

補助事業番号 2024M-480

補助事業名 2024年度 全方向のトルクを増幅する遊星球減速機の開発 補助事業

補助事業者名 岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域 下岡 綜

## 1 研究の概要

本研究は、1つのモータで3軸方向の回転が可能な球面モータの高トルク化に向けて、3軸あらゆる方向へ減速可能で球同士の接触により減速比を得る球面減速機の研究・開発を行う。高トルクを得るための方法として、遊星歯車を3次元に拡張した遊星球減速機を設計を行い、理論検証を行う。

## 2 研究の目的と背景

一軸減速機は100年以上の歴史を有し、様々な機構に用いられている。しかし、ロボットアーム等の多自由度機構は自由度数と同じ数のモータと減速機を必要とし、手先の機構が肩側の機構の負荷になるため機構質量が雪だるま式に増加する。この問題は、軽量で高出力のロボットアームの開発における課題の1つとなっている。この課題解決に向けて1機構で3自由度を有する人間の肩や手首と同じ動きを実現する球面モータの研究が進んでいる。しかし、高トルクを出力するための減速機が未だ開発されていない。そこで、本研究では、3軸あらゆる方向へ減速可能な球面減速機の開発を目指し、一般的に高トルクが得られる遊星歯車を3次元に拡張した遊星球減速機の実現を目的とする。

## 3 研究内容

### (1) 球を内包した減速機に関する基礎的研究

(<https://www.cc.okayama-u.ac.jp/~biorobotics/research.html>)

本目的である遊星球減速機を構築するにあたり、動作が実現可能かどうかを検証するため、トルクを取り出す球(出力球殻)の中に駆動する球(駆動球)とその中間にあたる球(小球)を内包した内接型球面減速機を試作した(図1)。図1に示す内接型球面減速機は、出力球殻の中心に検証用である一軸モータが付いた駆動球を取り付け、出力球殻と駆動球が接するように小球を配置した。

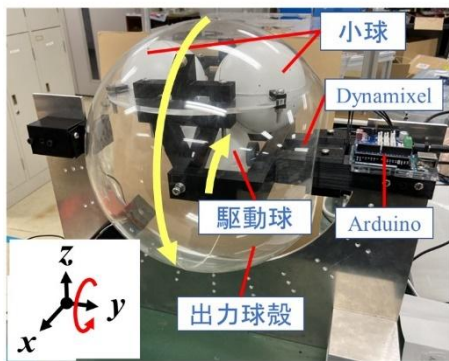


図1 内接型球面減速機の外観

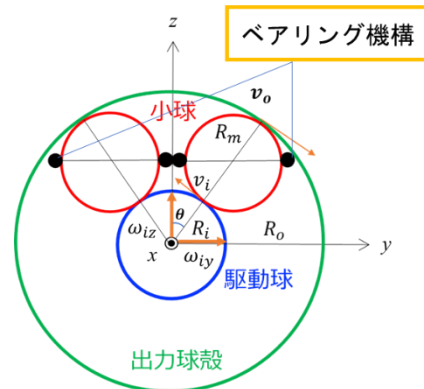


図2 内接型球面減速機の断面

また、マイクロコントローラ (Arduino) を含めた駆動球の支持部の位置を変更することで、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸の回転方向も変えることができる。すなわち、駆動球の姿勢を変えることで、小球および出力球殻の回転方向が変わるため、3次元のあらゆる方向に回転することができる。

この減速機の理論的に求めるために図2をもとに回転伝達モデルおよびトルク伝達モデルを提案した。トルク伝達モデルについては、各球のモーメントのつり合いにより導出した。この減速機の構造から回転伝達モデルとトルク伝達モデルは以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \omega_{ox} \\ \omega_{oy} \\ \omega_{oz} \end{pmatrix} = \frac{R_i}{R_o} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_{iy} \\ \omega_{iz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_o = \frac{R_o}{R_i} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{ix} \\ \tau_{iy} \\ \tau_{iz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\omega_{ox}$ ,  $\omega_{oy}$ ,  $\omega_{oz}$  は出力球殻の生じる角速度、 $\omega_{ix}$ ,  $\omega_{iy}$ ,  $\omega_{iz}$  は駆動球の角速度を示し、 $\tau_o$  は出力球殻のトルク、 $\tau_{ix}$ ,  $\tau_{iy}$ ,  $\tau_{iz}$  は駆動球の各成分のトルクを示す。 $R_i$  と  $R_o$  は、駆動球と出力球殻の半径を示す。この式 (1), (2) から、駆動球と出力球の半径比で減速比が決まることがわかる。また回転軸に関わらず、回転方向とは反対向きに回転することもわかる。

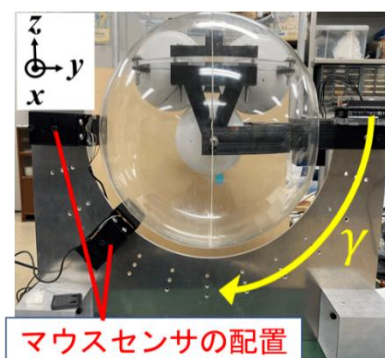


図3 実験の配置



図4 マウスセンサと計測装置

これら提案したモデルが妥当かどうかを検証した。まず、回転伝達モデルについて検証した。図3に示す矢印の方向に $30^\circ$  ずつ角度を変えていき、その時の $x, y, z$ 軸方向の各速度を計測した。計測には光学式のマウスセンサ(図4参照)を用いて500ms毎に値を取得した。この許容誤差は0.27m/sであることが判明している。

次に、トルク伝達モデルの妥当性について検証した。実験では図5のように対称となるようにワイヤを出力球の円周上に取り付ける。回転半径と出力球殻の半径を一致させ、出力球殻の円周上に紐を取り付ける。この時、2か所のワイヤをフォースゲージ(アイコーエンジニアリング(株), RX-5)に取り付け、減速機が駆動した際にフォースゲージの位置が変化しないように固定した。駆動球を回転させ、各球が滑っていないことを確認し、フォースゲージの値を測定する。

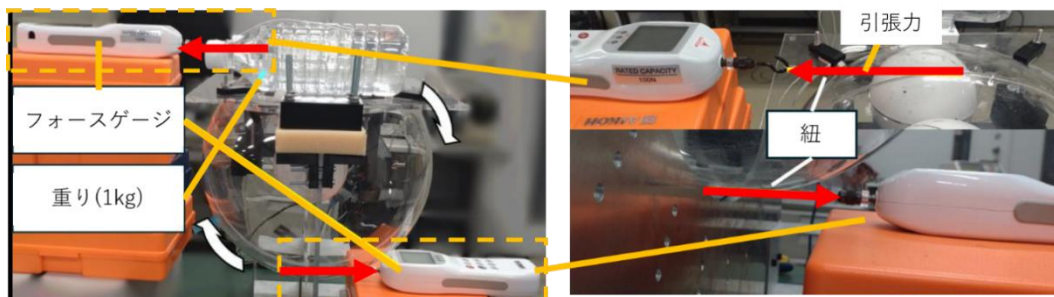
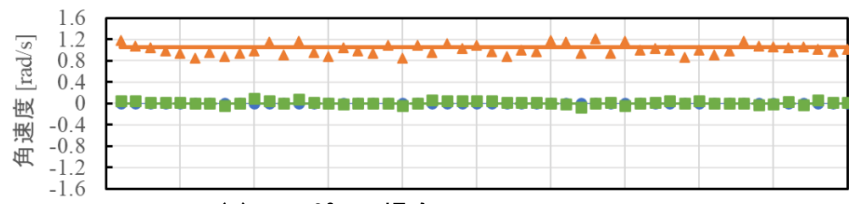
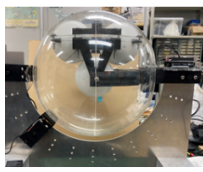
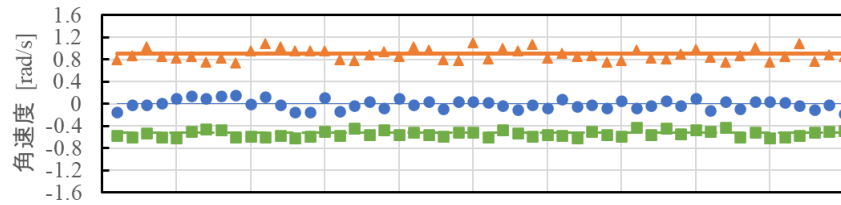
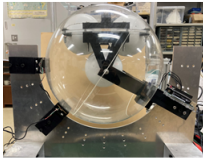


図5 トルク測定の様子

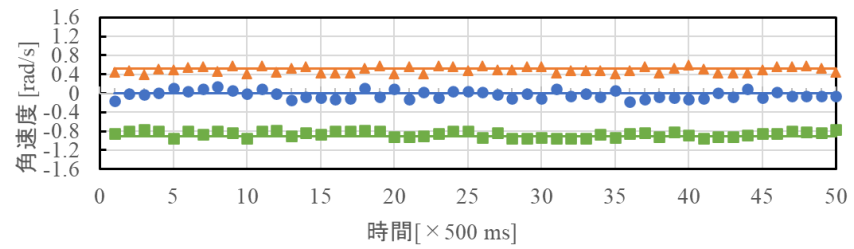
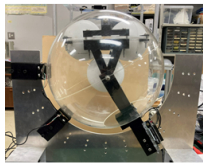
図3の回転伝達モデルによる検証結果を図9に示す。各色は $x$ (青),  $y$ (橙),  $z$ (緑)は $x, y, z$ の各軸の角速度を示し、各線は理論値、各記号は実験結果を示している。各実験結果において、理論値と一致していることがわかる。最大誤差も表1から許容誤差0.27m/s以下であることもわかるため、このことから回転伝達モデルは妥当であると言える。



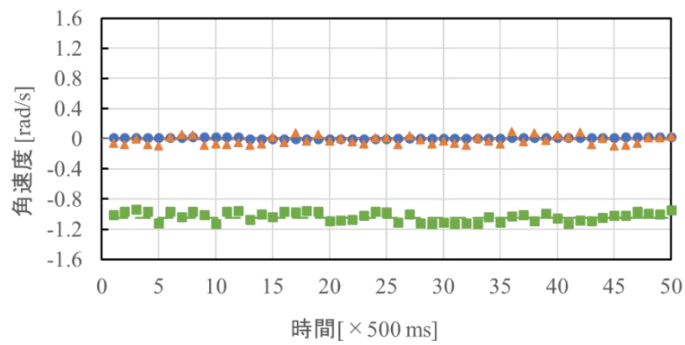
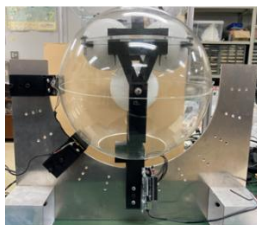
(a)  $\gamma=0^\circ$  の場合



(b)  $\gamma=30^\circ$  の場合



(c)  $\gamma=60^\circ$  の場合



● x 計測値 ▲ y 計測値 ■ z 計測値 — x 理論値 — y 理論値 — z 理論値

(c)  $\gamma=90^\circ$  の場合

図9 角速度のシミュレーションと実験結果

表1 角速度の平均誤差と最大誤差

小球配置	角度 $\gamma$ [deg]	平均誤差 [rad/s]			最大誤差 [rad/s]		
		x	y	z	x	y	z
yz平面に 平行	0	0.01	0.08	0.08	0.01	0.20	0.08
	30	0.07	0.09	0.05	0.17	0.14	0.07
	60	0.07	0.05	0.05	0.15	0.09	0.09
	90	0.01	0.05	0.05	0.01	0.07	0.09
xz平面に 平行	0	0.01	0.08	0.02	0.01	0.24	0.05
	30	0.07	0.11	0.05	0.17	0.23	0.07
	60	0.10	0.07	0.10	0.15	0.12	0.22

表2から、全ての軸周りにおいて、最大値が理論値に非常に近い値を得られていることが分かる。従って、式(2)のトルク伝達モデルも妥当であると言える。これまでの研究成果を第36回「電磁力関連のダイナミクス」(SEAD2024)および日本機械学会2024年度年次大会にて発表を行った。機械学会年次大会では日本機械学会機素潤滑設計部門第30回卒業研究コンテスト優秀発表を受賞した。7月では、一般社団法人日本能率協会主催のテクノフロンティア2024でも成果報告を行うとともに、補助事業を受けているということをPRした(図10)。これらの成果をまとめ、論文投稿の準備を行った。項目②と並行して行っていたため、予定のスケジュールよりも遅れてしまった。当初、英文誌 Sensors and Actuators Reports(IF:6.1)に投稿していたが、専門性の違いから、Results in Engineering(IF:6.0)に投稿先を変更し、現在は査読結果待ちである。

#### 発表タイトル

1. 利根川浩一, 檜村星陽, 下岡綜, 五福明夫, 矢野智昭, 笠島永吉, 駆動源を内蔵した球面減速機の提案, 第36回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD36), pp. 113-118, 2024.
2. 檜村星陽, 下岡綜, 五福明夫, 矢野智昭, 笠島永吉, 内接型球面減速機におけるトルク伝達モデルの導出と妥当性の検証, 日本機械学会2024年度年次大会, S114-27, 2024. (優秀発表受賞)



図10 テクノフロンティアでの様子

(2) 遊星球減速機の開発(<https://www.cc.okayama-u.ac.jp/~biorobotics/research.html>)

内包した場合でも $x$ ,  $y$ ,  $z$ 軸方向に減速比が得られていることを確認した. 次に, 一般的に利用されている遊星歯車を三次元に拡張した遊星球減速機の開発を目指す. その遊星球減速機の3Dイメージを図6に示す. この減速機は一般的な遊星歯車に相当する太陽歯車, 遊星歯車, キャリア, 固定子を球や殻のように配置することで一軸の機構を三次元に拡張することができる. 固定子を固定した状態で太陽球を回転させることで, ①の内接型球面減速機と同様に接している球に回転が伝達され, 図7のように回転することができる.

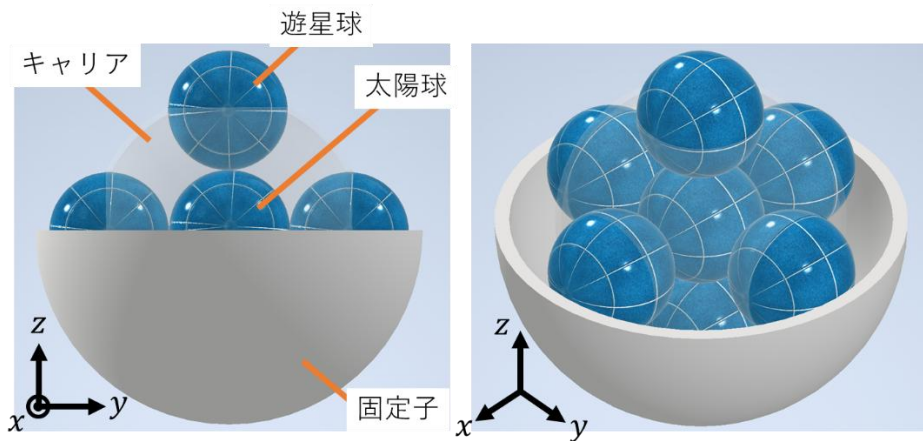


図6 遊星球減速機の3Dイメージ

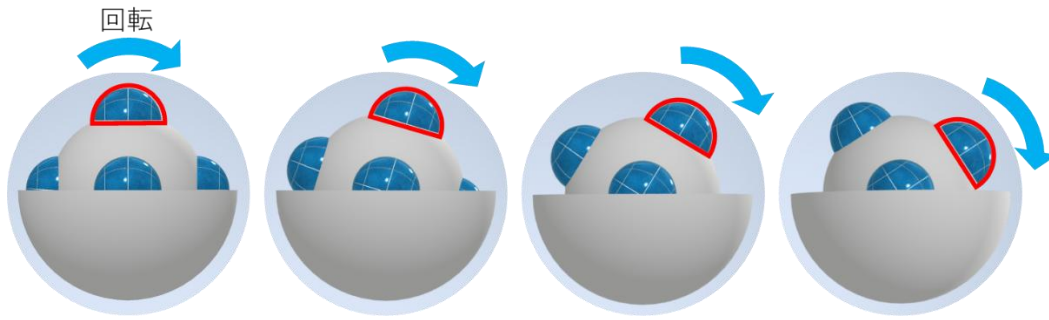


図7 遊星球減速機の回転の様子

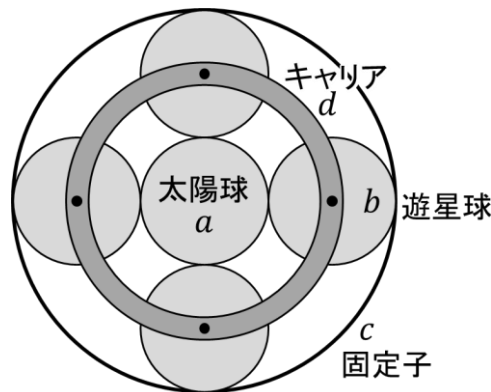


図8 遊星球減速機の断面

次に遊星球減速機における回転伝達モデルとトルク伝達モデルを構築する。項目①の内接型減速機と同様に図8に示す断面から導出することが可能である。また、全ての軸周りで図6の断面として考えることもできる。図8より、太陽球またはキャリアの角速度および半径の関係から回転伝達モデルは以下の式で導出される。

$$\begin{pmatrix} \omega_{dx} \\ \omega_{dy} \\ \omega_{dz} \end{pmatrix} = \frac{R_a}{R_a + R_c} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{ax} \\ \omega_{ay} \\ \omega_{az} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\omega_{dx}$ ,  $\omega_{dy}$ ,  $\omega_{dz}$ はキャリアの角速度、 $\omega_{ax}$ ,  $\omega_{ay}$ ,  $\omega_{az}$ は太陽球の角速度、 $R_a$ ,  $R_c$ は太陽球と固定子の半径を示す。このモデルでは減速比が1/4倍になるため、内接型球面減速機(減速比: 1/3倍)と比べて、向上していることが判明した。続いて、トルク伝達モデルも図8の断面とモーメントのつり合いから導出できるため、以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} \tau_{dx} \\ \tau_{dy} \\ \tau_{dz} \end{pmatrix} = \frac{R_a + R_c}{R_c} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{ax} \\ \tau_{ay} \\ \tau_{az} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\tau_{dx}$ ,  $\tau_{dy}$ ,  $\tau_{dz}$ はキャリアの出力トルク、 $\tau_{ax}$ ,  $\tau_{ay}$ ,  $\tau_{az}$ は太陽球の駆動トルクを表す。このモデルも伝達トルクが4倍となることが確認できた。また太陽球の回転方向に対してキャリアの出力方向も同じであることがわかる。

開発する遊星歯車を3D拡張するために図6に示す遊星球減速機の基礎設計を行った。3Dモデル上では実現可能であることが明らかとなったが、実機製作の際にキャリアと遊星球をどのように固定つまり、各球・キャリアの位置関係が変わらないようにするかという問題が生じた。また、太陽球の回転を遊星球に伝達し、遊星球も回転する必要があるため、キャリアと遊星球は完全に固定してはならない。また、製作する上で、各球とキャリアを図6のように配置するため高い精度が求められる。これらの問題点があり、改良するため実施スケジュールを大幅に遅れてしまった。

そこで、キャリアの一部にボールキャストを図11(a)のように配置することで遊星球の回転を阻害することなく、回転が伝達される。図11(b)について球と合わせた場合にキャストと球が想定する位置で接触することを確認した。実際には図12のように遊星球を挟み込む形を想定していたが、上下のパーツをネジ等で締めすぎると回転しないことや、ある程度の遊びが必要であること、キャリア全体として製作する場合に大型化しやすいことに加えて複雑な構造になるため、製作が難しくなるなどの問題が生じた。また、ボールキャストが小さいためか、遊星球の回転に引っ掛かりが生じることが多々あったため、これらの改良をする必要が生じた。またボールキャストの最適な配置角度も検討する必要があることも明らかとなった。



(a) ボールキャストの配置 (b) 球と合わせた場合

図11 ボールキャスト付きキャリアの試作

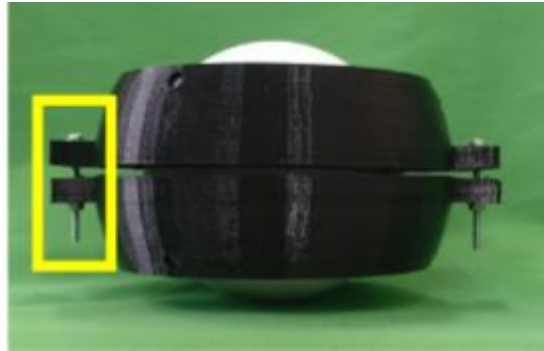


図12 遊星球を挟み込んだ場合

改良したものを図13に示す。不要な部分の削除と球に一定の押し付けをかけた状態で引っ掛かりのない回転ができるよう調整し、キャリアと一体にするのではなく、分けて造形することで、容易に製作できることが分かった。キャストの配置角度を $25^\circ$ に設定し、遊星球と固定子が接触できるようにもなった。今後は、キャリア全体の設計を遊星球減速機の製作を行う。減速機の理論的な提案を10th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT2025)にて発表し、学術論文として投稿する予定である。



(a) 3Dイメージ



(b) 球と合わせた状態

図13 改良したボールキャスト付きキャリア

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

提案する遊星球減速機は、1つ機構で3軸あらゆる方向の減速比を均一に得ることができるため、あらゆる機械技術への応用が期待できる。今後は、減速機の実装を行うとともに、キャリアや固定子を軸とした回転駆動も行う予定である。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで、球面モータの対応した3軸回転の減速機の研究を行ってきた。コンパクトかつ高減速比・トルクを得られる減速機の提案もされてきたが、本研究ではこれらに加え、既存の減速機を3次元化するという新しい機構である遊星球減速機の実現を目指すものである。本開発により、遊星球減速機の実現できることが判明し、既存の減速機構を3次元化できるものと期待できる。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- 利根川浩一, 檜村星陽, 下岡綜, 五福明夫, 矢野智昭, 笠島永吉, 駆動源を内蔵した球面減速機の提案, 第36回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD36), pp. 113-118, 2024.
- 檜村星陽, 下岡綜, 五福明夫, 矢野智昭, 笠島永吉, 内接型球面減速機におけるトルク伝達モデルの導出と妥当性の検証, 日本機械学会 2024 年度年次大会, S114-27, 2024. (優秀発表受賞)

## 7 補助事業に係る成果物

- (1) 補助事業により作成したもの
- (2) (1) 以外で当事業において作成したもの

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域

(オカヤマダイガク ガクジュツケンキュウイン カンキョウセイメイシゼンカガクガクイキ)

住 所: 〒700-8530

岡山県岡山市北区津島中3-1-1

担 当 者: 助教 下岡 綜(シモオカ ソウ)

E - m a i l: shimooka@okayama-u.ac.jp

U R L: <https://www.cc.okayama-u.ac.jp/~biorobotics/>