

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：31302

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760234

 研究課題名（和文） 実用性能を有する高出力球面誘導モータの開発と  
一球車輪型全方向移動車いすへの応用

 研究課題名（英文） Development of a Spherical Induction Motor with Practical Output  
and its Application to Uniwheel-type Wheelchair

研究代表者

熊谷 正朗（KUMAGAI MASAOKI）

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70323045

研究成果の概要（和文）：従来の球面モータに比べて出力が大きい、3自由度に角度制限なく回転する球面誘導モータを開発した。トルクは最大 5Nm、球面での推力換算で 40N を出力でき、かつ指令から力出力の安定まで 10ms 未満という応答性を持つなど、移動ロボットの車輪などに使用可能な性能を実現した。

また、光学式マウスセンサによる球体の運動計測を併用して、角速度制御、角度制御を実現し、トルク出力と合わせて応答特性を測定し、性能を明示した。

研究成果の概要（英文）：A spherical induction motor with practical characteristics was developed. It can be driven in 3 DOF with no limitation in rotational angle. The motor has 5Nm maximum torque, that is 40N thrust on the surface, with less than 10ms response. It is applicable to a wheel drive of a mobile robot. With laser mouse sensors, the angular velocity feedback control and the angular posture control of the sphere were implemented. The characteristic of the torque output, the angular velocity and posture control was demonstrated through experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス メカトロニクス 球面モータ 球面誘導モータ 平面モータ ベクトル制御 3自由度アクチュエータ 玉乗りロボット

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者熊谷、および、研究協力者である米カーネギーメロン大学ロボット研究所の Ralph L. Hollis 教授は、ともに球体を唯一の車輪とするロボットを開発研究していた。熊谷らの開発した玉乗り型ロボット BallIP は、浅間らによる全方向移動ロボット用の特殊車輪 3 個で球体を 3 自由度に回転させて、バランス制御・移動・旋回を実現した。一方、Ralph らの ballbot は直交する方向に配置した 4 本のローラで球を赤道位置

で挟んで 2 自由度に回転させ (IMBD 機構)、機体内の機構で yaw 軸まわりに旋回させた。その後、一球移動式のロボットは複数が開発されているが、基本的にいずれかの方法を採用している。しかし、これらの方法は球を回転させるためにある程度複雑なメカを要し、メンテやコストの点で多少の難がある。また摩擦で駆動するため、動力伝達の不安もある。

そこで、Ralph は球の駆動に球面モータを用いれば、可動部が球のみとなり、シンプル化すると考えていたが、その時点で、要求仕様を満たすモータの開発例は発表されてい

なかった。具体的には、(1)3自由度の制限のない回転 (2)表面推力に換算して50N程度のトルク、(3)表面速度で1m/sを超える速度、(4)倒立振り制御に必要な応答性 が必要であり、モータの方式によって部分的に実現したものはあったが、兼ね備えたものはなかった。Ralphは既存の球面モータ研究の中から球面誘導モータが有望と考えており、熊谷がその案の実現を目指す形で本研究を2009年に開始した。

本課題の開始の時点で、マウスセンサによって球面の運動計測を行う手法と、要素となるリニアモータの設計制御手法については実現しており、多自由度化と球面の駆動が本課題の目的となる。

## 2. 研究の目的

前節の背景を受けて、本研究の主目標は実用的な性能を有する球面誘導モータの開発であった。

また、その実用面の検証をかねて、車いす型のロボットの開発を目的としていたが、後述のように、特性の検証を優先するため、計画を延期している。

## 3. 研究の方法

### (1) 平面誘導モータの開発

球面モータの試作に先行して、多くの点で共通性のある3自由度平面誘導モータの開発に取り組んだ。

後述のように、球面誘導モータの開発において誘導球面ロータが主要部品であるが、試作の手間、コストの面から試行錯誤する余裕がない。そこで、あらかじめ平面モータにおいて検証した。平面は半径無限大の球面の一部と解釈できるため、原理、制御面で平面での3自由度が実現できれば、球面に移行しやすい。合わせて応答性や制御性の評価を行うことで、球面モータとしたときの想定外を低減した。

### (2) 球面誘導モータの開発

平面モータの開発により、制御則などの点で問題ないことを確認した後、誘導球面ロータの試作を開始した。平面の段階で動作を検証したりアクションプレートの厚さより球面の仕様を決定し、絞り加工専門の企業に相談し実現性を検証、試作を依頼した。

球の試作後、平面モータで実績のある電機子を球面に合わせる形状に設計変更し、試作して球面モータを構成した。これにより後述のような性能を得た。このような手順の開発により、効率よく研究を進めた。

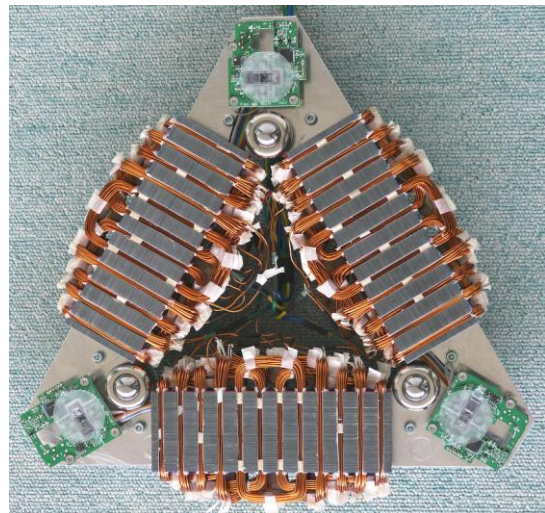
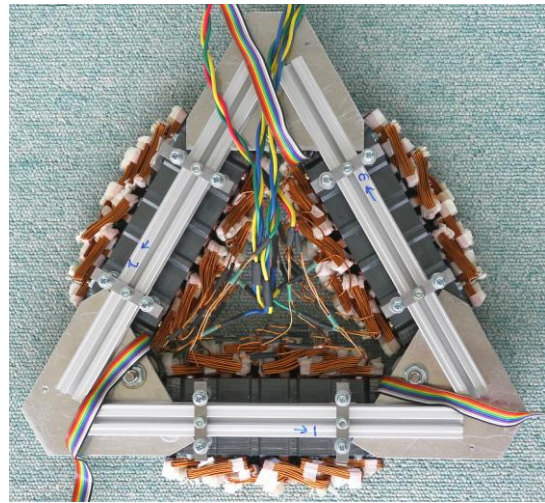


図1 平面誘導モータ

### (3) 車いす型移動体の開発延期と特性測定

モータ本体の試作および初期の特性測定によって、バランス制御および移動の点で倒立振り型のロボットを試作することには問題が無いと判断したが、実際の開発は本課題の期間後に延期した。主な理由は試作モータの耐衝撃性に対する懸念である。モータとして卓上において回転させるには申し分ないが、衝撃を与えるとコイルとコア材やフレームの接触で障害が生じることが確認された。バランス系ロボットの制御実験では転倒がつきものであり、本モータの質量も考慮するとモータ本体へのダメージが否定できない(従来の玉乗りロボットでも転倒時に破損する場合があった)。

一方、本モータの特性をより明らかにすることにも重要性があり、本課題の後続の課題では特性測定に焦点を当てた。よって、その前段の検証を優先することとし(後述の研究成果にも含む)、モータのスペアの製作に目処がつくまで、バランス型の開発は延期することとした。この点は当初の計画と差異のある点である。



## 4. 研究成果

### (1) 平面誘導モータの開発

球面モータの中間段階として、平面誘導モータを開発した(図 1)。このモータはリニア誘導モータ電機子を 3 機、正三角形に配置したものであり、個々の電機子の推力を適切に指令することで、任意の並進方向への推力と平面上での回転のトルクを同時に出力することができる(それゆえ単体で 3 自由度のモータである)。

手法の詳細は後述の発表論文に記載しており、概要を述べる。各電機子には独自に開発したベクトル制御コントローラによって各々に 3 相交流電流を供給する。これにより、コントローラへの指令値に比例した推力を電機子コイル配置の方向に対して発生することができる(応答性と指令に対する直線性は別途検証していた)。これを正三角形に組み立てると、各電機子の推力はモータ全体の並進力および中心周りの旋回トルクに寄与し、3 個の電機子の合計が全体出力となる。これは数式上は、電機子のモータ内の位置ベクトルと、推力の方向ベクトルから計算されるベクトルに推力指令値を乗じた線形結合の形式で表され、3 元一次方程式の形を取る。よって、目的とする推力・トルクを与えて方程式を解く(逆行列を乗じる)と各電機子の指令推力が決定される。

モータの位置および旋回(回転)は、底面に取り付けられた光学マウス用のセンサの計測値から求める。これを元に、PID フィードバックによってモータの推力を操作し、速度制御、位置制御を実現した。

得られた出力は最大推力 70N、最大トルクは 9Nm である。また、指令から力出力までの応答時間は 10ms 未満であり、速度や位置のフィードバック制御を組み合わせることができる。フレームやフィードバック用のマウスセンサを含めた寸法は半径が 180mm、質量は 5kg 程度である。推力が重量(5g)よりも大きいため、(1)水平面での最大加速は 1g を超え(実測値で 12m/s<sup>2</sup>)、(2)鉛直面を含む急傾斜面でも移動可能、である。

その応用性の確認のため、レーザーレンジファインダを取り付けた移動ロボット、2次元の倒立振子を試作したほか、逆に床面に平面誘導モータを埋め込んだ台車搬送システムを試作した。

### (2) 球面誘導モータの開発

本研究の主たる成果として球面誘導モータを開発した(図 2)。最大トルクは 5Nm、表面での推力に換算して 40N、応答速度は 10ms 未満であり、トルク指令、速度指令、角度指令が可能である。前述の平面誘導モータとの違いは、(1)平面→球面となったこと、(2) 3

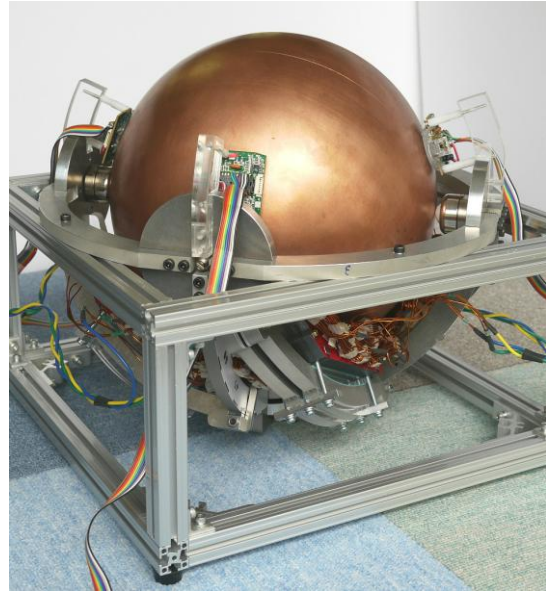


図 2 球面誘導モータ

個を超える電機子でも 3 自由度の指令を分配できるようにしたことである。

前者のためには、球面の誘導体ロータと球面にフィットするように設計した電機子を用意した。誘導モータは、電機子と対向して、銅と鉄からなる誘導体が必要である。平面誘導モータでは、鉄板の上に銅板を重ねたリアクションプレートを用いた。鉄板は電機子のコアとともに磁気回路を形成し、磁力線を銅板内に導く役割があり、銅板は交流磁界中で誘導電流を生じ、この誘導電流と磁界の相互作用で推力が生じる(つまり、推力は電機子と銅板の間で生じる)。球面誘導モータではこの部分を球面にする必要があり、大きな課題の一つであった。これについては、へら絞り加工を得意とする、(株)北嶋絞製作所に試作を依頼して実現した。鉄と銅の 2 層の球殻(中は中空)とし、内層は鉄(鋼板)t3.8mm、外層は銅 t1.8mm、外径は 246.2mm である。

この誘導球ロータに対応する電機子は、平面誘導モータのものと同様同じ寸法で、コアの形状を球面に合わせて 2 方向に湾曲させた。コアは t0.5mm の電磁鋼板をレーザー加工で切断し、積層したものであるが、その各層の形状を円弧状とし、かつ半径の異なる 5 種類の板を積層した。

この段階で電機子が 3 個の場合は平面誘導モータと同じ計算ができる。個々の電機子はその円弧の中心軸に対しての回転トルクを誘導球に生じさせる。その合計値が本モータで球に作用するトルクとなり、先の平面モータと同様に連立 1 次方程式となり、逆行列を乗じることで求まる。しかし、トルクの向上や電機子配置の空間配置を考慮して、今回は電機子 4 個の球面モータを作った。この場合は、式が 1 本不足する 4 元 1 次方程式となるため、疑似逆行列によってその解を求める

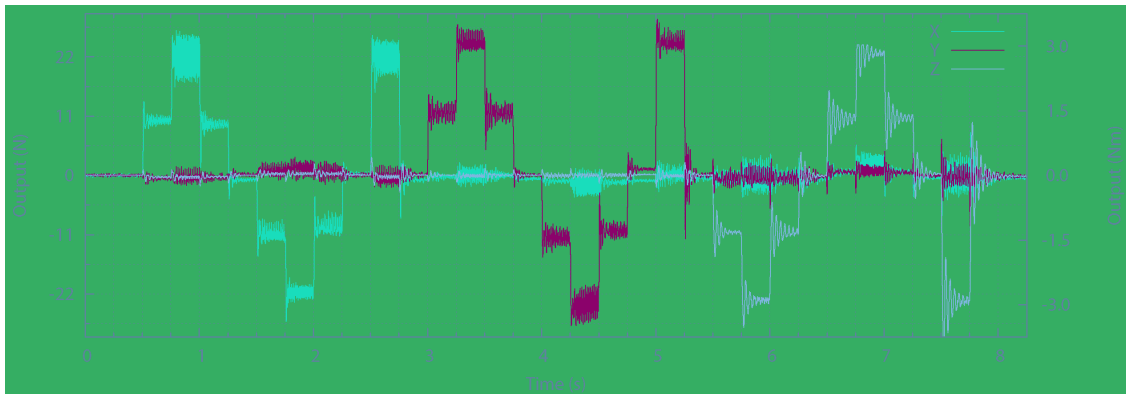


図3 トルクのステップ応答

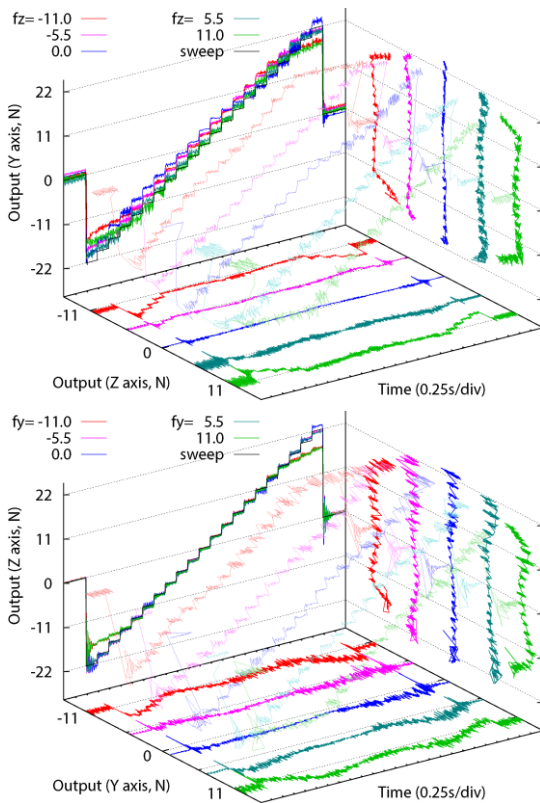


図4 2軸のトルク指令への応答

手法をとった。

以上の手法によって、3自由度のトルク出力が同時に可能な球面誘導モータが実現した。また、マウスセンサによる球体の角速度、姿勢角度の測定を併用しており、これをフィードバックすることによって、角速度指令、角度指令も可能なアクチュエータとした。

### (3) 球面誘導モータの特性

以下にモータの評価データの一部を掲載する。図3はモータの3軸のトルクの個々のステップ応答を6軸力覚センサにより得たものである。本モータは試作段階で定格出力にあたるものではなく、確認した範囲の最大出力の約50%のステップとした。また、この測

定においては、ロータは力覚センサ経由で回転しないように固定されている(回転時の特性は引き続き別課題で研究を継続している)。この結果により、3軸のトルクが独立して操作できることと応答性が検証できる。図4は2軸に同時に推力指令を出した場合のトルクを同様に測定した結果である。各々水平の軸(Y)と鉛直軸(Z)周りのトルク(表面推力換算)であり、一方は一定値を5種類、他方は指令値を21段階にスイープしたものである。スイープへの追従がほぼ直線的であることから、トルク出力が適切に行われていることが確認できる。

図5および図6は角速度制御および角度制御における応答であり、指令には各軸独立の2段階のステップと、複数軸同時の正弦波を用いた。角速度制御においては180deg/sの指令変化に対して0.2s未満で追従し、角度制御では22.5degのステップに対して0.3s未満で静定した。

### (4) 研究成果の意義

従来、球面モータの研究は多数あり、球面誘導モータも50年以上前から事例がある。しかしながら、従来の成果では原理の検証はされても性能面への言及が少なく、また実用を想定した特性は示されていない。それゆえ、本課題研究を開始し、明確な結果で性能を示した。その性能は移動ロボット用を指向した仕様を設定し、ほぼ達成した。

一方で球体の支持方法や実際にロータを車輪とする場合の課題、また誘導モータとしては原始的な構造であることに起因する効率の低さは今後の課題である。しかし、ほぼ既存の製造技術のみでハードを製作し、ソフトの工夫によって実現したモータであるため、民間企業への技術移転も容易であり、既存のモータメーカーが本格的に取り組みが多めに改善が進むと期待する。ただし、球面モータの3自由度の特性を同時に測定する手段は現状では知られておらず、モータと同時に評価方法を用意することが重要と考え、引き続き研究を進めている。

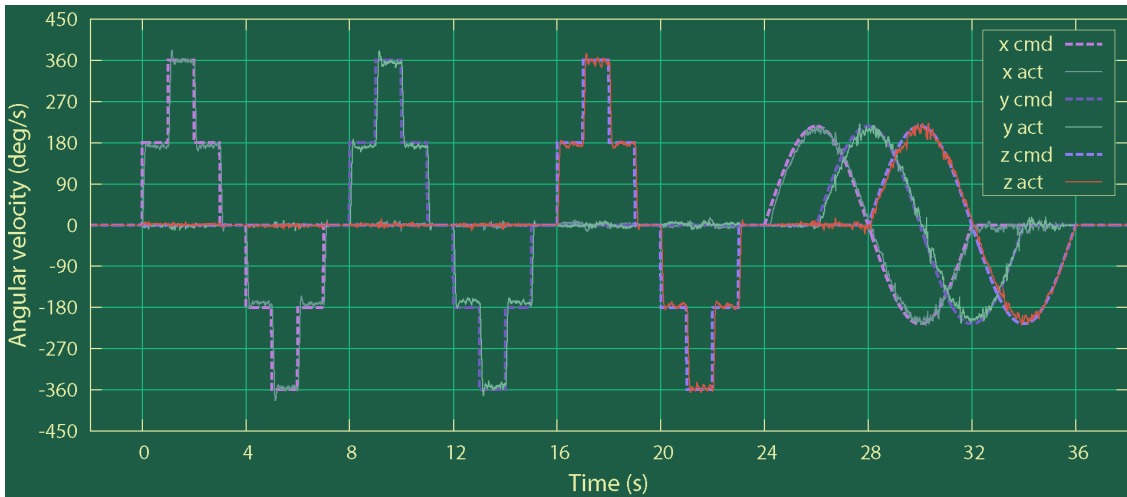


図5 速度フィードバックの応答特性

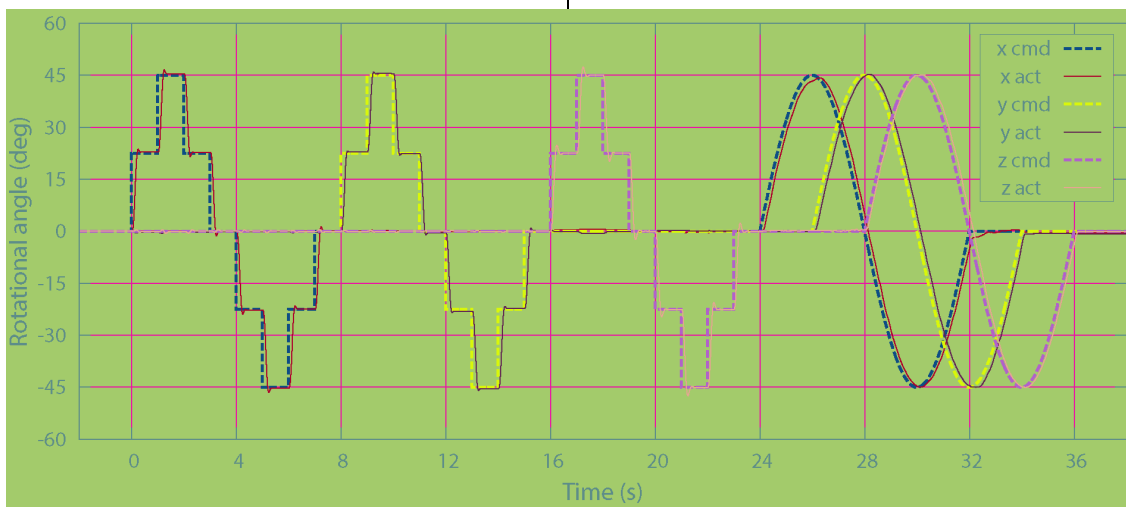


図6 角度フィードバックの応答特性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

(1) Masaaki Kumagai and Ralph L. Hollis : "Development and Control of a Three DOF Spherical Induction Motor", 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2013), 2013年5月7日, カールスルーエ・ドイツ

(2) 熊谷正朗 : "球面誘導モータのストールトルク特性の評価", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会(Robomec2013), 2013年5月24日, つくば

(3) Masaaki Kumagai and Ralph L. Hollis : "Development and Control of a Three DOF Planar Induction Motor", 2012 IEEE International Conference on Robotics and

Automation (ICRA2012), 2012年5月17日, セントポール・アメリカ

(4) 熊谷正朗, 加茂雅人, 堀川みなみ, 八巻昌宏 : "平面誘導モータの開発と応用機器のテスト講演会(Robomec2012), 2012年5月29日, 浜松

(5) Masaaki Kumagai and Ralph L. Hollis : "Development of a Three-Dimensional Ball Rotation Sensing System using Optical Mouse Sensors", 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011), (※震災の影響により映像による発表)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称 : Spherical induction motor  
 発明者 : Ralph L. HOLLIS, Masaaki Kumagai  
 権利者 : 同上

種類：特許

番号：W02013025499 A1

出願年月日：2012年8月10日

国内外の別：国際(米国より出願)

[その他]

<http://www.mech.tohoku-gakuin.ac.jp/rde/>  
ほか

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

熊谷 正朗 (KUMAGAI MASAOKI)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70323045

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：