

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420221

研究課題名(和文) 高出力球面誘導モータの性能評価手法の開発と実用性向上のための制御性向上

研究課題名(英文) Development of performance evaluation method of a high-power spherical induction motor and improvement of control

研究代表者

熊谷 正朗 (KUMAGAI, Masaaki)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70323045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では球面モータの動力評価、効率評価に必要な回転中のトルク計測手法を提案、実証した。従来のモータと異なり、球面モータは3自由度、すなわち三つの空間軸周りの回転の自由な組み合わせで回転でき、トルクも同様で、かつ両者の軸方向が同一とは限らない。そのため、従来は同時に測定する手法が見られず、開発中の球面誘導モータの性能評価、改良のために、6軸力覚センサと、機械的な球体の駆動装置の組み合わせにより実現した。

研究成果の概要(英文)：This work provides a method to evaluate torque of spherical motor while it is rotating. Compared to common one-axis motors, spherical motors have three degree of freedom, meaning rotation around arbitrary axis by combining three axes rotation. The torque also has three DOFs, which may not coincide with rotational axis. However, to the best knowledge, there is no way to measure all DOFs simultaneously while it is required for evaluation of spherical motor including power and efficiency. Therefore, for our developing spherical induction motor, the proposed method was developed by combination of 6-axis force/torque sensor and drive mechanism that rotates the rotor externally.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：球面モータ 球面誘導モータ トルク計測手法 動力測定 6軸力覚センサ 玉乗りロボット

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は玉乗り型ロボット等に用いる球面誘導モータの開発を行い、本研究開始当初で動作する物を実現していたが、その性能評価が十分には行えていなかった。一般にモータの性能を評価する場合、その速度、トルク、それらの積である出力動力、効率などを用いる。従来からある1軸のモータの場合は、トルクと速度の出力が同一軸上にあり、たとえば、トルク計で測定しつつ、出力をダミー負荷に吸収させるなどして測定できるが、球面モータの場合は大きく異なる。まず、回転速度、トルク出力とも、単純な1軸の回転ではなく、三つの軸周りの回転を合成した、任意の軸周りの回転、任意の軸周りのトルクとなり、かつ回転軸とトルク軸は異なっても構わない。加えて、1軸のモータは出力の測定装置を回転軸上に接続すれば良いが、球面モータで移動しない点は球の中心であり、そこに測定器を置くことができない。これらのことから、球面モータの評価方法はほぼ見られなかった。

## 2. 研究の目的

上記背景を踏まえ、本研究の目的は球面モータの評価手法の開発とそれによるモータの性能向上であった。まず、開発したモータの回転中のトルク出力を測定することで、モータが想定原理通りに動作しているかの確認をする(速度は既に測定できており、静止時のトルク測定も試みていた)。回転中のトルクが測定できれば動力が算出でき、効率という点でも定量評価ができるため、評価に基づく改良が可能となる。

## 3. 研究の方法

後述の研究成果に具体的な方法は述べるが、モータの回転中の性能評価をするには、回転中のトルクの測定手段と、モータの生成した動力を受け止める手段が必要であり、かつモータの回転速度を測定用の速度に保つための何らかの制御機構が必要である。そのため、本研究では、この三つの手段の開発を行った。

まず、そもそもこれらの手段には複数の候補があり、その組み合わせが必要である。そのための方針として、(a)モータ自身の速度制御で一定速度で回転させるようにしつつ、外部から負荷トルクを与えて、その負荷に釣り合うトルクをモータに出力させることで一定の動力出力状態を作る手法(一般的なモータの評価方法でも用いられる)(b)モータを外部から一定速度で回転させつつ、モータのトルク制御モードで、モータにトルク出力をさせる手法(一般的なモータで回生なども含めた評価を行う場合には必要な手段)という2案を検討し、原理の検証を行った。前者のほうが技術的に容易と考え、申請段階でもこれを主たる方法として記載していた。しかし、実際に摩擦による負荷機構を試作してみた

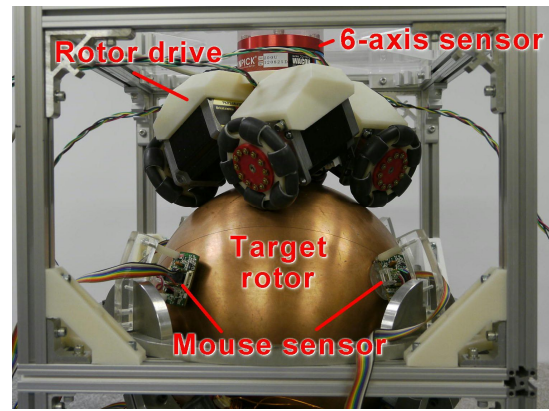


図1 開発した測定装置。球面モータ本体に、外部からの球面駆動装置(Rotor drive)を介して、6軸力覚センサ(6-axis sensor)を接続し出力トルクを測定する。

ところ、安定して摩擦力を維持することが難しいことが分かった。もともと測定範囲にも制約があったことから、後者の外部機構によって回転させる方法に移行した。この際、駆動系としては計画段階で検討していた手法とは異なる、玉乗りロボットの駆動系を基にした方法を採用し、目的を達成した。

## 4. 研究成果

### (1) 球面モータの評価手法の提案・実証

上記の目的のため、球面モータの回転中の動力測定を目的とした計測手法を実現した。具体的には、既発表の玉乗りロボットと同様の、全方向移動ロボット用の車輪を用いた駆動系と6軸力覚センサ(3方向の力と3軸周りのトルクを測定するセンサ)を用いる。

測定対象は回転中のモータの出力トルクと、その回転の角速度である。球面誘導モータ用にマウスセンサを用いた球面の角速度測定手法は確立しており、トルクの測定と測定環境が検討対象である。また、モータの出力するトルクはそのままではモータの加速につながるため、ある程度速度(一定の速度)での測定のためには、そのトルクを受け止め、動力を吸収する要素が必要となる。

まず、トルクの測定は、理想的にはトルクの出力軸上に置けば良いが、球面モータでは任意の回転に対する軸上は球の中心であり、測定機器を置くことはできない。そこで、球面の外部から間接的に測定する必要がある。これに6軸力覚センサを用い、その計測値からモータのトルクを算出する方法を提案し、実機にて動作を確認した。

定常回転中の測定については2案を検討した。測定のためには、モータが一定速度で回転しつつ、トルクを出力する状態を維持する必要がある。一つ目の案はモータに外部から調整可能なブレーキを掛けつつ、モータに速度制御を施す。モータは一定速度を維持するためにブレーキによる外力と釣り合うだ

けのトルクを出力する必要があり、このブレーキの調整によって間接的に所望のトルクを出力させる方法である。この方法は構造的に簡単と考えて当初に実験機を試作検討したが、安定した制動力を生じさせることが難しく、また実現したとしても測定できる条件に限られる(あくまでブレーキであり、速度と大きく異なる方向へのトルクが出力できない)。そのため、実現を断念した。

もう一つは外部から一定速度で強制的に回転させた上で、トルク制御されたモータでトルクを出力することであり、最終的に実現した手法の原理である。この手法には外部から球を回転させる機構が必要となる。たとえば、球面誘導モータの電機子セットをもう一組用意し、一方を被測定、一方をこの外的回転に用いる案があり、計画段階での第2案としていた。対して、本研究では、玉乗りロボットに用いた球体駆動系を用いた。すなわち、全方向移動ロボットなどに用いられる特殊な車輪を複数、球面に接触させ、これをモータで回転させる。この方法をとったことで、球面誘導モータに限らず、球体ロータを持つ各種球面モータに適用できる。個々の車輪の速度は、目的の角速度から算出でき、その合成として球が回転する。この機構を力覚センサと球の間に置き、回転させながらトルク測定を行うようにした。なお、この外部からの一定速度の回転機構は、モータのトルクを全て受け止めることになり(さもなければモータは加減速するため)、モータの動力の吸収をここですることになる。

### (2) 球面誘導モータの効率測定

上記実験装置により球面誘導モータの効率を測定したところ、効率は数%にとどまることが確認された。もともと、誘導モータとしても単純な構造であり、効率が低いことは想定していたが、かなり低いといえる。逆に、改善の余地がかなりあることから、後続の研究では効率化を図ることにした。

### (3) 本研究に関連して開発したもの(上記外)

#### 駆動系用の車輪

既存の玉乗りロボットの車輪は理化学研究所の特許を用いて独自設計したものであったが、これより小型化、軽量化が求められ、また、モータのトルクを受け止めるだけの摩擦が要求されたことから、再開発した。部品を射出成形の樹脂製とすることで軽量化と生産性の向上を図った。また摩擦確保のため、熱収縮チューブでローラ部品を覆うことができるような構造とした。

#### 球面誘導モータの電機子

評価対象として、本研究と平行して、モータの主要部品である電機子(金属製のコアにコイルを複数巻いた部分)の民間企業による製造が可能かを確認し、実際に製造委託をした。新開発のモータであり、巻線形状が特殊であることから、これまでの試作は学内で自らの手によっていたが、手間のかかるもので

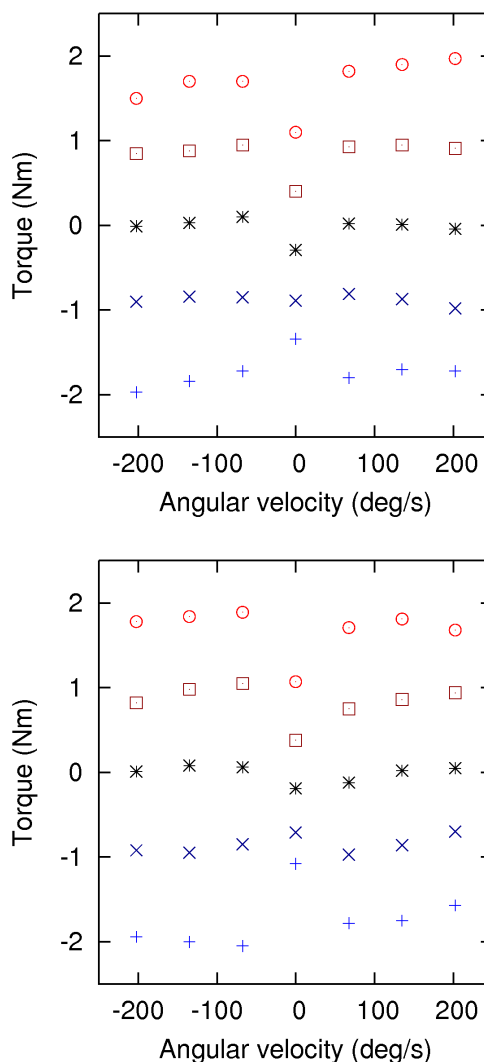


図2 モータトルクの測定の事例。図は球面誘導モータをx軸まわりに所定の角速度で回転させた場合の、x軸とy軸(xに直交)まわりのトルクの実測値(5段階の出力指令)であり、速度にかかわらずほぼ一定の指令に比例したトルク出力を得られていることが確認できた。

あった。そこで、モータの試作を行う企業に相談、3次元プリンタで製作した模型などを提示して、製造を依頼できた。限定的ではあるが性能評価により、既存機より出力が上がったことが確認できている。球面は当初から学外企業によっており、モータの必須要素が民間製造可能、すなわち第三者が本モータを必要としたときに入手できるようになったといえる。

上述のように、球面モータの評価の提案実証、およびそれに付随した技術開発を行った。なお、評価手法の開発に遅れがあり、当初の目的にあったモータの改良までは有効な成果が得られていない。この点は後続の研究にて取り組む。

## 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 2件)

Masaaki Kumagai “Torque Evaluation Method of Spherical Motors using Six-Axis Force/Torque Sensor”, Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2016), 2016年5月18日, スtockホルム(スウェーデン)

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 2013、2013年5月24日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

熊谷 正朗 (KUMAGAI, Masaaki)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70323045

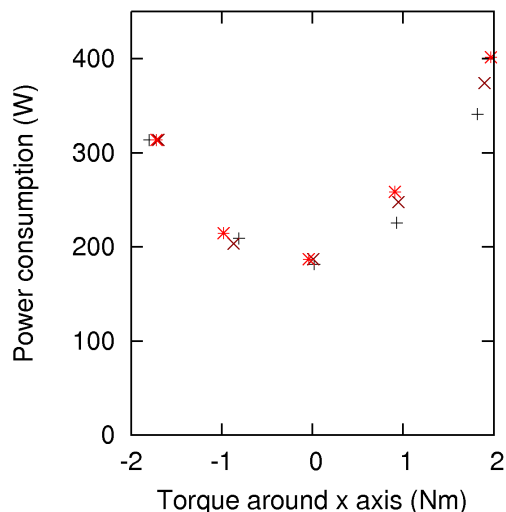


図3 取得したモータのトルクと電力消費の関係。x軸まわりに回転させつつx軸周りにトルクを生成した場合である。回転速度は一定のため、横軸トルクと動力は対応する。大きなトルクを出力するための励磁によりトルクが大きいほど電力消費が大きくなる(トルクゼロでも磁界生成に必要な消費がある)が、回転方向とトルクが一致する場合(駆動側)、逆方向(制動側)で消費に差があることが確認できる。これは制動時には回生的挙動が含まれることによると推察される。