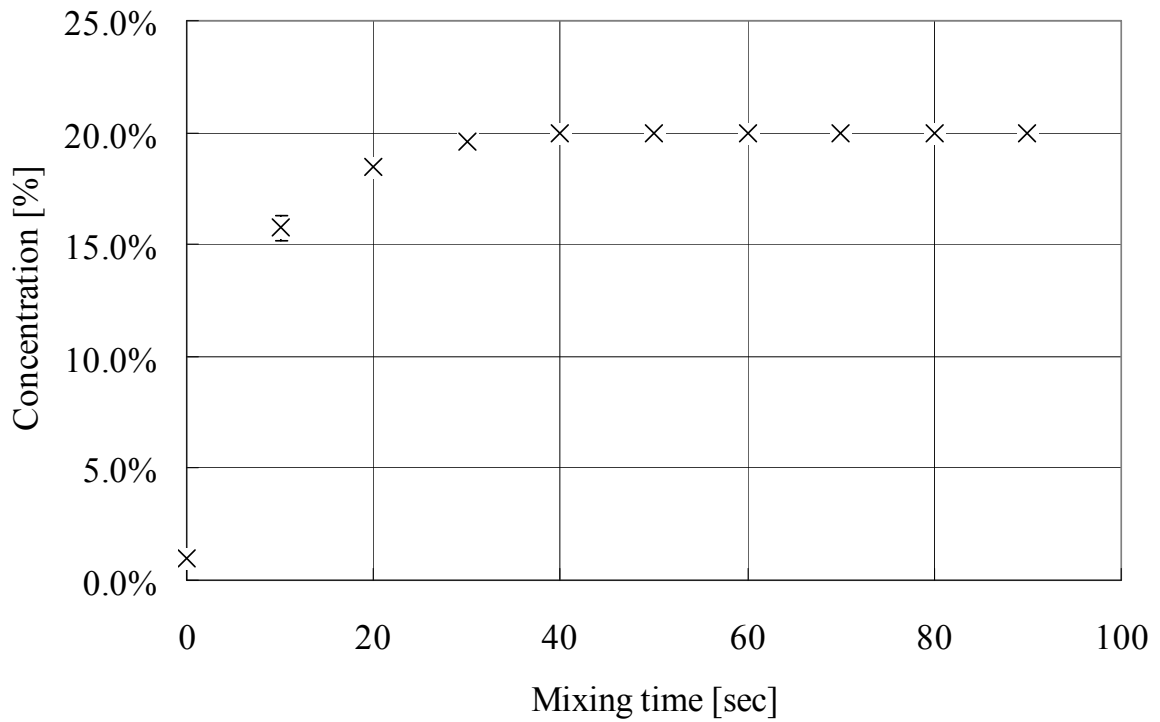


図 B.9 攪拌方法 D による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])

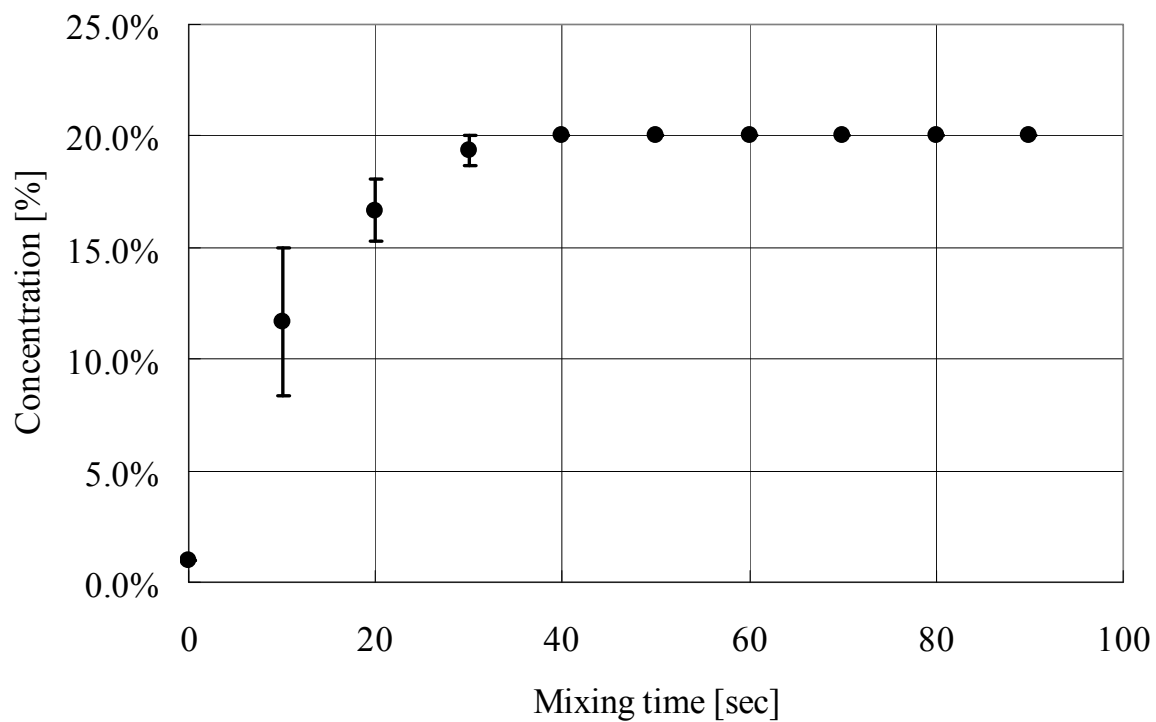


図 B.10 攪拌方法 E による食塩水濃度の時間変化 (5.34[rad/sec])

付録 C 移動台車の走行性能評価実験の実験データ

表 C.1 最大回転速度の測定値 ($\theta=0^\circ$)

可動子の半径[m]	重りの質量[kg]	トルク [Nm]	最大回転角速度[rad/sec]
0.05	0.1	0.049	3.080
0.05	0.2	0.098	3.270
0.05	0.3	0.147	3.270
0.05	0.4	0.196	3.080
0.05	0.5	0.245	3.080
0.05	0.6	0.294	3.270
0.05	0.7	0.343	3.270
0.05	0.8	0.392	3.080
0.05	0.9	0.441	2.690
0.05	1.0	0.490	2.500
0.05	1.1	0.539	2.310
0.05	1.12	0.549	1.920
0.05	1.15	0.564	0.192

表 C.2 最大回転速度の測定値 ($\theta=24.72^\circ$)

可動子の半径[m]	重りの質量[kg]	トルク [Nm]	最大回転角速度[rad/sec]
0.05	0.1	0.049	3.270
0.05	0.2	0.098	3.270
0.05	0.3	0.147	3.270
0.05	0.4	0.196	3.420
0.05	0.5	0.245	3.080
0.05	0.6	0.294	3.080
0.05	0.7	0.343	2.890
0.05	0.8	0.392	3.080
0.05	0.9	0.441	2.690
0.05	1.0	0.490	2.500
0.05	1.1	0.539	2.120
0.05	1.12	0.549	1.710
0.05	1.15	0.564	0.192

表 C.3 移動台車の駆動力 F' の実験値 ($\omega=1.92\text{rad/sec}$)

θ [deg]	F (Theoretical)	F' (Theoretical)	F' (Measured)	
	[N]	[N]	[kg]	[N]
0	10.344	5.678	0.53	5.194
10	10.504	5.838	0.65	6.370
20	11.008	6.342	0.75	7.350
30	11.945	7.279	0.60	5.880
40	13.504	8.838	0.78	7.644
50	16.093	11.427	0.79	7.742
60	20.689	16.023	0.88	8.624
70	30.245	25.579	1.10	10.780
80	59.570	54.905	1.14	11.172

表 C.4 移動台車の駆動力 F' の実験値 ($\omega=2.88\text{rad/sec}$)

θ [deg]	F (Theoretical)	F' (Theoretical)	F' (Measured)	
	[N]	[N]	[kg]	[N]
0	7.710	3.044	0.36	3.528
10	7.829	3.163	0.49	4.802
20	8.204	3.538	0.57	5.586
30	8.902	4.236	0.58	5.684
40	10.064	5.398	0.74	7.252
50	11.994	7.328	0.65	6.370
60	15.419	10.753	0.74	7.252
70	22.541	17.875	0.80	7.840
80	44.398	39.732	0.90	8.820

表 C.5 計測した時間 ($\omega=1.92\text{rad/sec}$)

θ [deg]	1[m]走行する場合の測定した時間[sec]									
	1回	2回	3回	4回	5回	6回	7回	8回	9回	10回
0	12.19	11.13	12.62	11.44	11.76	13.03	11.82	11.13	10.96	10.83
10	11.50	11.27	10.81	11.39	11.42	11.02	11.09	11.32	11.20	11.15
20	11.83	12.22	11.59	11.50	11.57	11.38	11.93	11.95	11.46	12.19
30	13.23	12.85	13.39	12.53	12.98	12.56	13.03	13.33	13.42	13.19
40	16.42	16.27	16.30	16.55	16.61	16.49	16.63	16.14	14.59	14.73
50	17.68	17.67	17.65	17.41	18.47	17.87	18.11	17.57	16.88	17.23
60	21.83	21.63	21.61	22.49	24.93	23.29	24.10	22.91	23.43	24.33
70	33.95	36.18	35.80	32.19	32.50	32.59	32.53	32.36	32.86	34.12
80	69.21	69.92	71.70	78.78	71.69	71.87	73.32	84.68	67.48	68.61

表 C.6 計測した時間 ($\omega=2.88\text{rad/sec}$)

θ [deg]	1[m]走行する場合の測定した時間[sec]									
	1回	2回	3回	4回	5回	6回	7回	8回	9回	10回
0	8.60	9.32	8.32	8.29	8.16	8.48	8.97	9.35	8.27	8.87
10	10.02	9.11	9.40	8.50	8.63	9.13	8.37	8.34	8.44	8.47
20	9.04	9.23	8.45	8.67	10.43	10.05	9.75	9.53	9.13	8.59
30	9.42	9.49	9.09	9.03	9.13	9.01	8.92	9.03	8.93	9.03
40	9.90	9.98	9.79	9.81	10.37	9.97	10.09	10.59	9.93	10.91
50	11.19	11.39	12.14	11.13	11.43	12.32	12.02	12.29	11.74	11.13
60	14.76	15.25	14.52	14.83	14.70	14.48	14.60	14.68	14.89	14.80
70	21.37	21.33	21.57	22.13	21.93	22.36	22.03	21.67	21.64	21.81
80	46.18	47.87	50.53	47.93	52.63	55.41	54.73	58.67	46.08	47.22

表 C.7 平均走行速度と標準偏差 ($\omega=1.92[\text{rad/sec}]$)

θ [deg]	平均走行速度[m/sec]	標準偏差
0	0.086	0.005
10	0.089	0.002
20	0.085	0.002
30	0.077	0.002
40	0.062	0.003
50	0.057	0.001
60	0.043	0.002
70	0.030	0.001
80	0.014	0.001

表 C.8 平均走行速度と標準偏差 ($\omega=2.88[\text{rad/sec}]$)

θ [deg]	平均走行速度[m/sec]	標準偏差
0	0.116	0.006
10	0.114	0.007
20	0.108	0.007
30	0.110	0.002
40	0.099	0.003
50	0.086	0.004
60	0.068	0.001
70	0.046	0.001
80	0.020	0.002

論文リスト

学術誌掲載論文：

- [1] 五福明夫, 单万里, 柴田光宣, 山西輝裕, 亀川哲志, “球面モータ駆動の攪拌器の開発”, 日本機械学会論文集 (C編) Vol.77, No.778(2011), pp2400-2406.
- [2] 单万里, 五福明夫, 亀川哲志, 柴田光宣, “球面モータを用いたホロノミック全方向移動台車の開発と球面減速駆動方式の提案”, 日本機械学会論文集 (C編) Vol.77, No.784 (2011), pp4630-4640.

口頭発表：

- [1] Wanli Shan, Keiji Nagatani, Yutaka Tanaka, “Motion Planning for Mobile Manipulator to Pick up an Object While Base Robot's Moving”, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, No.307(2004), pp.350-355.
- [2] Wanli Shan, Akio Gofuku, Mitsunobu Shibata, Tomoaki Yano, Tetsushi Kamegawa, “A Stirrer Driven by a Spherical Stepping Motor”, Proceedings of the 15th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) (2011), pp.1-6.
- [3] 单万里, 永谷圭司, 田中豊, “移動しながら物体を把持する移動マニピュレータの動作計画”, 第20回 日本ロボット学会学術講演会予稿集(2002), 3B33.
- [4] 单万里, 永谷圭司, 田中豊, “走行しながら物体を把持する移動マニピュレータに関する研究 --- 第2報：手先の実現可能速度を評価関数とする動作計画 ---”, 第21回 日本ロボット学会学術講演会予稿集(2003), 2I14.
- [5] 单万里, 永谷圭司, 田中豊, “走行しながら物体を把持する移動マニピュレータに関する研究 --- 第3報：動作の実装 ---”, 第22回 日本ロボット学会学術講演会予稿集(2004), 1B26.
- [6] 单万里, 前山祥一, 永谷圭司, 田中豊, “走行しながら物体を把持する移動マニピュレータに関する研究 --- 第4報：実現可能速度の検証 ---”, 第15回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集(2006), pp.46-47.
- [7] 单万里, 五福明夫, 山西輝裕, 柴田光宣, 亀川哲志, “球面ステッピングモータ駆動の攪拌器の開発”, 第55回システム制御情報学会研究発表講演会(2011), H12-1.