

補助事業番号 2026M-409

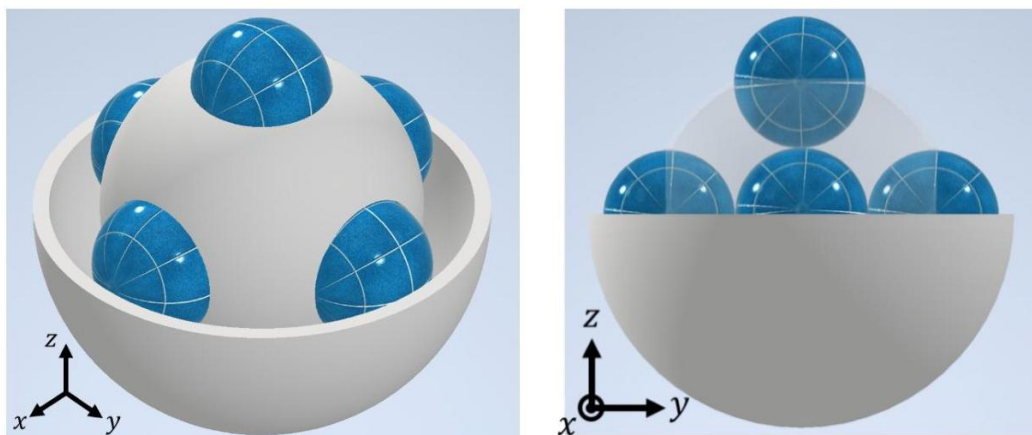
補助事業名 2026年度 高トルクが得られる減速機構を目指した多自由度球面減速機の改良 補助事業

補助事業者名 岡山大学 下岡 綜

## 1 研究の概要

本研究は、遊星歯車機構を三次元に拡張した新しい球面減速機である「球面遊星減速機」を提案し、その構造設計、理論モデルの構築、試作機の製作および角速度伝達モデルの検証を行うものである。一般的な多自由度機構では、必要な自由度の数に応じて複数のモータを配置する必要があり、機構の大型化、システムの複雑化、精度低下などが課題となる。これに対して、球面モータは1台で3自由度の回転を実現できる可能性を有するが、産業用途に必要なトルクを得るためには、3軸すべての方向に対して減速し、トルクを増大できる専用の球面減速機が必要である。

本研究では、従来の内接型球面減速機で得られていた減速比約1/3を上回る高減速比を目指し、入力となる太陽球の周囲に遊星球を球対称に配置し、遊星球の公転運動をキャリアから出力する球面遊星減速機を開発した。理論モデルにより、提案機構では減速比が約1/4となり、トルクは約4倍に増幅されることを示した。さらに、実機を製作して角速度測定実験を実施し、理論値と測定値が概ね一致することを確認することで、提案した角速度伝達モデルの妥当性を検証した。



(a) キャリア不透過

(b) キャリア透過

図1 提案する球面遊星減速機の3Dモデル

## 2 研究の目的と背景

近年、ロボット、精密機械、医療・福祉機器、宇宙機器などの分野では、多方向に滑らかに動作する多自由度駆動機構への要求が高まっている。従来の一軸モータを組み合わせる多自由度を構成する方法では、自由度の増加に伴ってモータ、減速機、支持機構、配線、制御系が増加し、装置全体の大型化や重量増加を招く。また、複数の機構要素を積み重ねることでバックラッシュ、摩

擦、機械的なずれが生じやすくなり、位置決め精度や信頼性の面でも課題が残る。

このような背景から、1つの機構で3自由度の回転を実現できる球面モータが注目されている。しかし、球面モータは平歯車などの一般的な一軸減速機を直接適用しにくく、さらに球面モータ単体では産業用ロボット等に必要な十分な出力トルクを得ることが難しい。したがって、球面モータの実用化には、3軸方向すべてに対して均一な減速を行い、同時にトルクを増大できる球面減速機の開発が不可欠である。

これまでの球面減速機では、駆動球、小球、出力球を接触させ、摩擦によって回転を伝達する外接型および内接型の機構が検討されてきた。外接型では高い自由度を持つ減速機構が構成できる一方で、高減速比を得ようとすると球の半径比に依存して機構全体が大型化する問題があった。内接型では、駆動球と小球を出力球の内部に配置することで小型化が実現されたが、減速比は依然として半径比に制約され、構造上の限界があった。そこで本研究では、同等の大きさでありながら従来よりも高い減速比を得ることを目的として、遊星減速機の原理を球面機構へ拡張した球面遊星減速機を提案した。

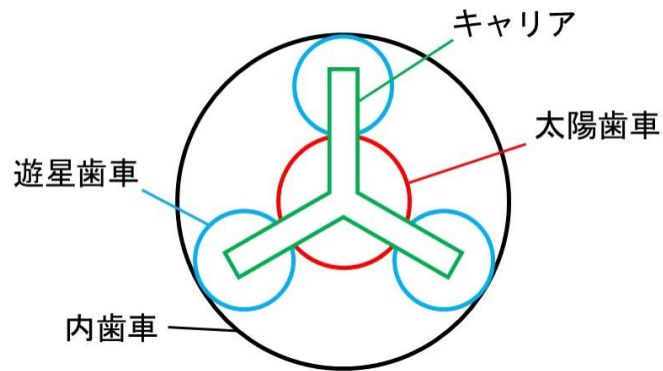
### 3 研究内容

#### (1) 球面遊星減速機に関する研究

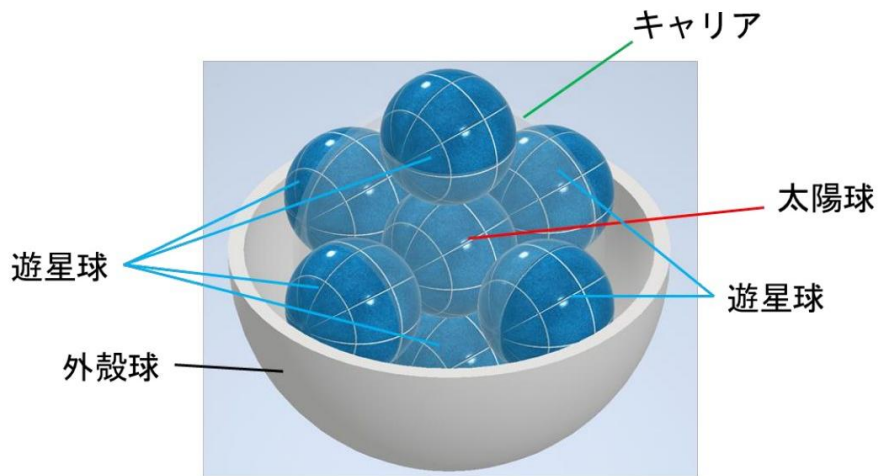
([https://researchmap.jp/shimoso/research\\_projects/50939926](https://researchmap.jp/shimoso/research_projects/50939926))

まず、一般的な平面の遊星減速機における太陽歯車、遊星歯車、内歯車、キャリアの役割を整理し、それぞれを球状部品に置き換えることで、3軸方向の回転を3軸方向のまま減速して伝達できる球面遊星減速機の構造を検討した。提案機構では、中央に太陽歯車に相当する太陽球を配置し、その周囲に遊星歯車に相当する遊星球を球対称に配置する。遊星球はキャリアによって相対位置を保持され、外殻球は内歯車に相当する固定子として機能する。太陽球を回転させると、遊星球が太陽球の周囲を自転しながら公転し、その公転運動がキャリアに伝達されることで減速出力が得られる。

構造設計では、従来の内接型球面減速機と同等の外形寸法を前提とし、同じ大きさの機構でより高い減速比を得ることを重視した。キャリアは、遊星球を保持しつつ出力部材として機能する重要部品であるため、遊星球との接触部にボールキャストを配置し、遊星球の自転を妨げずに公転力をキャリアへ伝達できる構造とした。また、遊星球が駆動中に脱落しないよう保持部品を設け、3次元的な回転運動に対して安定した接触状態を保つ設計とした。



(a) 遊星減速機の構造



(b) 球面遊星減速機の構造

図2 遊星減速機と球面遊星減速機の構造比較

太陽球および遊星球は、摩擦接触によって回転を伝達するため、可能な限り滑らかで真球に近い形状とする必要がある。本研究では、3Dプリンタによって半球部品を製作した後、NC旋盤による切削加工を行い、直径98 mmの球部品を製作した。外殻球は、遊星球と接触しながら固定子として機能するため、透明な半球状部品を用いて内部の動作を観察できる構成とした。これにより、太陽球、遊星球、キャリア、外殻球からなる球面遊星減速機の試作機を構築し、提案した機構が実際に動作するかを確認できる実験環境を整備した。

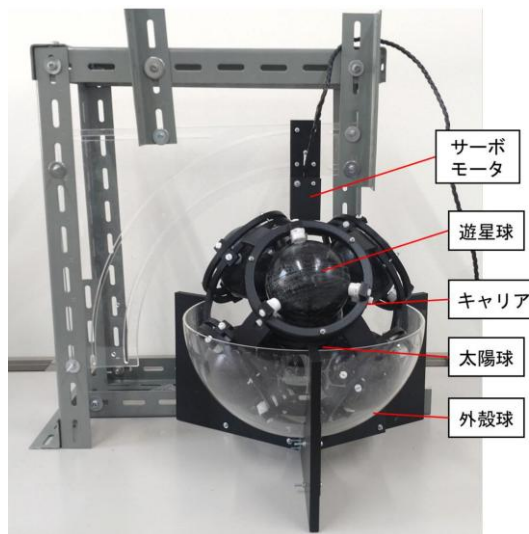


図3 製作した球面遊星減速機の試作機

## (2)球面遊星減速機の試作・検証実験

([https://researchmap.jp/shimoso/research\\_projects/50939926](https://researchmap.jp/shimoso/research_projects/50939926))

次に、球面遊星減速機における角速度伝達モデルおよびトルク伝達モデルを構築した。角速度伝達モデルでは、キャリア座標系において太陽球と外殻球の相対運動を考え、従来の内接型球面減速機と同様に、接触点で滑りがないものとして角速度比を導出した。その結果、外殻球を固定した場合、キャリアの角速度は太陽球の角速度に対して  $R_s/(R_s+R_o)$  で表されることを示した。ここで、 $R_s$  は太陽球半径、 $R_o$  は外殻球半径である。実機寸法に基づくと、提案機構の減速比は約1/4となり、従来の内接型球面減速機の約1/3よりも高い減速比を得られることが分かった。また、トルク伝達モデルでは、各遊星球に働く力、太陽球から受ける力、外殻球から受ける力、キャリアへ伝わる力の関係を力のつり合いおよびモーメントのつり合いから整理した。その結果、トルクは減速比の逆数に相当する倍率で増幅され、実機寸法では入力トルクに対して約4倍の出力トルクが期待できることを示した。これにより、球面遊星減速機が単に回転方向を伝達するだけでなく、球面モータ等の低トルク出力を実用的な駆動力へ増幅するための基盤機構となり得ることを理論的に示した。

理論モデルの妥当性を確認するため、試作機を用いた角速度測定実験を行った。太陽球をサーボモータにより駆動し、キャリアに貼付したマーカをカメラで撮影することで、キャリアの回転角および角速度を算出した。実験では、キャリア座標系とワールド座標系における回転軸の違いを考慮し、z軸周りおよび各軸から45°傾けた条件で測定を行った。これにより、提案したモデルが特定の軸方向だけでなく、球面機構として複数方向の回転伝達に対して成立するかを検証した。



図4 角速度測定実験の様子

実験結果では、理論減速比約0.2503に対して、測定値は多くの条件で0.25付近となり、理論値と良好に一致した。減速比の平均誤差および最大誤差を整理した結果、測定条件によって若干のずれは見られたものの、正しく測定できたデータでは許容誤差内であり、提案した角速度伝達モデルの妥当性が確認された。ずれの主な要因としては、球同士の接触状態、試作機の組立精度、球表面の滑り、測定時の画像処理誤差などが考えられる。今後はこれらの影響を低減することで、さらに高精度な回転伝達およびトルク伝達の実証につなげる。

表1 理論値と実験値との平均誤差と最大誤差

キャリア座標系	ワールド座標系	減速比	
		平均誤差	最大誤差
z 軸周り	z 軸周り	0.0007	0.0034
	z 軸から 30°	0.0005	0.0013
	z 軸から 60°	-0.0026	-0.0040
各軸から 45°	z 軸周り	-0.0001	0.0013
	z 軸から 30°	-0.0001	0.0013
	z 軸から 60°	-0.0028	-0.0094

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で提案した球面遊星減速機は、1つの機構で3軸方向の回転を扱う球面モータの出力を

高トルク化するための基盤技術として活用できる。球面モータは、従来の一軸モータを複数組み合わせ合わせた機構に比べて、関節構造を簡素化できる可能性を有している。しかし、実際のロボットや機械システムへ応用するためには、出力トルクの不足を補う減速機が不可欠である。本研究の成果により、球面モータの3自由度という特長を維持したまま、3軸すべての方向に対して一定の減速比を与える新しい減速機構の実現可能性が示された。

実社会への応用としては、産業用ロボットの手首関節や多自由度関節、サービスロボットの首・眼球機構、移動ロボットの全方向車輪、攪拌装置、姿勢制御装置、宇宙機器のリアクションホイールなどが考えられる。これらの機器では、限られた空間内で複数方向の回転を高精度かつ高トルクで制御することが求められる。球面遊星減速機を用いることで、従来のように複数のモータと複数段の減速機を組み合わせる必要性を低減し、機構の小型化、軽量化、部品点数の削減、制御系の簡素化に貢献できる可能性がある。

また、本研究は、歯車の噛み合いに依存しない球面接触型の回転伝達機構である点にも特徴がある。今後、摩擦材、球表面処理、支持機構、予圧機構などを改良することで、滑りを抑制し、より大きなトルクを安定して伝達できるようになれば、従来の歯車式機構では実現が難しかった多自由度・省スペース・高出力の駆動システムに展開できる。最終的には、球面モータと球面減速機を一体化した新しい多自由度アクチュエータの実現により、ロボット関節の設計自由度を高め、より柔軟でコンパクトなロボットシステムの社会実装に寄与することが期待される。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究は、ロボティクスおよびメカトロニクス分野における多自由度駆動機構の研究の一環として位置づけられる。これまでの研究では、球面モータに適用可能な球面減速機として、外接型および内接型の球面減速機が検討されてきた。外接型では3軸方向の減速伝達が可能である一方、高減速比に伴う大型化が課題となり、内接型では小型化が実現された一方で、半径比に依存する減速比の限界が課題として残っていた。本研究は、これらの先行研究で得られた知見を継承しつつ、一般的な遊星減速機の原理を三次元化することで、同等の外形寸法でより高い減速比を得ることを目指した発展的研究である。

教育・研究の観点からは、機構学、材料加工、3D CAD、3Dプリンタ、NC加工、実験計測、画像処理、理論モデル化を統合した実践的な研究テーマであり、学生が機械システムの設計から試作、評価までを一貫して学ぶ題材としても意義が大きい。特に、理論式の導出にとどまらず、実機を製作して理論値と測定値を比較する過程は、機械工学教育における「理論と実験の接続」を具体的に示すものである。今回の研究は、球面モータの実用化に必要な減速機構の研究をさらに発展させるとともに、多自由度機構、ロボット関節、次世代アクチュエータの研究へ展開するための基盤となる。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 学術論文

- Seiya Naramura, Koichi Tonegawa, So Shimooka, Tomoaki Yano, Akio Gofuku, Nagayoshi Kasashima, Tetsushi Kamegawa, Inscribed-type spherical speed reducer with uniform reduction ratio in all directions, Results in engineering, 27, 106742, 2025.

### 口頭発表

- Seiya Naramura, So Shimooka, Tomoaki Yano, Akio Gofuku, Nagayoshi Kasashima, and Tetsushi Kamegawa, Proposal of spherical planetary speed reducer to obtain high reduction ratio, Proc. the 10th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, ThA1-6, 2025.
- 檜村 星陽, 下岡 綜, 矢野 智昭, 五福 明夫, 笠島 永吉, 亀川 哲志, 遊星歯車を3次元に拡張した球面遊星減速機における理論モデルの検証, 第25回機素潤滑設計部門講演会, ThC3-2, 2026.

## 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

上記の図3, 4に記載.

### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

特になし

## 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(工)(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 准教授 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/>