小球を一つ用いた球面減速機の出力球の回転計測

Measurement of rotation of output ball in a spherical speed reducer using one small ball

角南 尚幸^{*1}(学生員), 五福 明夫^{*1}, 矢野 智昭^{*2}(会員), 笠島 永吉^{*3}

Naoyuki SUNAMI(Stu. Mem.), Akio GOFUKU, Tomoaki YANO (Mem.), Nagayoshi KASASHIMA

In order to construct a system with multi-degree of freedom by only using the motors with one degree of freedom, the same number of motors as the degree of freedom is required. On the other hand, in a spherical motor with three degrees of freedom, it is possible to realize a system with three degrees of freedom by only one spherical motor, and it is possible to reduce the size of the system. However, in many spherical motors driven by electromagnets, a spherical speed reducer is required as a device to extract and transmit the output torque. The spherical speed reducer considered in this study is composed of an output ball and an intermediate small ball to transmit the torque from the rotor. In the mechanism of the spherical speed reducer, a model of the rotation transmission to control suitably the rotor is required for a desirable rotation of the output ball. The purpose of this study is to measure angular velocities of the small ball and the output ball in order to derive a rotation transmission model. The angular velocity of each ball is measured using two optical mouse sensors. From the measurement results, a valid rotation transmission model is derived.

Keywords: spherical speed reducer, rotation transmission model, optical mouse sensor

(2017 年 10 月 26 日受付, 2018 年 1 月 29 日再受付, 2018 年 3 月 22 日再々受付)

1 緒言

一般的に多自由度の回転を行う機械システムの実現には 1 自由度のモータが用いられる。しかし、近年機械システムには、柔軟な動きが求められており、必要とする自由度数は増加し続けている。通常の 1 自由度のモータによる柔軟な動きの実現のためには、モータの使用数が増えて、機械システムは大型化、複雑化するという問題を有している。この問題に対処するために、多自由度アクチュエータの研究が行われており^[1]、その一つとして球面モータの実用化が期待されている^[2,3]。

球面モータは一つで 3 自由度を持つため、1 自由度のモータの場合と比べてモータの使用数を減らせることから、機械システムの小型化、軽量化が見込める。また、球面モータは、各回転軸の回転中心が一致していることにより、目標姿勢への制御を簡単化でき、組み付け誤差や難メンテナンス化による超高精度位置決めシステムの実現への困難さの解消が可能である。そして、可動子部分が球体であることから、余分な機構を除いた直接的な駆動を実現可能という特徴^[4]により、

ロボットの関節・眼、攪拌機^[5]への応用が見込まれている。その一方で、電磁力を用いた球面モータの多くは、高出力トルクの発生が困難という課題を持つ。この課題を解決するための出力を増大する装置の一つとして、球面減速機の開発が求められている。

筆者らは、これまでに小球が二つの球面減速機を検討し、球面モータの可動子と小球との間の回転伝達モデルを求めた^[6]。しかしながら、二つの小球と出力球との間の回転伝達には、すべりが発生し、出力球を含めた理論的な回転伝達モデルは構築できていない。本研究では、小球を二つ用いた球面減速機より単純な機構において、すべりが発生しない条件で回転伝達モデルの導出が可能かを確かめるため、トルク伝達用の小球一つと出力球一つから構成される球面減速機構を検討する。この機構では、一つの小球を球面モータの可動子と出力球に接触させて、各接点の摩擦力でトルクを伝達させる。

球面減速機構の開発において、減速比を求めるために出力トルクを計測して計算値と比較するには、出力球の回転軸が明確である必要がある。しかし、球面モータの可動子、球面減速機の小球や出力球はそれぞれ点接触しており、力の伝達過程は複雑である。そのため、トルクを計測する前に球面減速機の出力球に所望の回転をさせるための回転伝達モデルを構成する必要がある。

連絡先: 角南 尚幸, 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1, 岡山大学大学院 自然科学研究科,
e-mail: pkbw1yhi@s.okayama-u.ac.jp

^{*1}岡山大学 ^{*2}JAXA ^{*3}産総研

球の回転を角速度ベクトルで表すと、回転伝達モデルによって可動子の角速度ベクトルから出力球の角速度ベクトルを推定できる。そして、逆に指定した出力球の角速度ベクトルを与える可動子の角速度ベクトルを求めることができる。回転伝達モデルの作成には、可動子の回転による球面減速機構における小球および出力球の回転の計測が必要である。

そこで本論文では、球面減速機構における小球と出力球の回転の計測を行い、回転伝達モデルの導出を目的とした。本報告では可動子と小球、出力球の回転の計測実験を行った。そして、可動子と出力球間における回転伝達モデルの導出を試みた。

2 球面減速機

2.1 先行研究

矢野らは Fig. 1 のような球面減速機を試作した^[7,8]。この球面減速機は Fig. 2 のように球面モータの上に小球、その小球の上に出力球を設置している。この球面減速機も本研究で提案する球面減速機と同様、摩擦により可動子の回転を小球に伝え、その回転を出力球に伝えて出力を取り出す。この機構では出力球の半径を変更することで出力トルクを増幅することができる。しかしながら、先行研究では可動子から出力球までの回転伝達モデルは導出されていない。

2.2 試作した球面減速機の構成

Fig. 3 に本研究で試作した球面減速機を示す。球面モータの可動子は直径 200 mm のアクリル球殻であり^[5]、球面減速機は球面モータの固定子に取り付ける。

出力球は直径 200 mm のアクリル半球殻を二つ張りあわせて、摩擦係数を大きくするために表面をゴム系骨材(安全地帯セーフステップ滑り止めスプレー)で塗装した。出力球を可動子より大きくすることで減速効果が得られるが、本論文では回転伝達モデルを検討するため、出力球と球面モータの可動子の直径を同じにした。したがって、この場合には減速効果は得られない。

直径 100 mm のアクリル半球殻を二つ張り合わせた小球も、摩擦係数を大きくするために表面を塗装した。一つの小球だけでは出力球を支持できないため、Fig. 4 に示すような大型のボールキャスタを二つ配置した。Fig. 5 には小球支持円盤を示す。小球支持円盤は直径 300 mm、厚さ 10 mm のアクリルの円盤で、中心が正

三角形の頂点に位置するように直径 102 mm の 3 つの円形の穴があけてあり、小球を最大 3 個まで配置できる。大型のボールキャスタのボール先端は、Fig. 6 のように小球と出力球の中心を通る直線に垂直で、出力球の中心を含む平面 P 上に配置している。Fig. 7 には、小球支持円盤の円形穴の下に 2 つ配置した小型のボールキャスタを示す。この小型のボールキャスタにより、小球が円形穴の縁に接触してその回転の障害となることを防ぐことが可能である。Fig. 7(a)は、小球支持円盤の上から見た図である。Fig. 7(b)では、小型のボールキャスタのボール先端を配置してある平面 P を示す。Fig. 7(b)の平面 P も大型のボールキャスタと同様に、可動子と小球の中心を通る直線に垂直で、小球の中心を含む平面である。なお、予備実験より、ボールキャスタによる摩擦が負荷となり、小球と出力球の回転へ影響することが分かっている。Fig. 6, Fig. 7 の出力球と小球を支持するボールキャスタの特殊な配置は、ボールキャスタによる出力球と小球の回転への影響が少ない配置の一つである。

Fig. 1 Spherical speed reducer of related study in AIST^[7].

Fig. 2 Behavior of a spherical speed reducer in AIST.

Fig. 3 Spherical speed reducer developed in this study.

Fig. 4 Large ball caster.

Fig. 5 Supporter of intermediate small balls.

Fig. 6 Arrangement of two large ball casters.

(a) Small ball casters (b) Arrangement plane of small ball casters

Fig. 7 Arrangement of two small ball casters.

Fig. 8 Rotation vectors of rotor, small ball and output ball.

3 回転伝達モデル

本研究で提案する球面減速機構はトルク伝達用の小球一つと出力球一つで構成される。このため、球面減速機における可動子と出力球間の回転伝達モデルは、可動子から一つ的小球への回転伝達モデルを表す関数 f と、小球から出力球への回転伝達モデルを表す関数 g の合成関数 $g \circ f$ で表される。本論文では、可動子と小球間の回転伝達モデル f と、小球と出力球間の回転伝達モデル g を構築した。

小球が1つの場合の小球の角速度ベクトルを計測した結果⁶⁾から、「可動子と小球の接点における可動子と小球の速度ベクトルが等しい」ことが分かっている。小球と出力球間の機構は、可動子と小球間の機構と比較して小球中心を含む水平面に対称的である。そのた

め、「可動子と小球の接点における可動子と小球の速度ベクトルが等しい」と「小球と出力球の接点における速度ベクトルが等しい」と仮定した。そして、球支持用のボールキャストの影響がない場合の理論的な回転伝達モデルを構築した。

Fig. 8 に可動子と小球、出力球の角速度ベクトルを示す。仮定に基づいて数学的に導いた、可動子の角速度ベクトルを与えたときの小球の角速度ベクトル、および出力球の角速度ベクトルを式(2), (4)に示す。式(1)~(4)において ω_i , ω_m , ω_o はそれぞれ可動子、小球、出力球の角速度ベクトルである。 R_i は可動子の中心から可動子と小球の接点への位置ベクトルを示し、 R_{mi} は小球の中心から可動子と小球の接点への位置ベクトルを示している。そして、 R_{mo} は小球の中心から小球と出力球の接点への位置ベクトルを示し、 R_o は出力球の中心から小球と出力球の接点への位置ベクトルを示している。 R_i , R_{mi} は、小球支持円盤にいた円形の穴の中心に、小球の中心があるとして定めている。 R_{mo} , R_o は、 R_{mi} , R_i の y と z 成分をそれぞれ逆向きにしたベクトルと定めている。また、可動子と小球の接点において、 v_{im} は可動子表面での速度ベクトルを示し、 v_{mi} は小球表面での速度ベクトルを表す。小球と出力球の接点において、 v_{mo} は小球表面での速度ベクトルを示し、 v_{om} は出力球表面での速度ベクトルを表す。

$$v_{im} = v_{mi} = \omega_i \times R_i \quad (1)$$

$$\omega_m = \frac{R_{mi} \times v_{mi}}{|R_{mi}|^2} = \frac{R_{mi} \times (\omega_i \times R_i)}{|R_{mi}|^2} \quad (2)$$

$$v_{mo} = v_{om} = \omega_m \times R_{mo} \quad (3)$$

$$\omega_o = \frac{R_o \times v_{om}}{|R_o|^2} = \frac{R_o \times (\omega_m \times R_{mo})}{|R_o|^2} \quad (4)$$

4 球の角速度ベクトル計測

4.1 計測目的

可動子のあらゆる回転に対して可動子と小球、出力球の角速度ベクトルを計測し、計測結果が式(2), (4)で理論的に求まる小球と出力球の角速度ベクトルと一致するかを検討する。そして、可動子と小球間の回転伝達モデルと、小球と出力球間の回転伝達モデルを構築することを目的とする。

Fig. 9 Rotor driven by a DC motor.

Fig. 10 Measurement base vectors and rotation vectors of a ball.

Fig. 11 Stator coordinates.

Table 1 Four patterns of angle change rotation axes of rotor rotation axis.

Pattern	Angles of α and β (deg)
①	$\beta = 0, \alpha = -180 \sim 180$
②	$\alpha = 0, \beta = -180 \sim 180$
③	$\alpha = -60, \beta = -180 \sim 180$
④	$\alpha = 60, \beta = -180 \sim 180$

式(2), (4)が, 可動子のどの回転でも成立することを示すには, 可動子のあらゆる回転に対して小球と出力球の角速度ベクトルを計測し, 計測結果と式(2), (4)の計算値を比較する必要がある。このため, Fig. 9 のような DC モータ駆動の可動子の回転機構を製作した。この機構では回転軸と角速度の大きさを正確に設定できる。また, この機構では, 回転軸を支えるアルミ角柱をアルミ板上の穴で変更でき, アルミ板を支えるアルミ角柱も下のアクリル板上の穴で 15 deg ごとに回転し

て固定可能である。計測においては球面モータと置き換えて用いた。

4.2 計測方法

センサの要求条件としては, 本研究の球面減速機に組み込むことが可能なセンサの大きさと非接触での計測方法があり, その両方を満たす光学式のマウスセンサ(以下マウスセンサ)を採用した。マウスセンサを用いる方法で, 球の角速度ベクトルの計測を行う^[9]。マウスセンサは, 搭載したイメージセンサが反射光で読み取った画像情報の変化から, 周期的に 2 方向の移動量(ポイント/mm)を計算するものを指す。この実験では, 単位時間当たりの相対移動量を取得するため, マウスセンサで生じる累積誤差が計測値へ与える影響は小さいと判断した。

Fig. 10 に示すように, マウスセンサの位置ベクトルを P_1, P_2 , マウスセンサの 2 方向の計測方向の単位ベクトルを u_1, v_1, u_2, v_2 , 球の角速度ベクトルを ω , マウスセンサのそれぞれの計測方向で計測される球表面の移動速さを a_1, b_1, a_2, b_2 とする。球の表面移動量は球の角速度ベクトル ω とそれぞれの位置ベクトル P_1, P_2 の外積で表される。 a_1, b_1, a_2, b_2 はその球の表面移動量を表すベクトルと単位ベクトル u_1, v_1, u_2, v_2 の内積により求められる。 a_1, b_1, a_2, b_2 を ω の各成分について整理すると式(5)となる^[9]。ここで, r と θ はそれぞれ, 球の半径と, Fig. 10 に示す角度である。

計測はマウスセンサで取得される相対移動量の合計値を 500 ms ごとに取得し, 可動子の回転開始 1 秒後から 25 秒間において, 二つの小球それぞれの角速度ベクトルの各成分を算出して記録する。球の角速度ベクトル ω は, Fig. 10 のように二つのマウスセンサがそれぞれ計測する 2 方向の微小時間の相対移動量から, 式(5)を用いて求まる。マウスセンサは一つの球に対して二つずつ必要であるため, 小球と出力球に対して合計 4 つ配置している。

可動子の回転軸方向は, 固定子座標系と可動子座標系から z-y-z 系のオイラー角(α, β, γ)で定める。固定子座標系は, Fig. 11 の小球支持円盤の中心を座標系の原点, 円盤上を xy 平面とした xyz 座標系である。小球支持円盤の 2 つの円形穴中心を通る直線方向を x 軸としている。可動子座標系は, Fig. 9 のように可動子の回転軸を X 軸とした XYZ 座標系である。 α 角は z 軸周りに回転させた角度である。Fig. 9 は, α 角が 15 deg の図

となり、 z 軸周りに -15 deg 回転させると、固定子座標系の x 軸と一致する。 α 角回転させた可動子座標系を $X'Y'Z'$ 座標系とすると、 β 角は Y 軸周りに回転させた角度である。 γ 角は 0 deg とする。そして、Table 1 のように、4 パターンの回転軸周りに可動子を回転させる。各パターンでは α 、 β の片方を一定にし、もう片方を 15 deg ごとに変更する。そして、それぞれの可動子の回転に対して、小球と出力球の角速度ベクトルを計測する。

なお、可動子の角速度の大きさの調整は、ロータリエンコーダとオシロスコープを用いた。角速度の大きさは DC モータの電圧を変更することで波形の周期を調節し、一定 (2.5 rad/s) とした。計測結果は固定子座標系における角速度ベクトルとする。

$$\omega = t \left(-\frac{b_2}{r} \frac{b_1}{r} \frac{1}{\cos\theta} \left(\frac{a_2}{r} - \frac{b_1}{r} \sin\theta \right) \right) \quad (5)$$

4.3 計測精度

マウスセンサは光の反射距離が変化すると計測値に誤差が生じる。DC モータ駆動の可動子を用いて、この実験で使用したマウスセンサの一つで光の反射距離による誤差の検証を行った。検証条件は、DC モータ駆動の可動子の角速度の大きさを 2.5 rad/s 、角度 α を 0 deg 、 β を 0 deg とした。可動子の球中心を通り、回転軸に垂直な平面上の表面をマウスセンサで計測する。そして、マウスセンサのイメージセンサの位置を球表面から鉛直方向に移動させた。その検証の際、光の反射距離を 0.5 mm 程度前後させると、DC モータ駆動の可動子における角速度と比べて最大で 0.2 rad/s の誤差が生じることが分かった。

この誤差により、計測した角速度ベクトルには、最大 11 deg 程度の誤差角度が発生する。誤差角度は、大きさが 2.5 rad/s の元の可動子の角速度ベクトルとの内積から計算した角度差である。本研究で用いる球はその製作方法から完全な真球ではないと考えられ、球表面とマウスセンサとの光の反射距離が 0.5 mm 程度前後することが考えられる。このため、最大 11 deg 程度の誤差角度をこの実験での計測許容誤差とした。

この実験の計測値と回転伝達モデルの理論値の比較においては、計測値が理論値とどの程度一致しているかを検討することが目的である。そして、比較結果が不一致だった場合には、 11 deg 以下の誤差角度が誤差

原因特定に影響しないと考えられる。また、仮に球にすべりが発生した場合には誤差角度が 11 deg よりも十分に大きくなると考えられるため、この計測装置および方法で精度は十分とした。

5 計測結果

例として、可動子が Table 1 のパターン①の場合の、小球の角速度ベクトルにおける計測値と式(2)の計算値を比較したグラフを Fig. 12(a)に示す。そして、出力球の角速度ベクトルにおける計測値と式(4)の計算値を比較したグラフを Fig. 12(b)に示す。また、計測値は回転開始から 25 秒間の 50 回分の平均値をプロットしている。標準偏差は Fig. 12(a)の小球の場合で 0.13 rad/s 、Fig. 12(b)の出力球の場合で 0.06 rad/s 程度である。他のパターンを含めた計測値と理論値の角度差の平均と最大値は Table 2 に示す。角度差の平均は、 α または β を $-180 \sim 180 \text{ deg}$ に変更した 24 通りの計測結果から求めた角度差の平均である。

Fig. 12 Comparisons of angular velocity vectors between calculated results from the rotation transmission model and measurement results.

Table 2 Angular difference of each pattern

Pattern	Small ball		Output ball	
	Average (deg)	Max (deg)	Average (deg)	Max (deg)
①	5.8	11.5	4.8	9.3
②	7.8	11.4	6.0	11.2
③	5.7	11.1	5.3	9.7
④	4.3	11.1	4.2	7.4

6 考察

Fig. 12(a)のグラフから、式(2)で算出した小球の角速度ベクトルと計測した角速度ベクトルがほぼ一致している。また、Fig. 12(b)のグラフから、式(4)で算出した出力球の角速度ベクトルと計測した角速度ベクトルもほぼ一致している。Table 2 から Table 1 の各可動子回転軸パターンにおいても、角度差の最大値が 11 deg 程度と、計測許容誤差程度で収まっている。計測結果から、式(2)、(4)の理論回転伝達モデルは、小球が一つの球面減速機構における球面モータの可動子と小球、出力球の回転の関係を表すことができると結論づけられる。

以上から、小球が一つの球面減速機構における球面モータの可動子と出力球間における回転伝達モデルは、式(2)、(4)の合成関数で式(6)と表される。

$$\omega_o = \frac{R_o \times (R_{mi} \times (\omega_i \times R_i) \times R_{mo})}{|R_{mi}|^2 |R_o|^2} \quad (6)$$

7 結言

本論文では、小球を一つ用いた球面減速機の回転伝達モデル導出のために、球面減速機構における小球と出力球の角速度ベクトルの計測を行った。すなわち、各球に対して二つのマウスセンサから計測した球の表面移動速度から角速度ベクトルを求めた。また、球の接触点での速度ベクトルが等しいという条件で、可動子と小球間の回転伝達モデルと小球と出力球間の回転伝達モデルを理論的に導いた。そして、計測結果との比較から、球支持用のボールキャストの影響がなく、可動子と出力球間の回転伝達モデルとして用いることができることを確認した。

本研究では、小球を一つ用いた球面減速機の可動子と出力球間の回転伝達モデルを導出した。しかしながら、

小球が一つの場合、可動子の回転軸と小球の回転軸、あるいは小球の回転軸と出力球の回転軸が一致すると回転の伝達を行うことができないという問題がある。また、各球との接触面積が小さく、ボールキャストのような球を接触するものから摩擦の影響受けやすいという問題もある。

今後は、それらの問題を解決するために、本論文で導出した回転伝達モデルを基に、小球が二つ以上用いた球面減速機の回転伝達モデルの導出を行う。そして、出力球の回転軸を明らかにして、小球を用いた球面減速機の入出力トルクの比から減速比を求める。

参考文献

- [1] 新世代アクチュエータの多自由度化可能性調査専門委員会, 新世代アクチュエータの多自由度化可能性, 電気学会技術報告, Vol.1265, 2012.
- [2] E.Onillon, O.Chételat, L.Rossini, L.Lisowski, S.Droz and J. Moerschell, Reaction Sphere for Attitude Control, Proceedings of 13th European space Mechanisms and Tribology Symposium, 2009.
- [3] C.Cho, D.Kang, S.Kim, S.Won, and J.Lee, Using mathematical method of torque simulation for reducing calculation time of permanent magnet spherical wheel motor, Proceedings of the international Conference on Electrical Machines and Systems, pp.3112-3115, 2008.
- [4] 矢野 智昭, 高トルク球面モータの開発: 第4報: 切頂八面体と正十二面体に基づく球面ステッピングモータの提案, 日本機械学会, 機素潤滑設計部門講演会講演論文集, Vol.8, pp.137-140, 2008.
- [5] 五福 明夫, 単 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, pp.2400-2406, 2011.
- [6] 角南 尚幸, 五福 明夫, 笠島 永吉, 矢野 智昭, 球面減速機構における力伝達用小球の回転モデルの導出に関する研究, 日本 AEM 学会, 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp.395-398, 2016.
- [7] 独立行政法人産業技術総合研究所: 2010 産総研オープンラボ研究カタログ, 球面モータと球面減速機構 <http://www.aist.go.jp/digbook/openlab/2010/book.pdf> (accessed June 22, 2015).
- [8] 矢野 智昭, 球面加減速機構の設計, 日本機械学会, 年次大会講演論文集, Vol.7, pp.247-248, 2009.
- [9] 笠島 永吉, 矢野 智昭, 芦田 極, 球面モータの開発 (第2報: ロータの姿勢検出とフィードバック制御), 日本機械学会, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.809, p.DR0011, 2014.