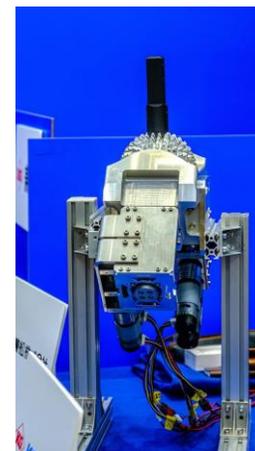
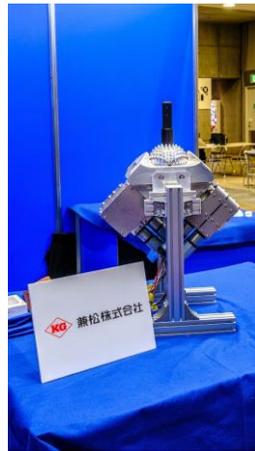


開催日：2024年7月4日

マイクロ固体フォトニクス研究会

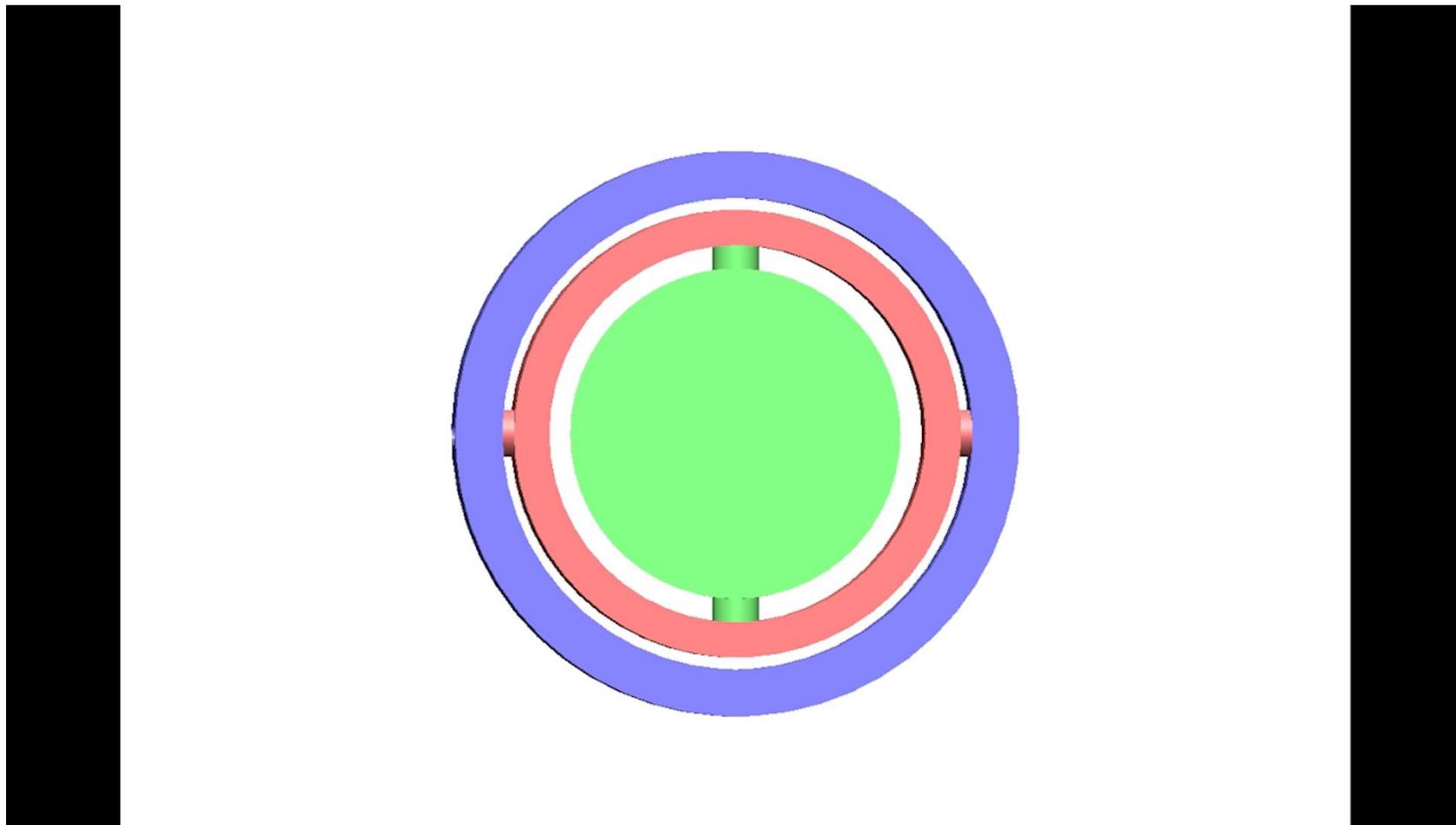
第1回 レーザー学会「小型集積レーザー」専門委員会

無制限の可動範囲を有する 回転3自由度の球状歯車機構



山形大学工学部 教授 多田隈 理一郎

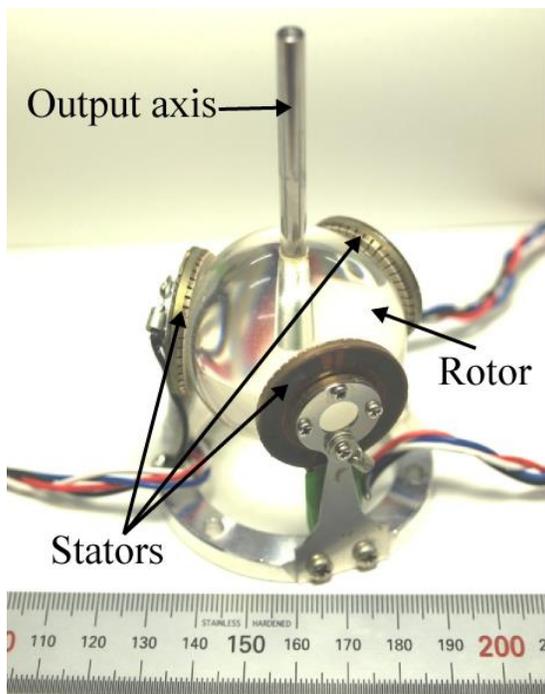
従来型のジンバル機構の問題



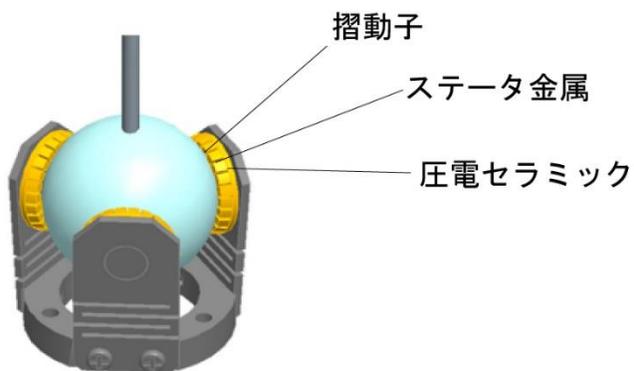
3層構造である

従来の球面モータ

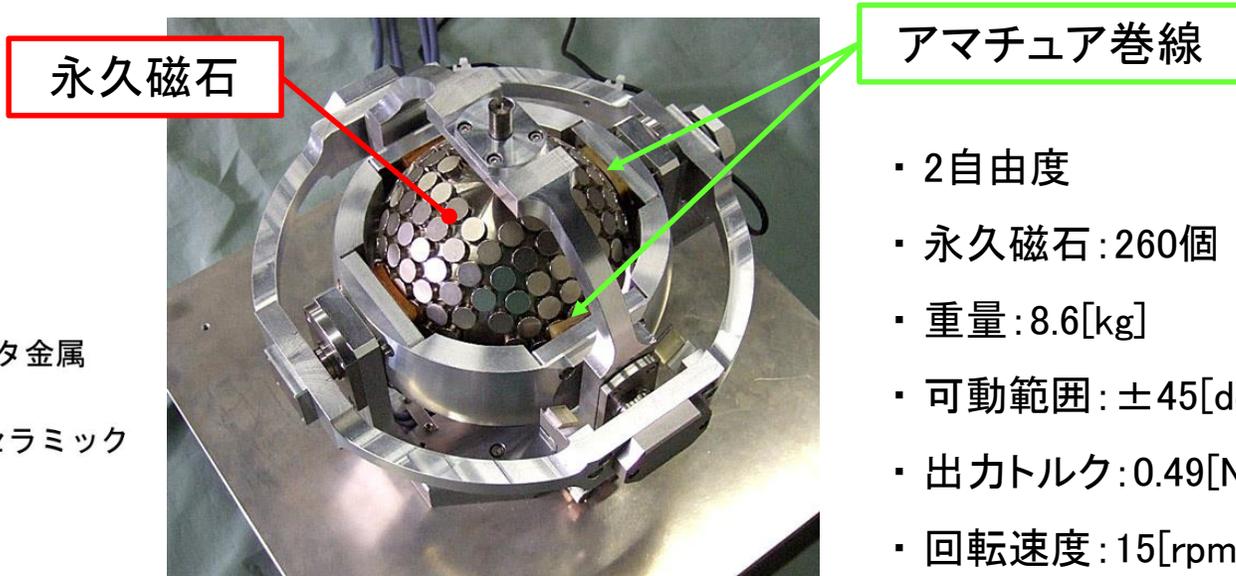
- 3自由度球面超音波モータ



(東京農工大学 遠山茂樹教授、株式会社オーケー・ロボティクス)



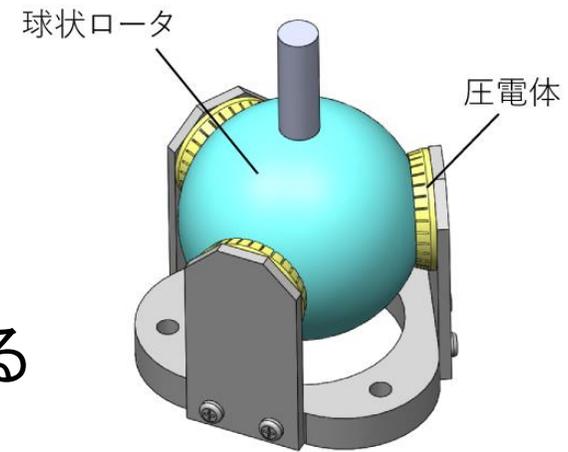
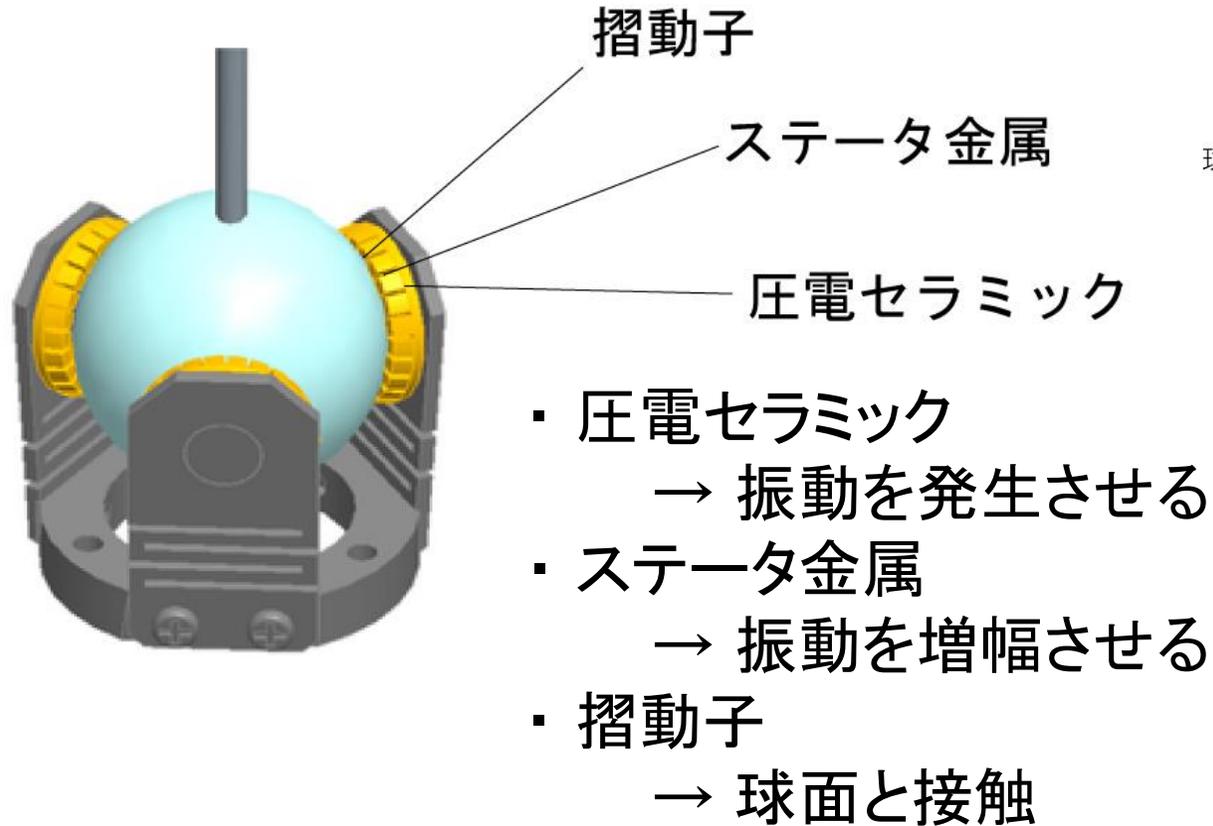
- 回転2自由度を有する電磁型の多極球面同期モータ



(矢野智昭, 竹村研治郎, 「多自由度アクチュエータ」, アクチュエータ研究開発の最前線, より引用。産業技術総合研究所の矢野智昭先生のご研究。)

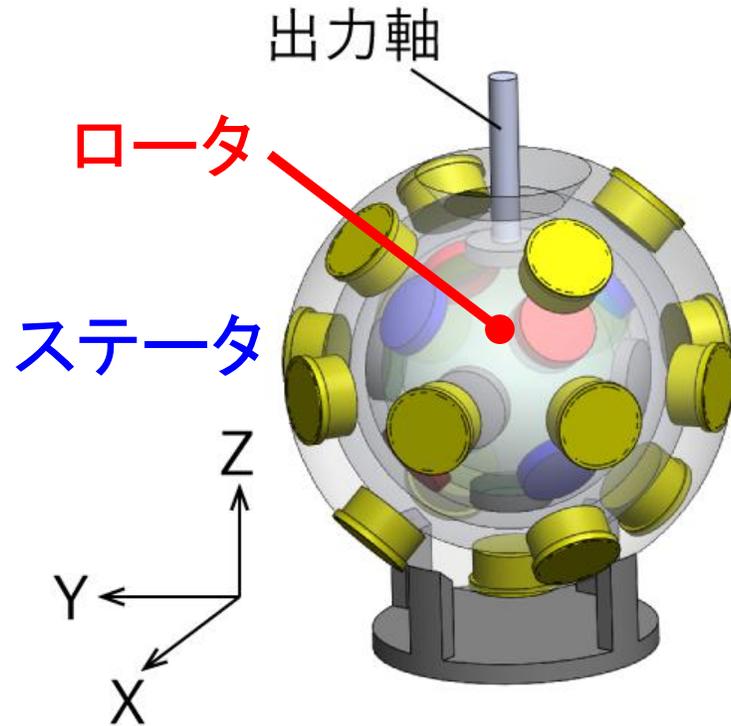
従来の球面モータは外部に支持機構を要することや、出力トルクが低い、といった問題がある

超音波モータ方式機構



電磁モータ方式 (1/3)

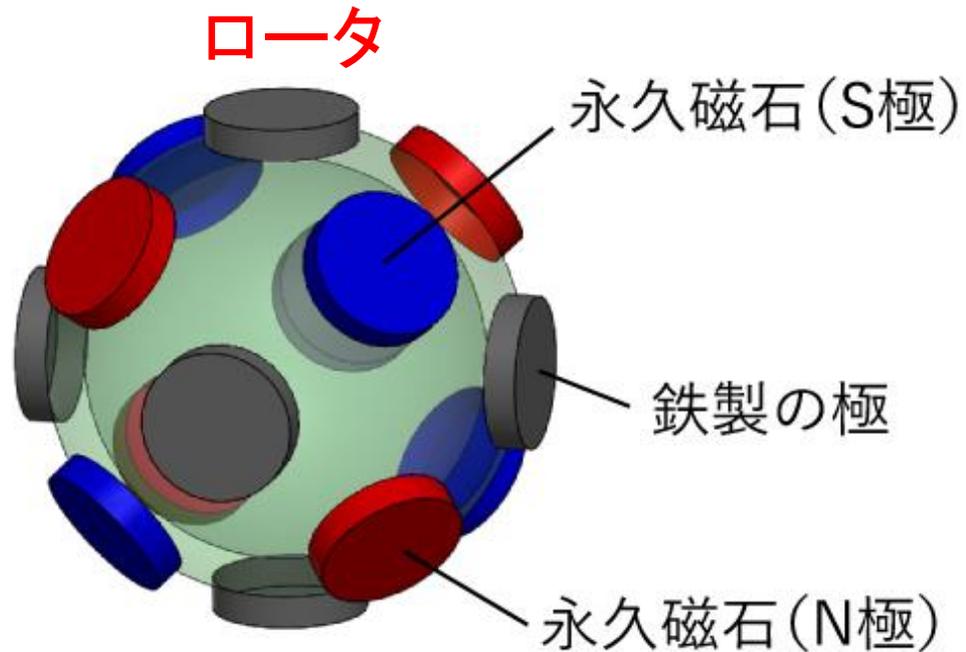
●球面ステッピングモータ



- ・ 3自由度
- ・ 可動範囲
 - ロール, ピッチ : ± 40 [deg]
 - ヨー : 無制限
- ・ 回転速度 : 180[rpm]
- ・ 出力トルク : 0.013[Nm]

電磁モータ方式 (2/3)

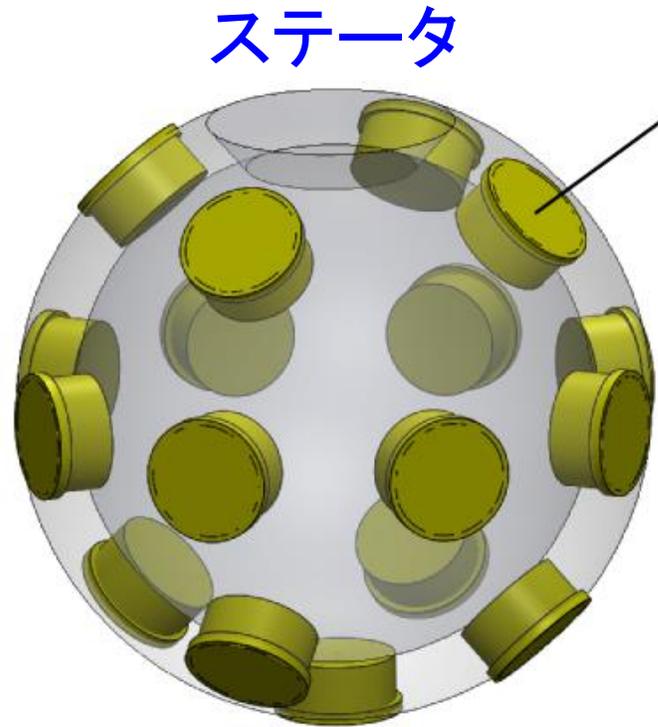
●球面ステッピングモータ



- ・ 球に内接する立方体の頂点に永久磁石, 各面の中心に鉄製の極
- ・ 永久磁石 (N極) : 4個
永久磁石 (S極) : 4個
鉄製の極 : 6個

電磁モータ方式 (3/3)

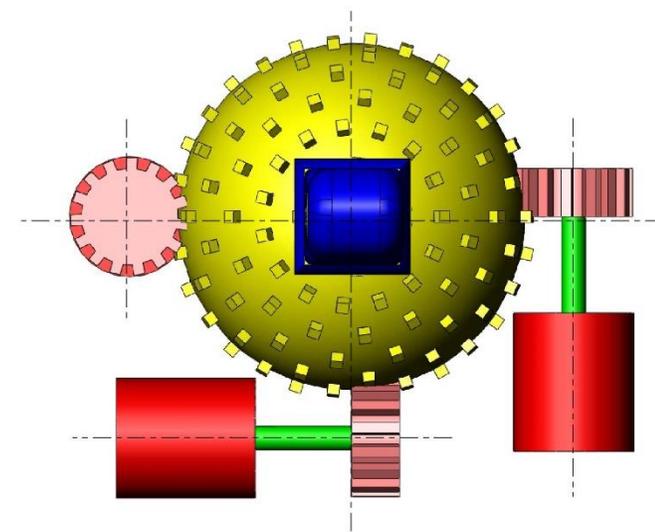
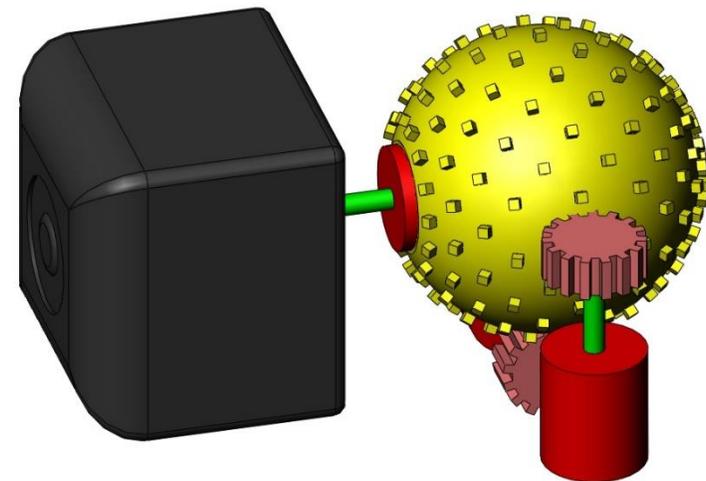
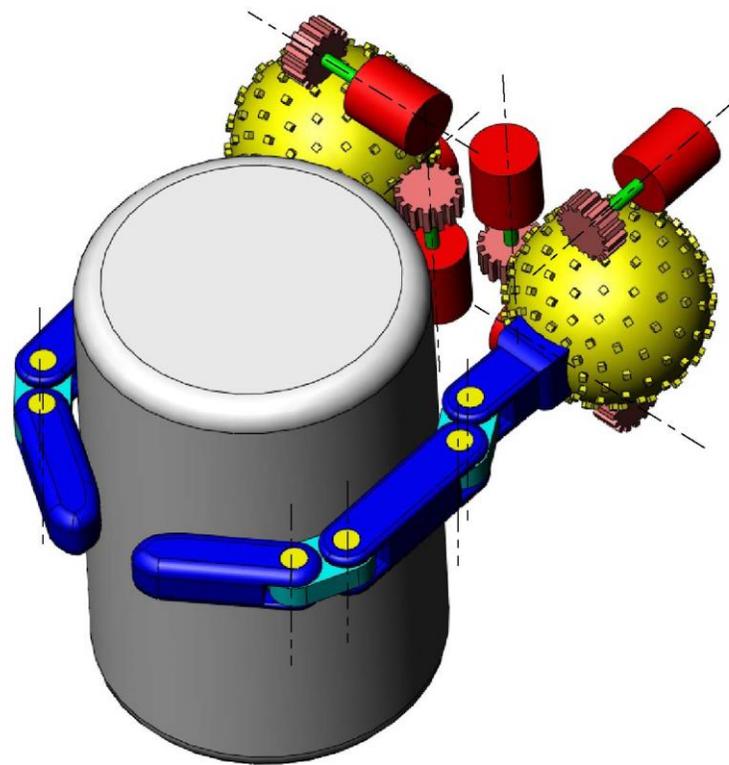
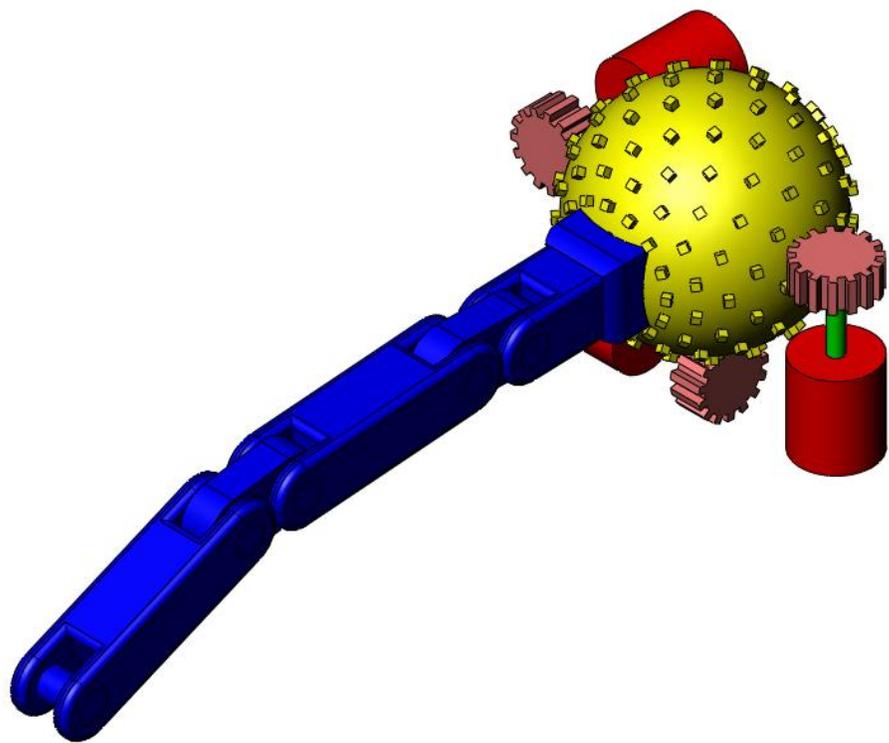
●球面ステッピングモータ



電磁石

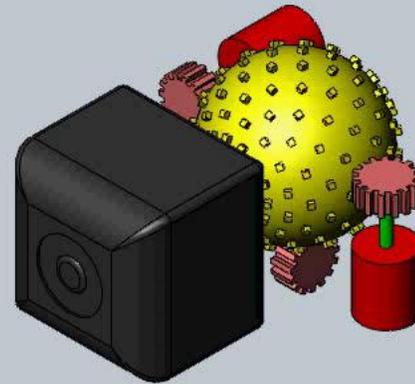
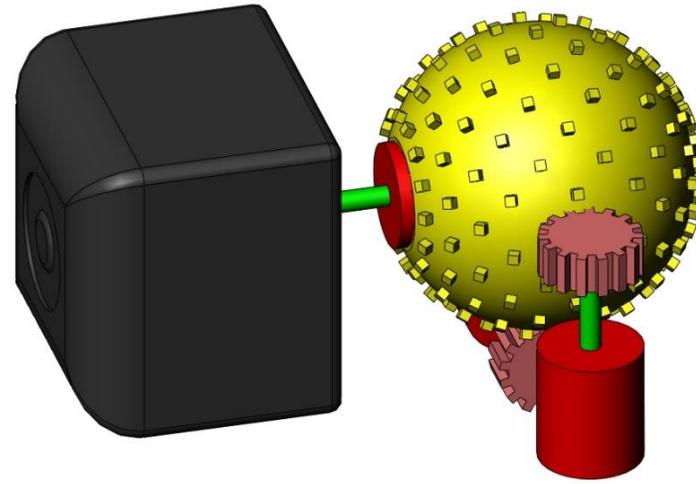
- ・ 球に内接する正八面体の頂点, 各辺の中心に電磁石
- ・ 電磁石 : 12個

球状歯車の応用例



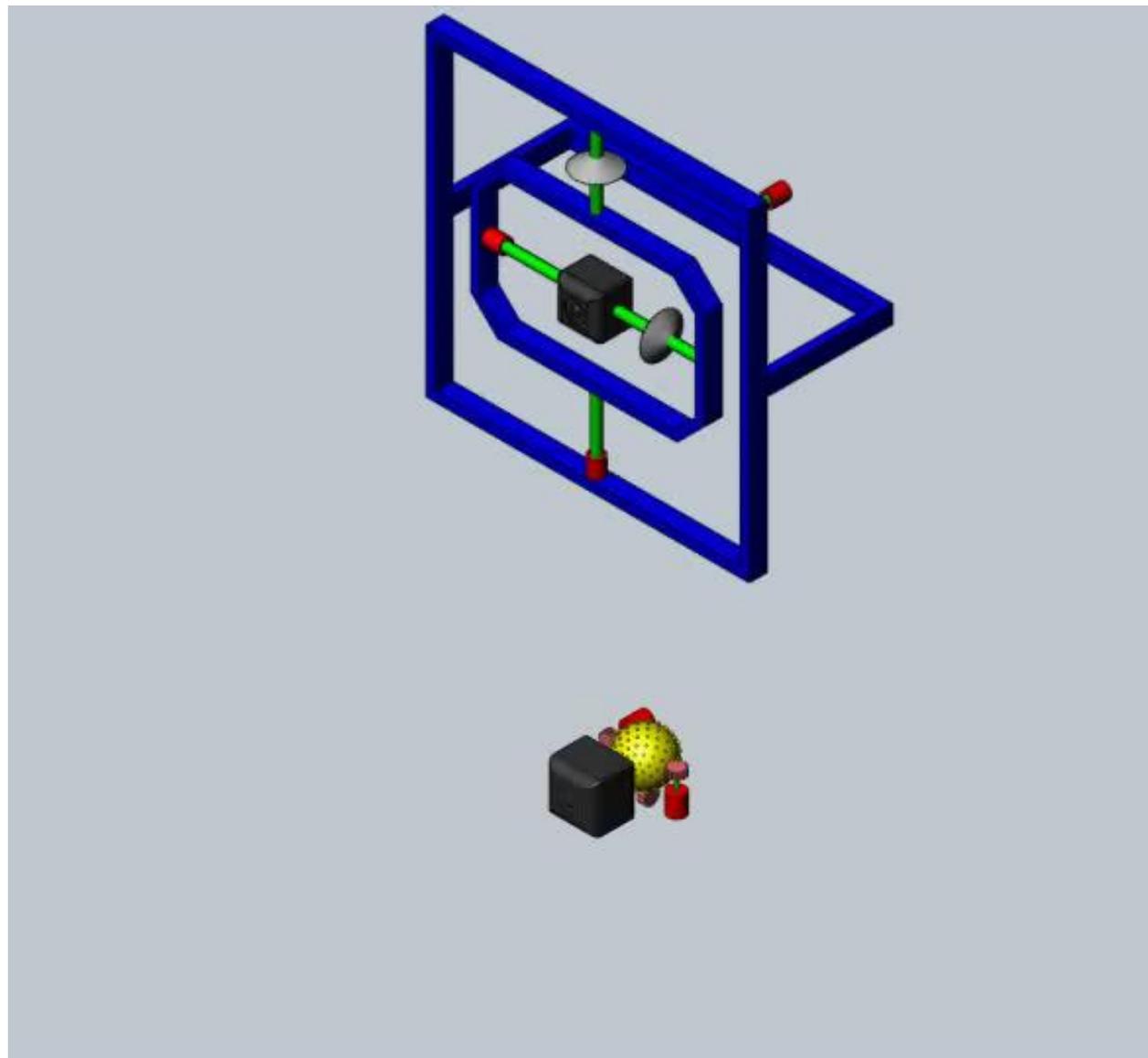
球状歯車の応用例

(カメラの首振り機構)

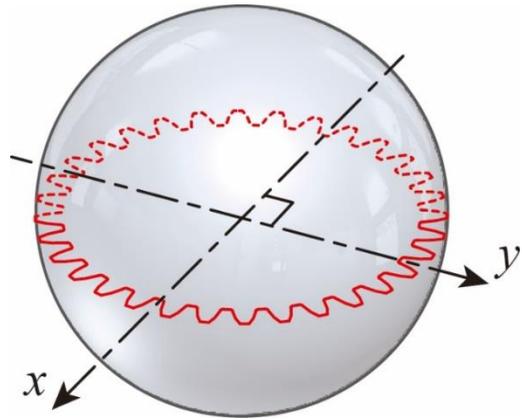


球状歯車の従来型ジンバルとの比較

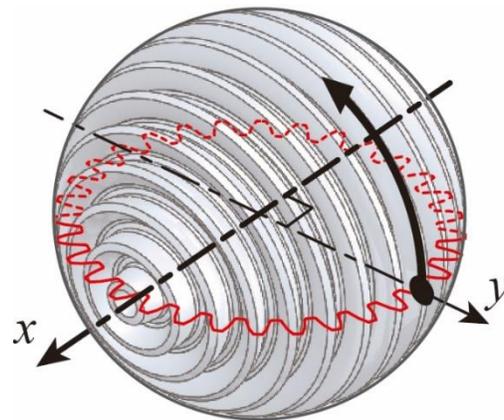
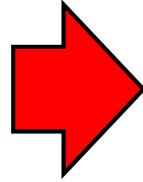
(カメラの首振り機構
として)



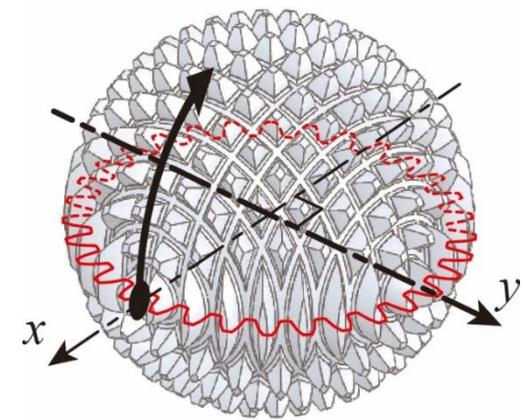
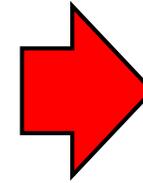
球状歯車の構造の原理



球状歯車の中の
xy平面上にz軸周りに
インボリュート曲線
を描く。

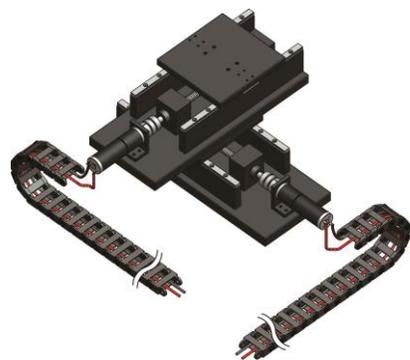


インボリュート曲線
をx軸周りに回転
させる。



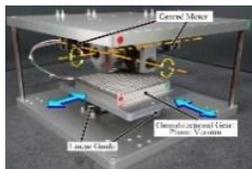
インボリュート曲線
をy軸周りに回転
させ、互いに直交
する歯車列を球核
の表面に構成する。

研究開発の過程

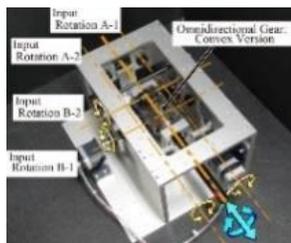
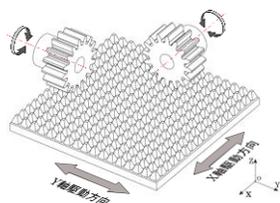


2段構造

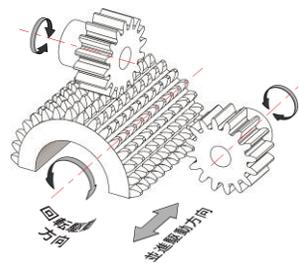
1段構造



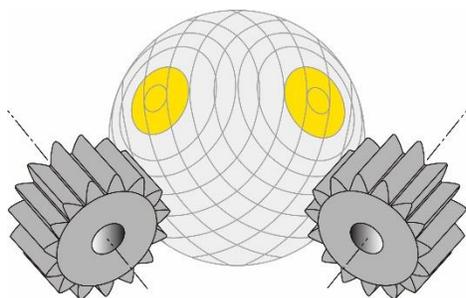
1方向に曲率を有する曲面への対応



直交する2方向に曲率を有する球面への対応



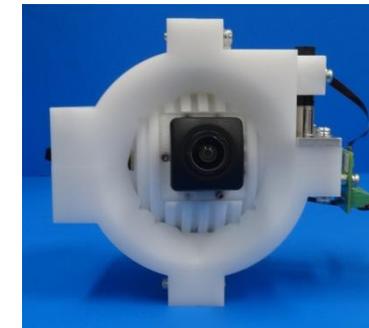
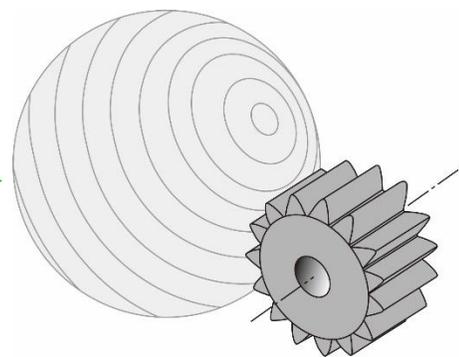
一旦保留



「極構造」に平歯車は噛み合えない。

2段構造への 回帰

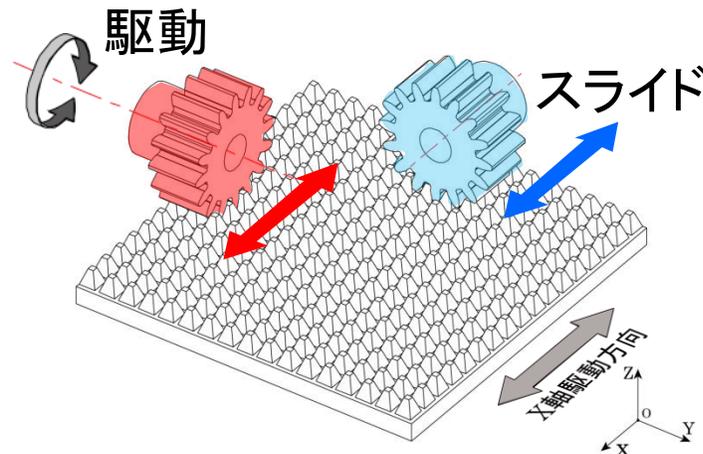
直交する2方向に曲率を有する球面への対応



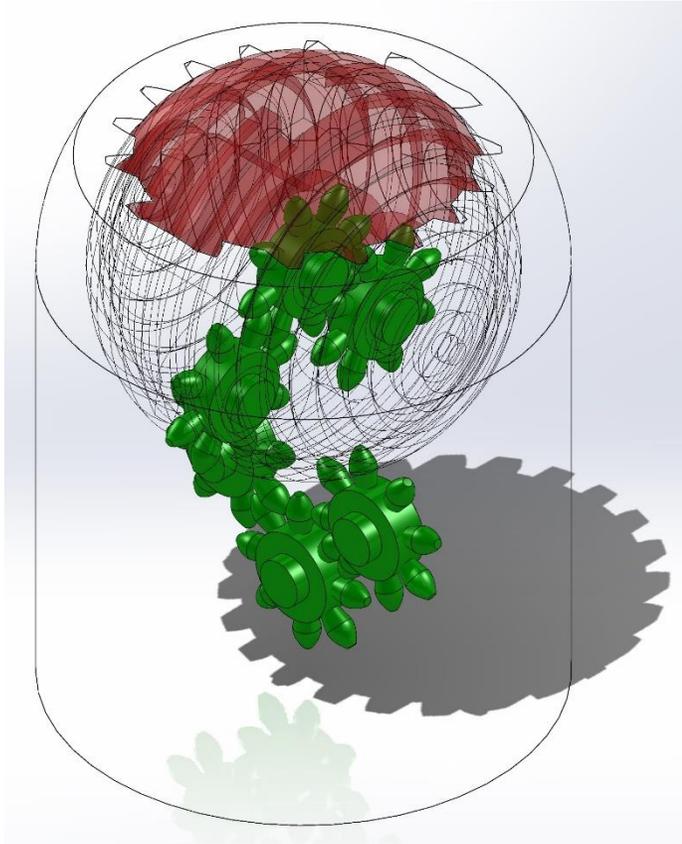
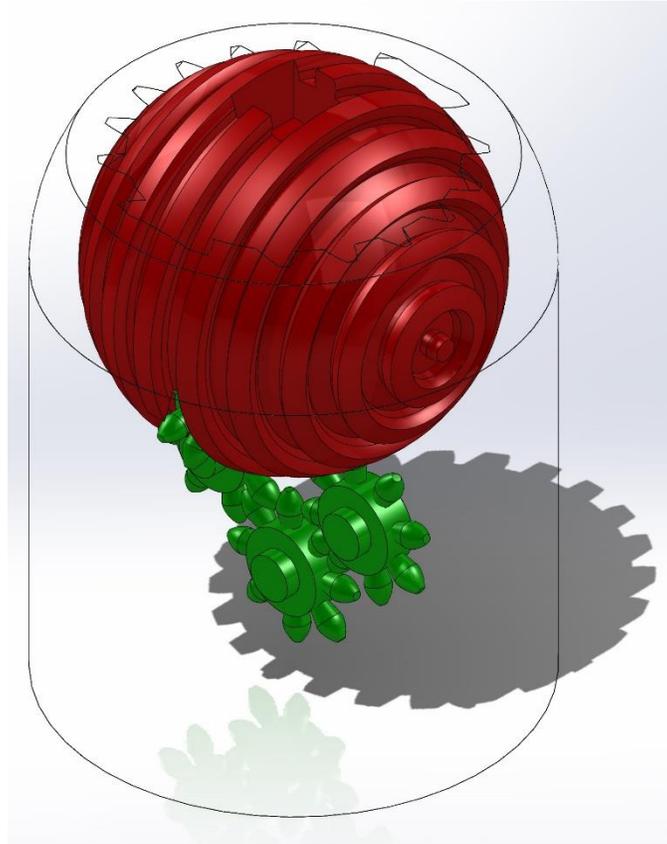
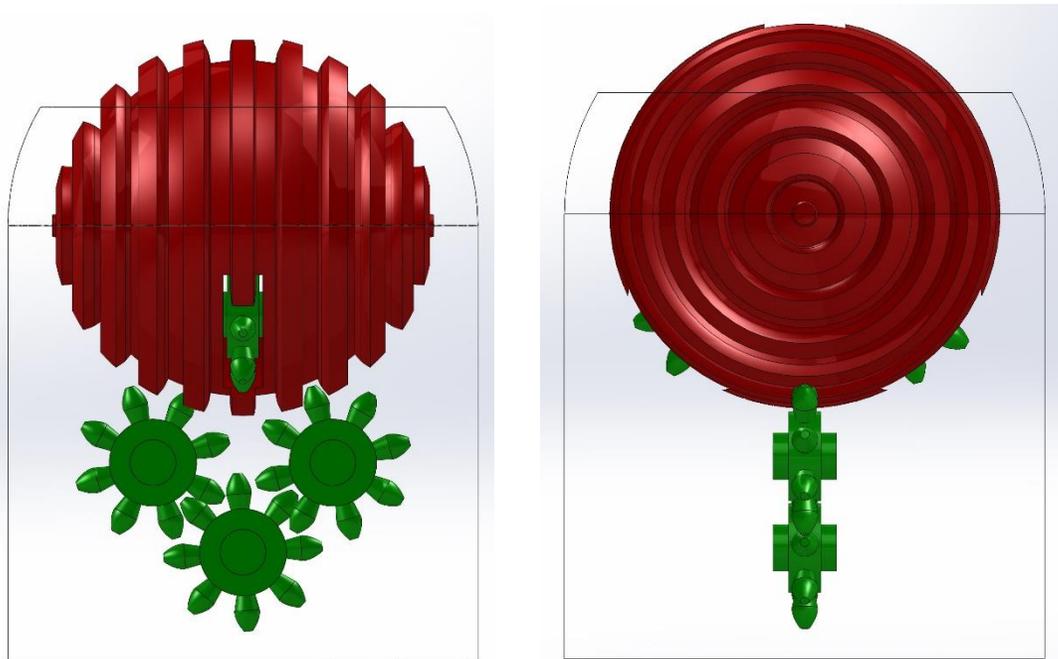
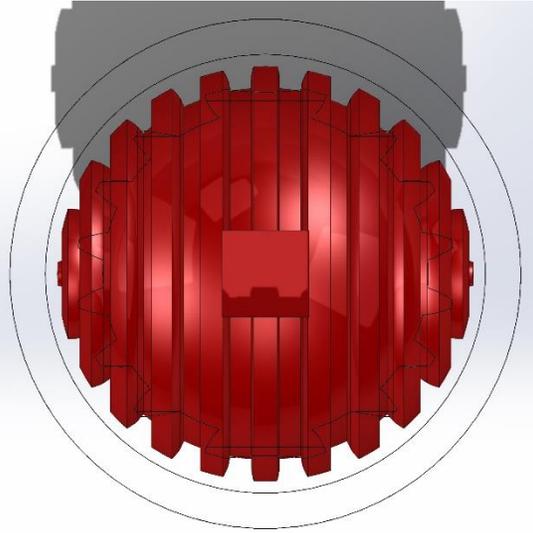
全方向駆動歯車機構の基本原理

- ラックが2軸直交するように歯切りした面が存在
- 入力用機構として、2つの平歯車が回転軸を90度ずらして配置。
歯車の回転軸と直角方向：**能動**。歯車の回転により、駆動力を生成。

歯車の回転軸方向：**受動的な滑り接触**

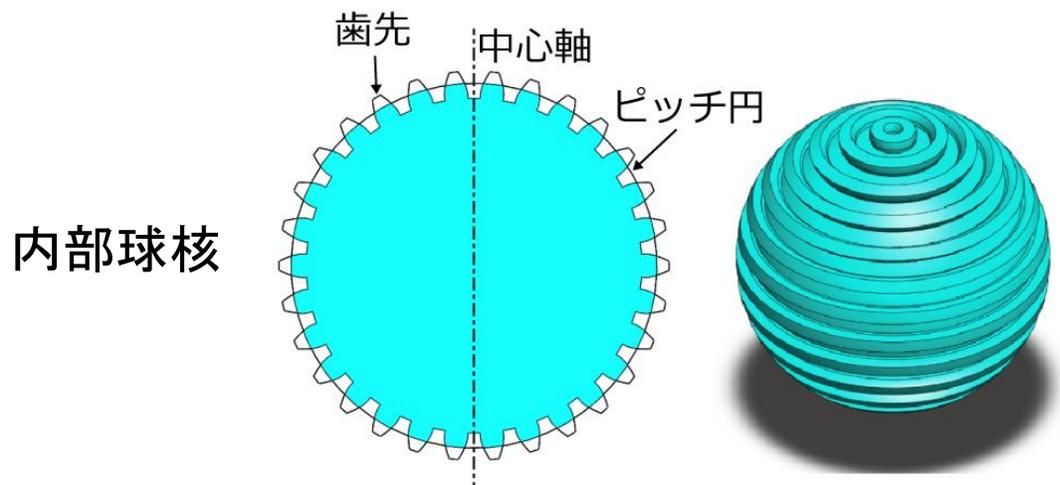
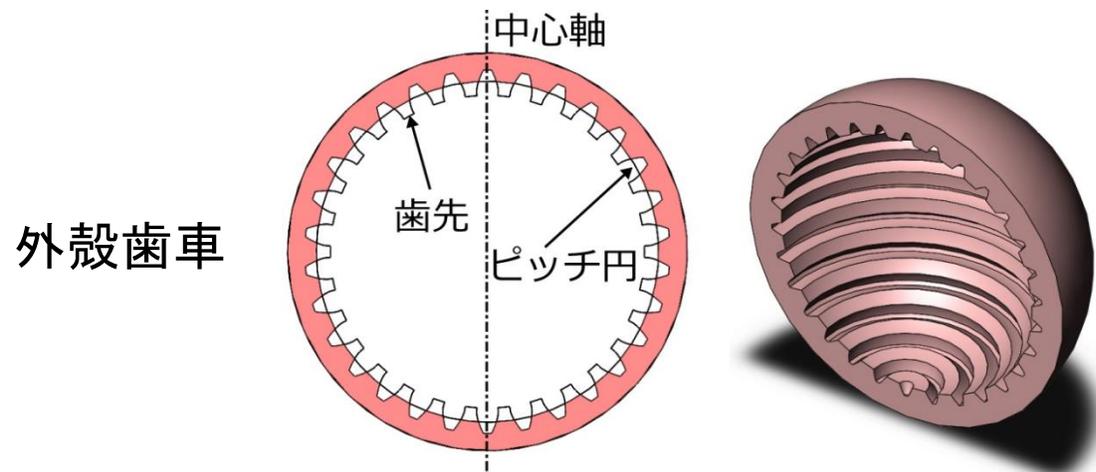


2自由度の球状歯車機構

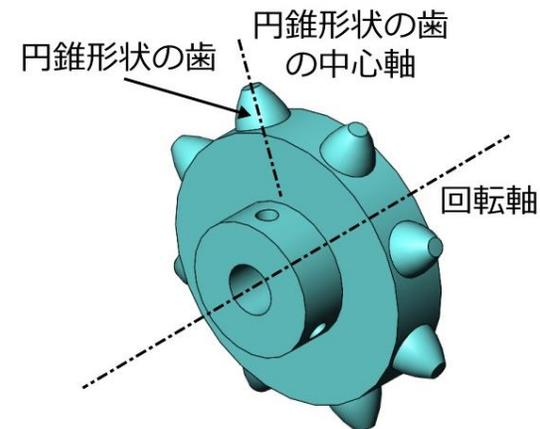
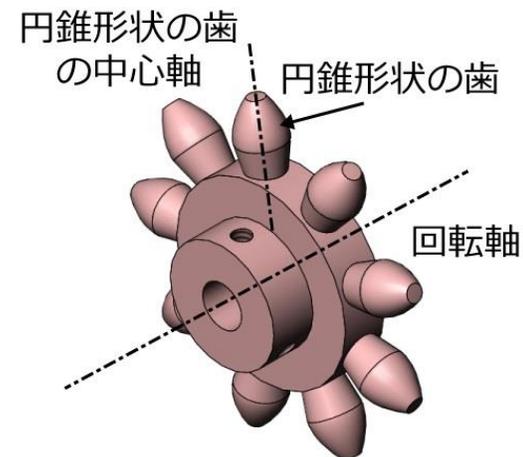


2自由度球状歯車機構の構成部品

ピッチ円までのレール状の歯を持つ歯車

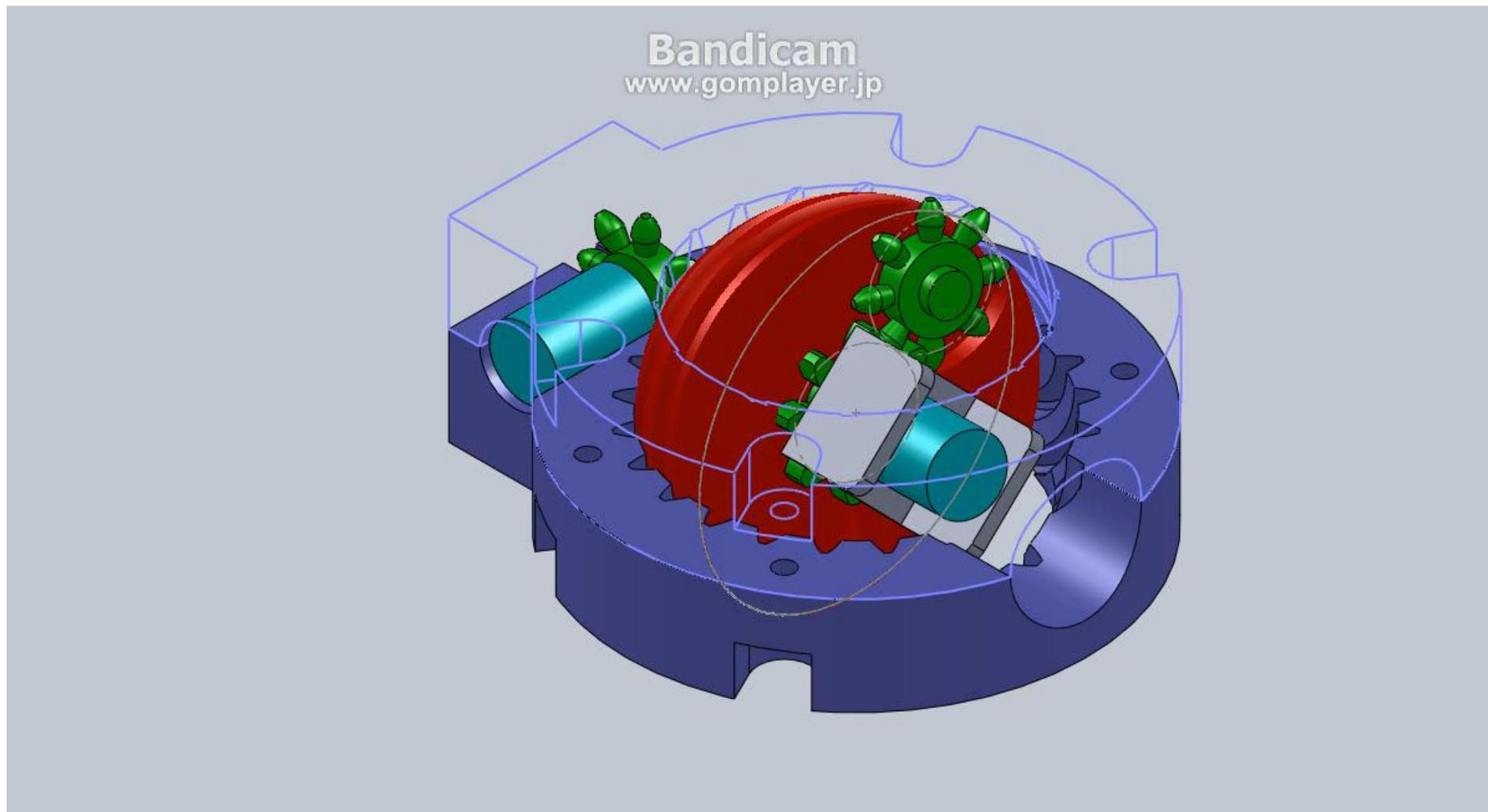


円錐形状の歯を持つ歯車

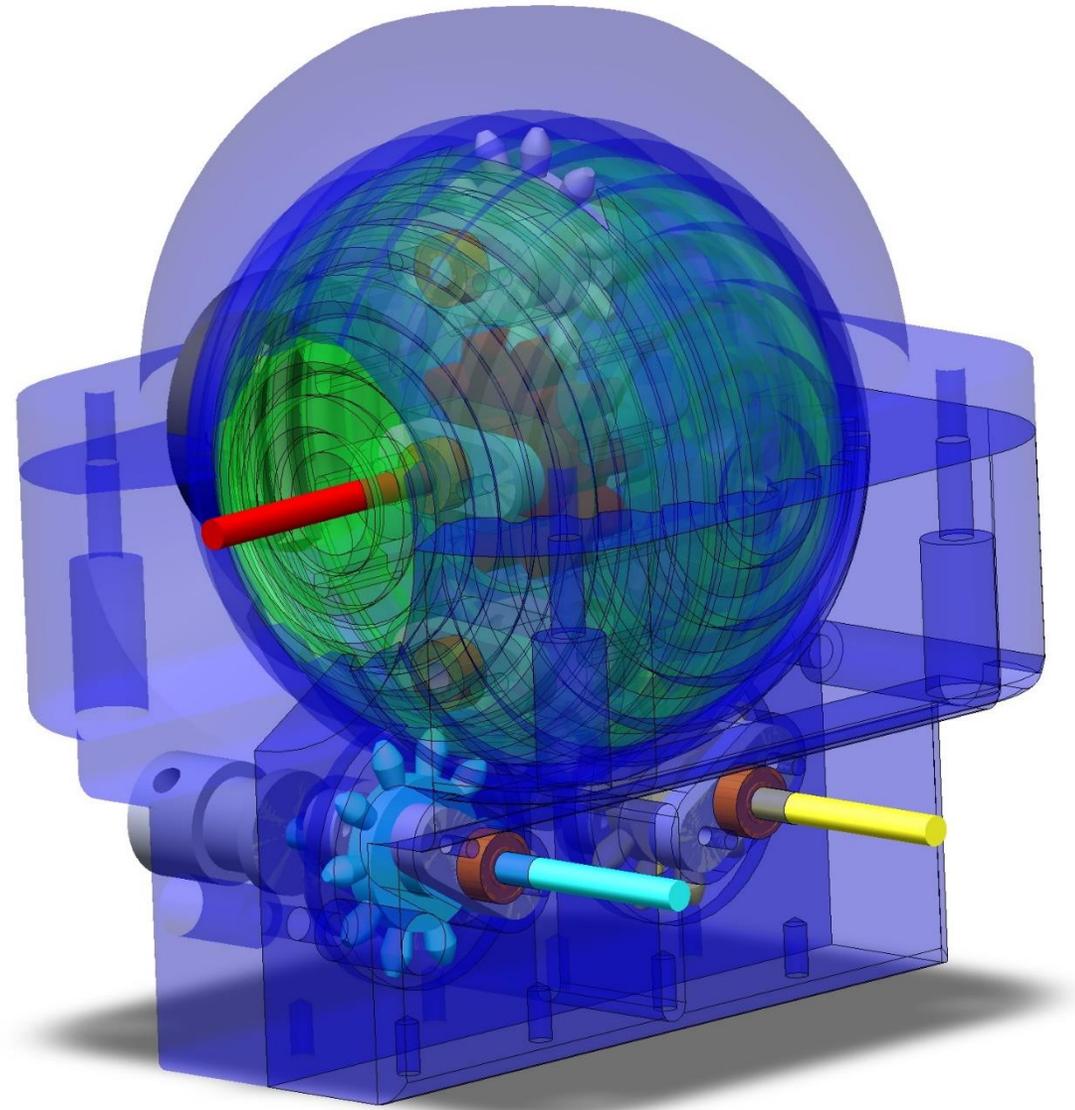
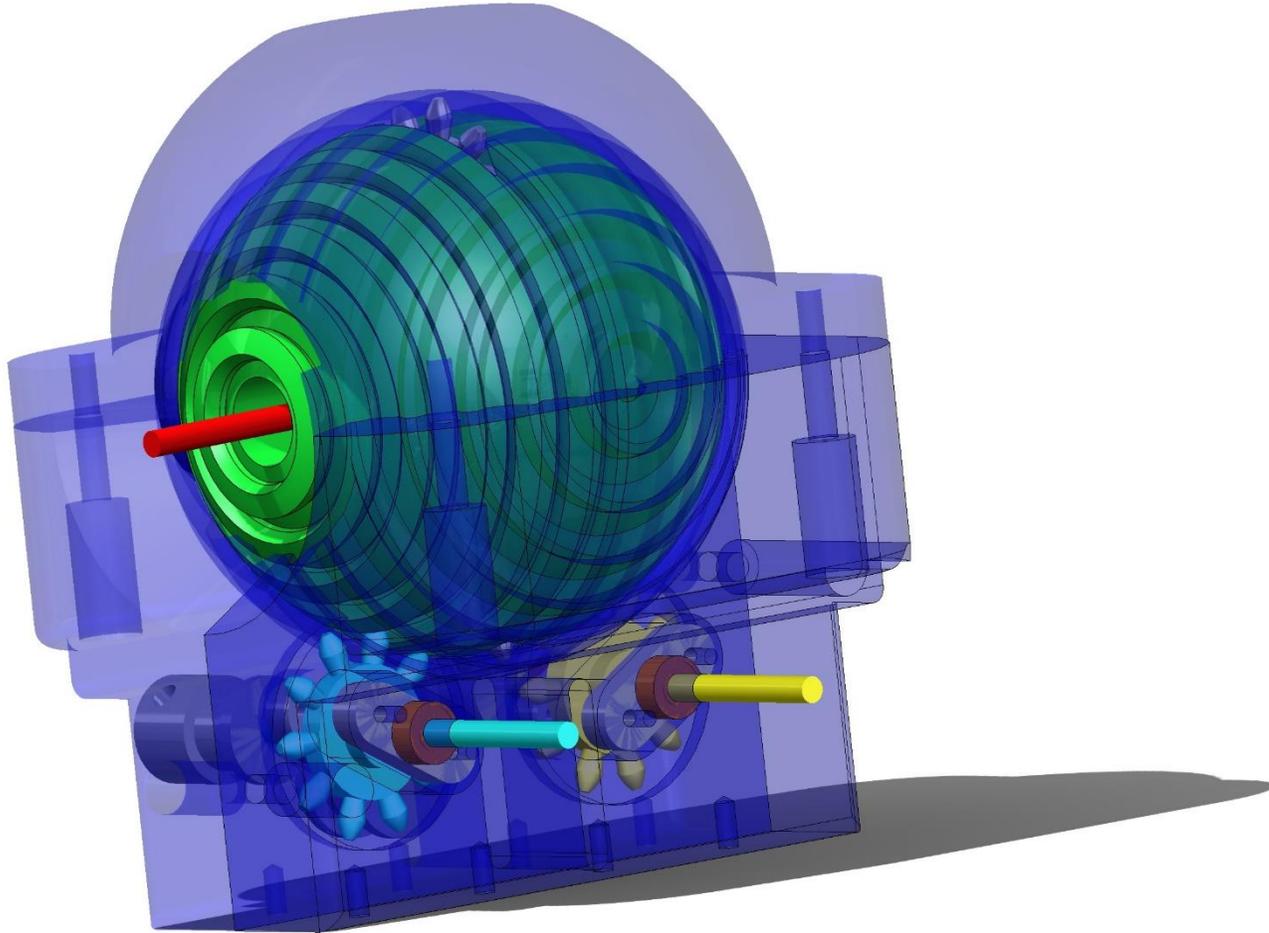


円錐歯車

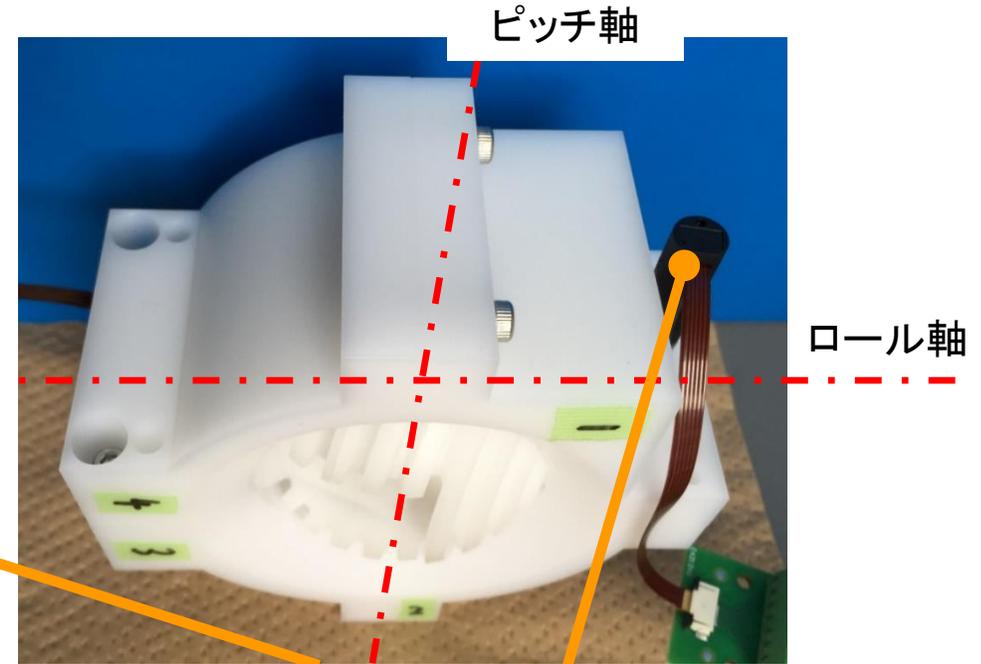
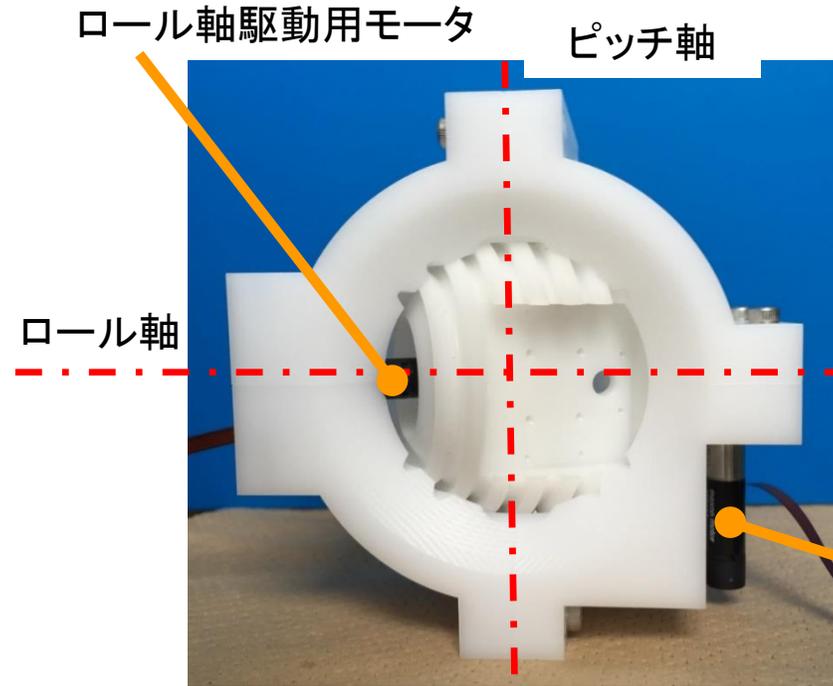
球状歯車の内部構造



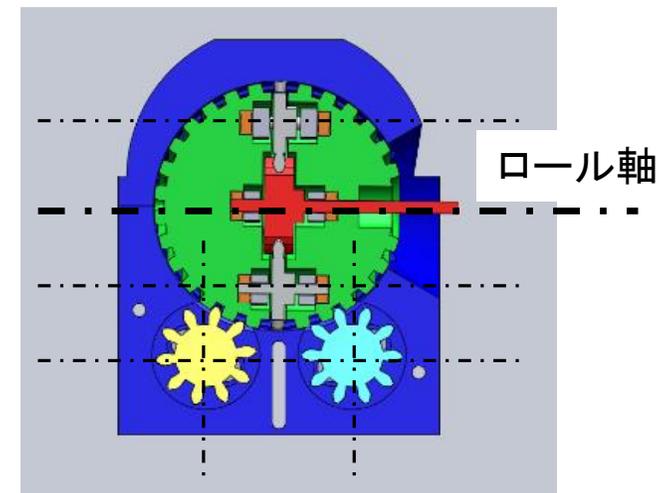
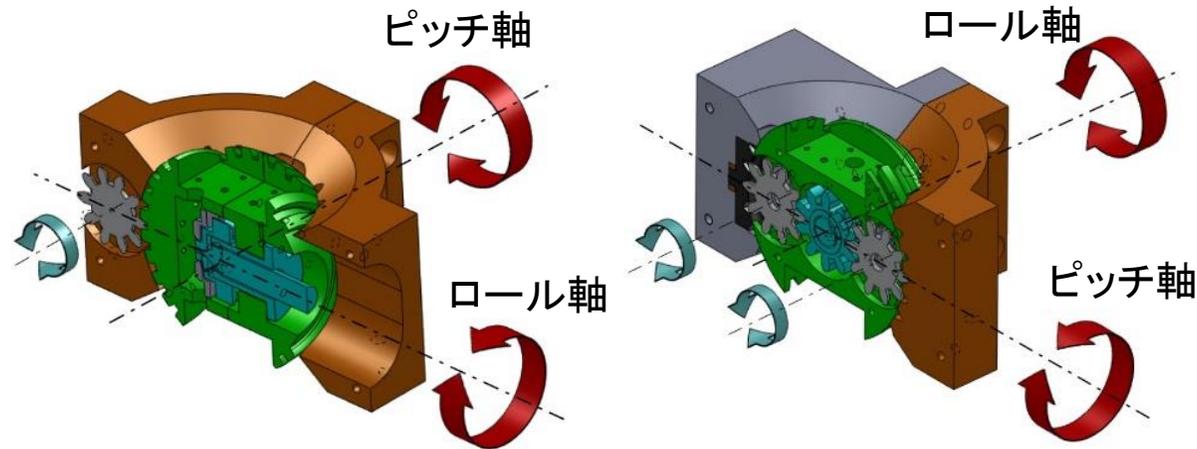
2自由度の球状歯車機構



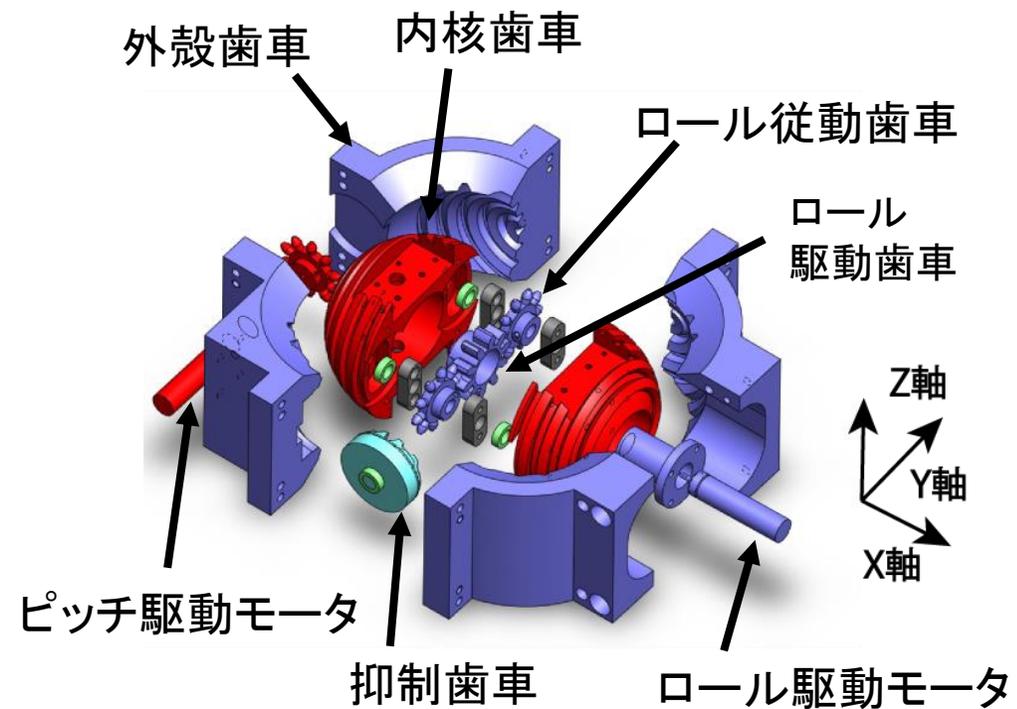
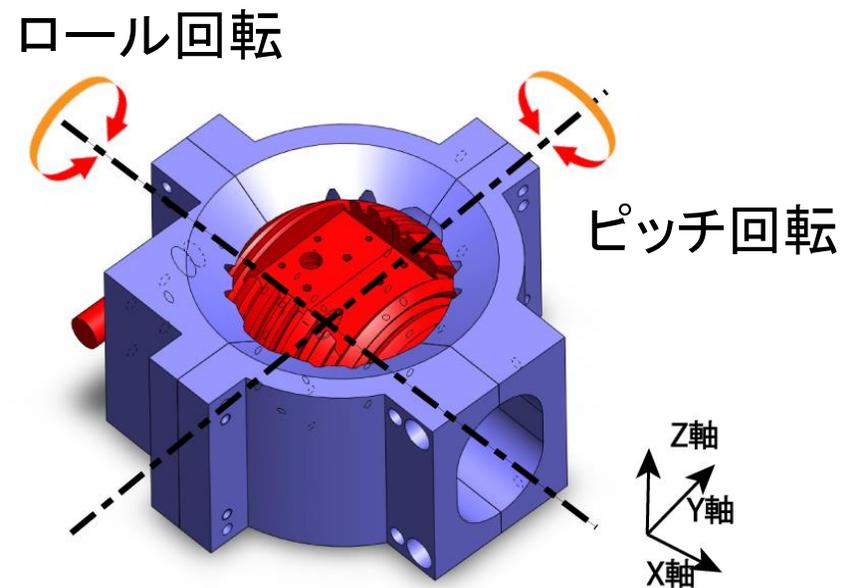
2自由度の球状歯車機構



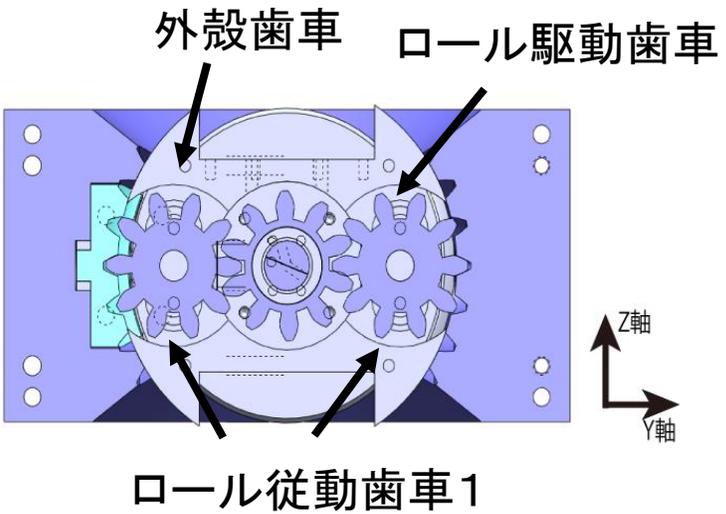
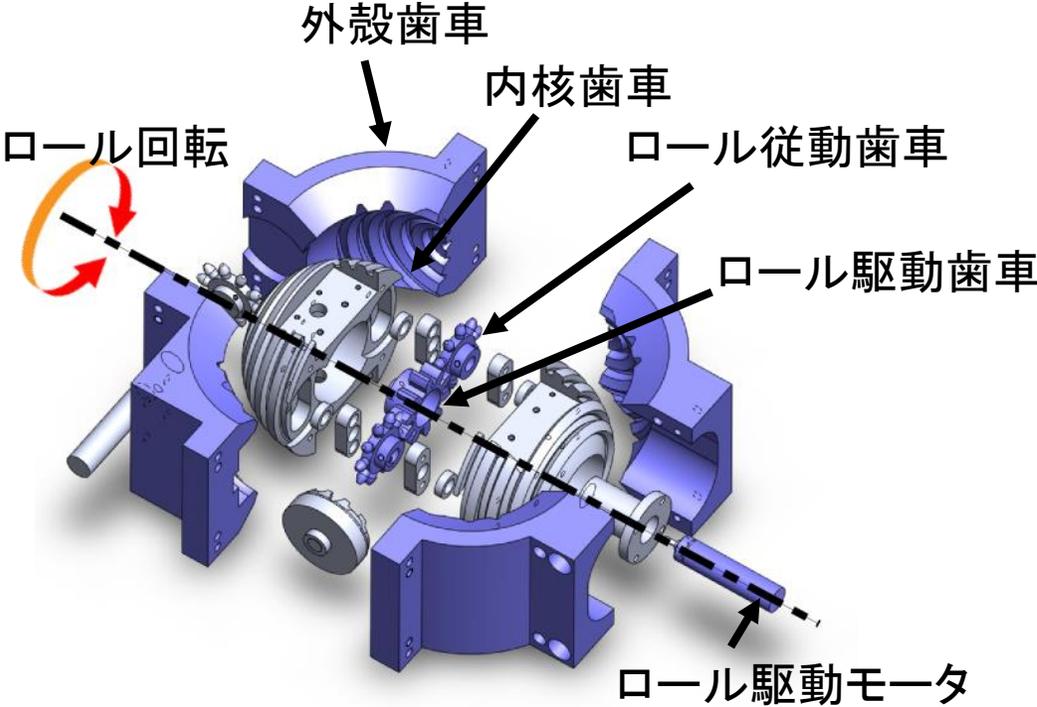
内部の球状歯車の直径 $\Phi 60$ [mm], 出力トルク 1 [Nm]



球状歯車の内部構造

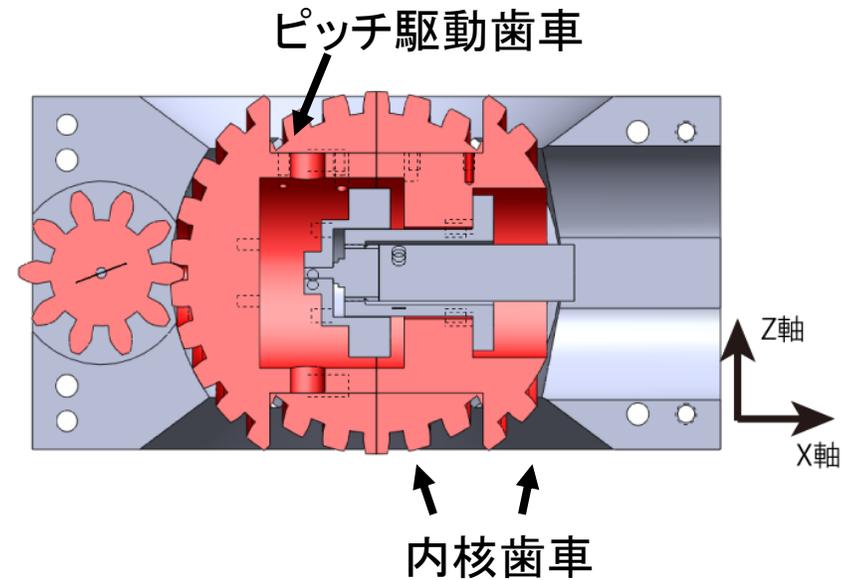
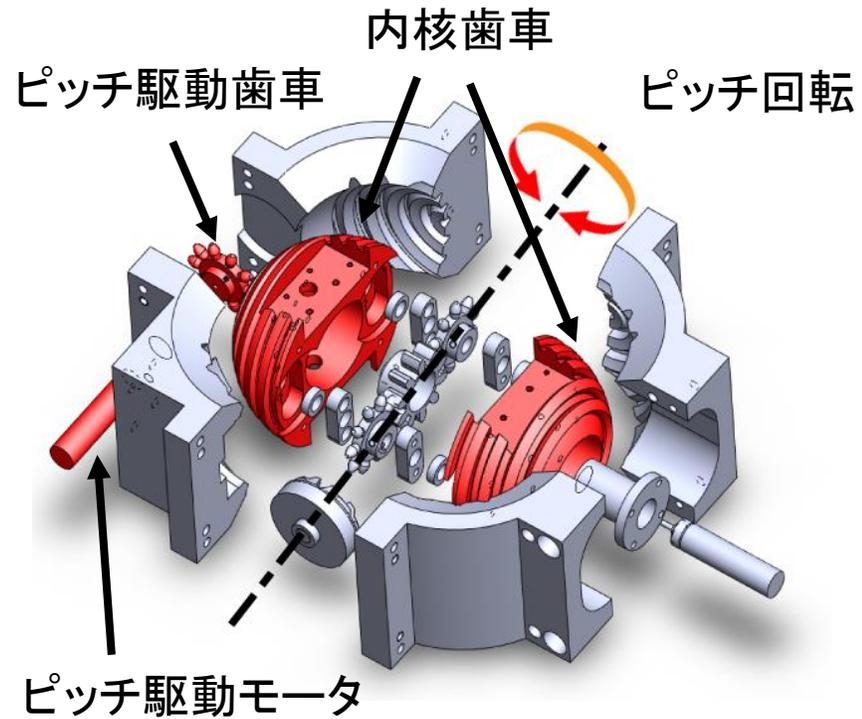


ロール軸回転機構



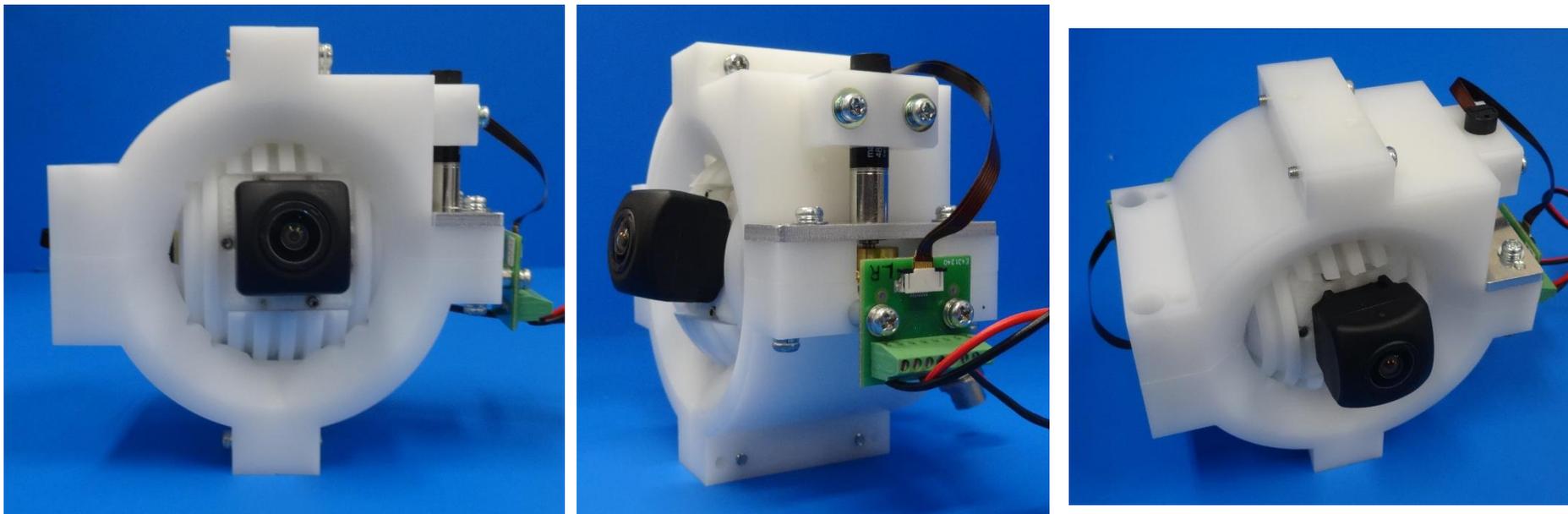
Y-Z断面図

ピッチ軸回転機構



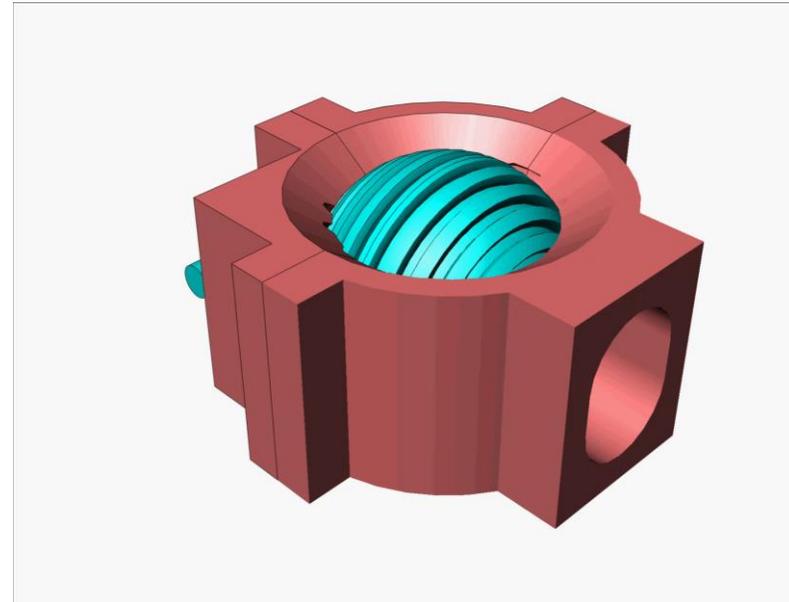
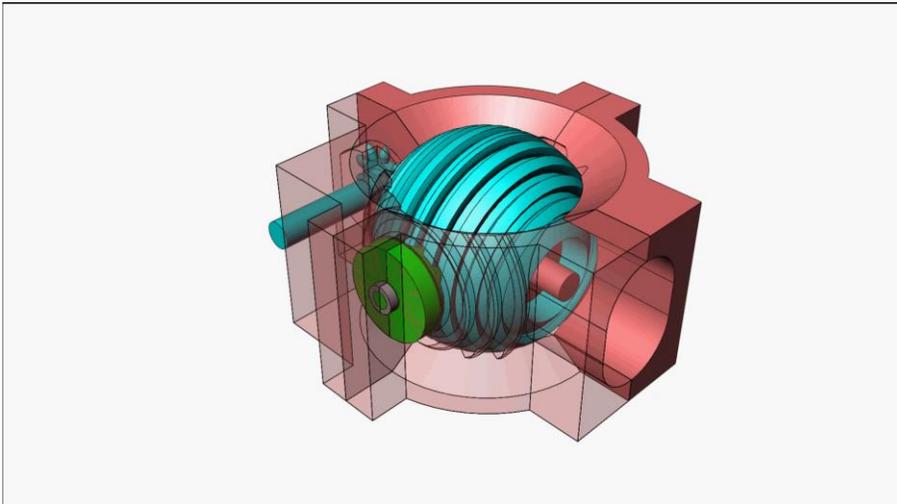
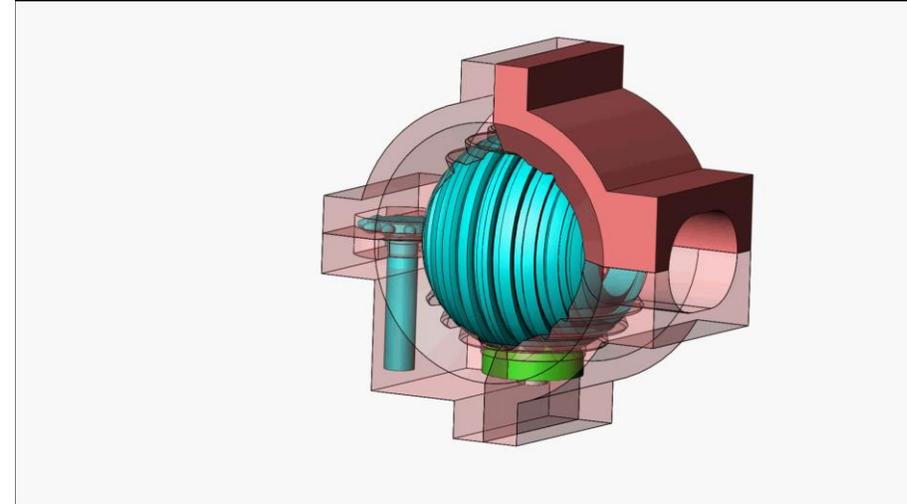
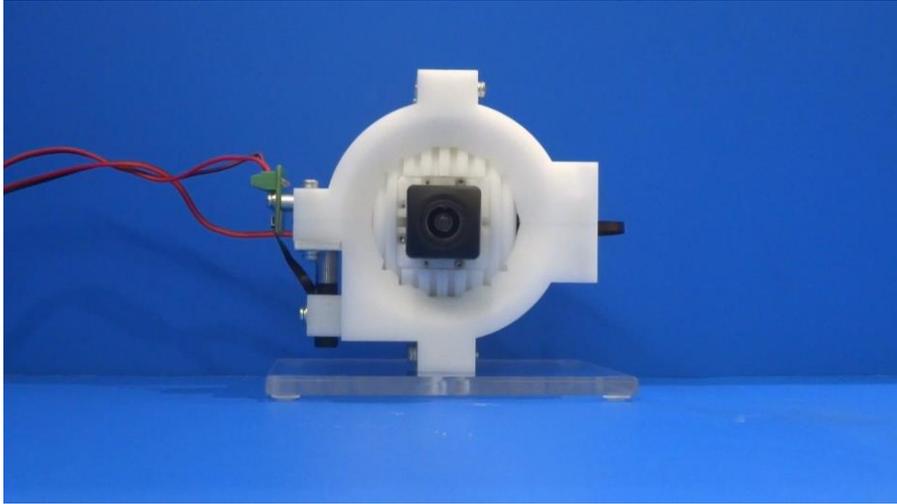
X-Z断面図

2自由度の球状歯車



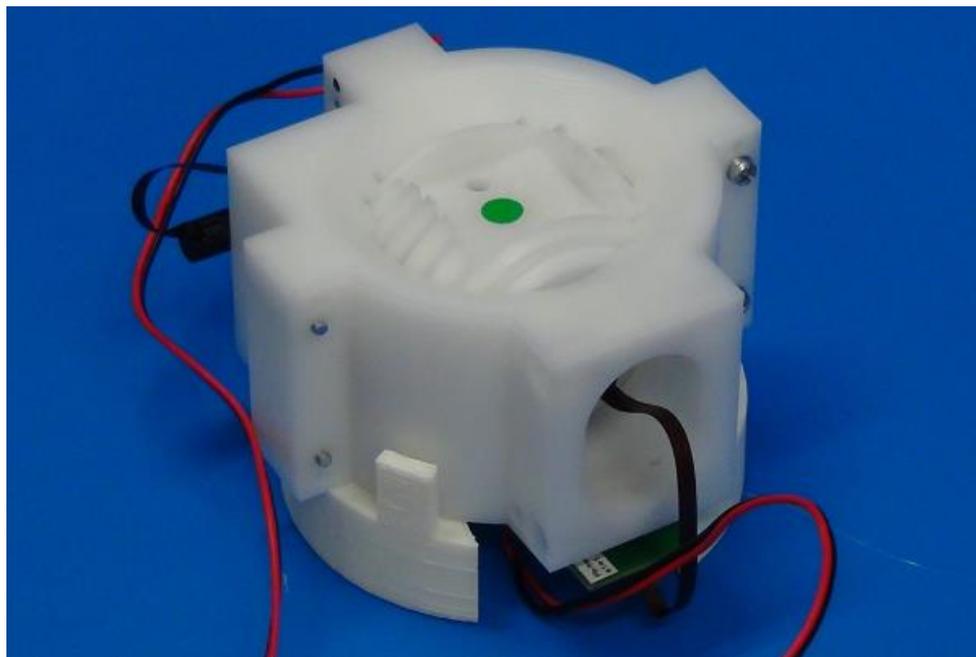
出力・重量比の高い小型・軽量アクチュエータ

2自由度の球状歯車



2自由度の球状歯車

● 内部球核を出力軸とした機構



装置仕様

装置重量[g]	374
材料	POM
ロール回転角 [deg]	±35
ピッチ回転角 [deg]	±65

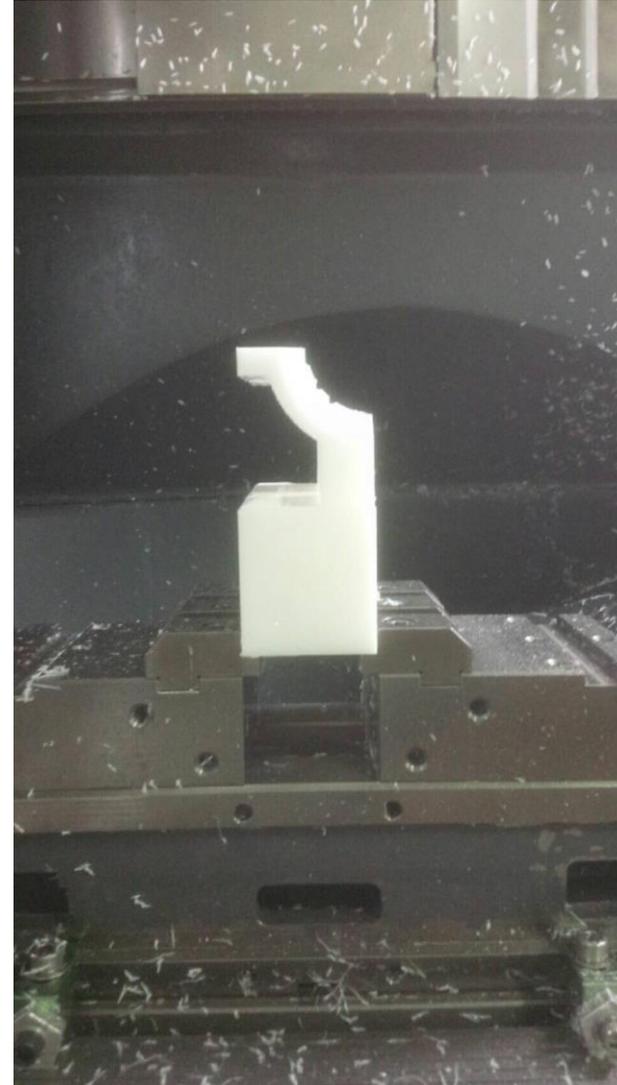
5軸CNCフライス盤のボールエンドミルによる 球状歯車の切削加工



(株式会社
小野電機
製作所提供)



5軸CNCフライス盤のボールエンドミルによる 球状歯車の切削加工

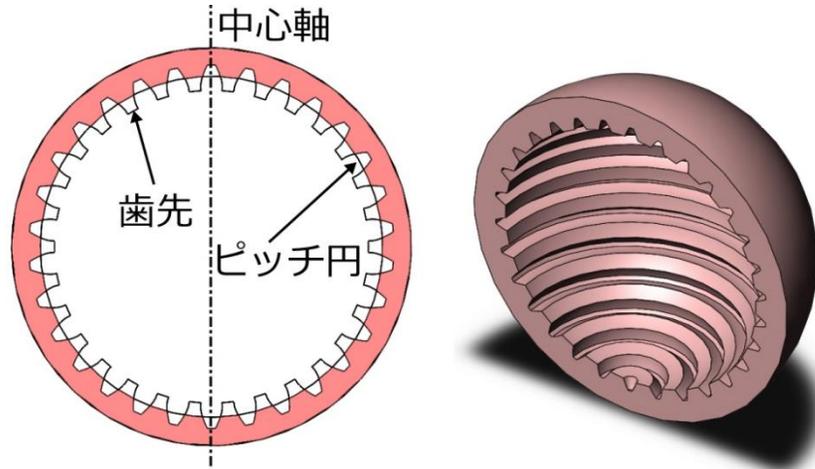


(株式会社
小野電機
製作所提供)

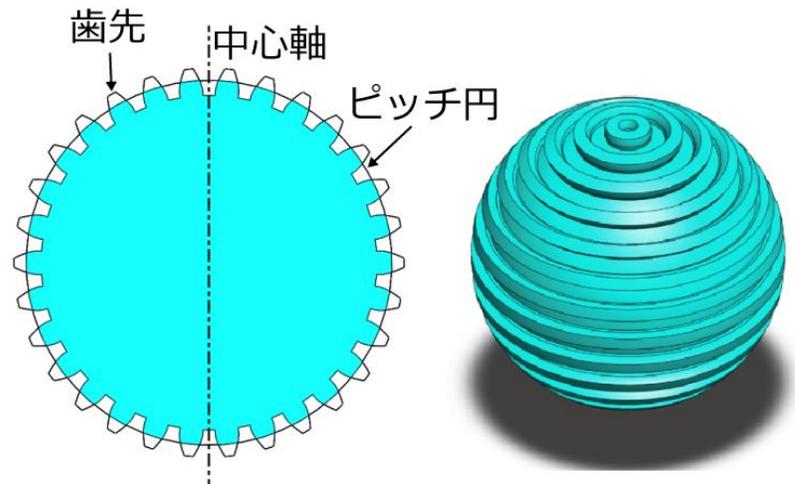
2自由度球状歯車機構の構成部品 (1/3)

ピッチ円までのレール状の歯を持つ歯車

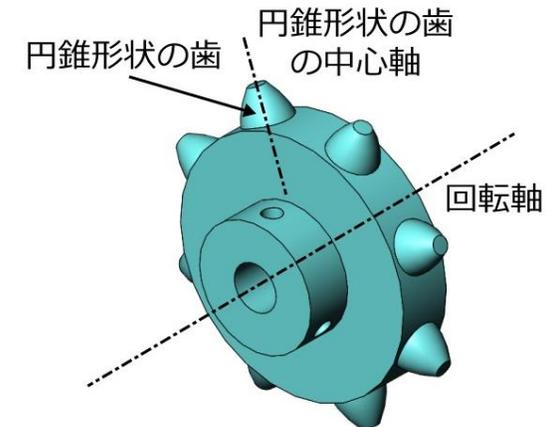
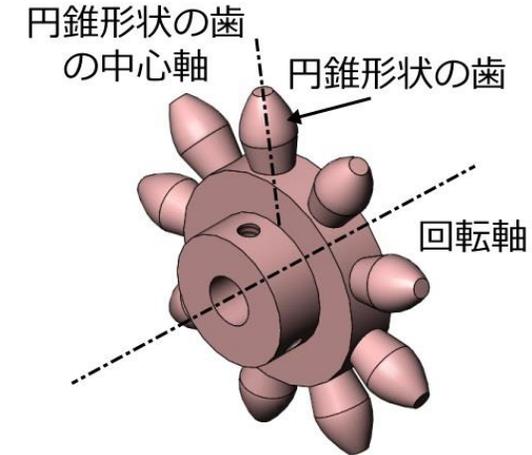
外殻歯車



内部球核



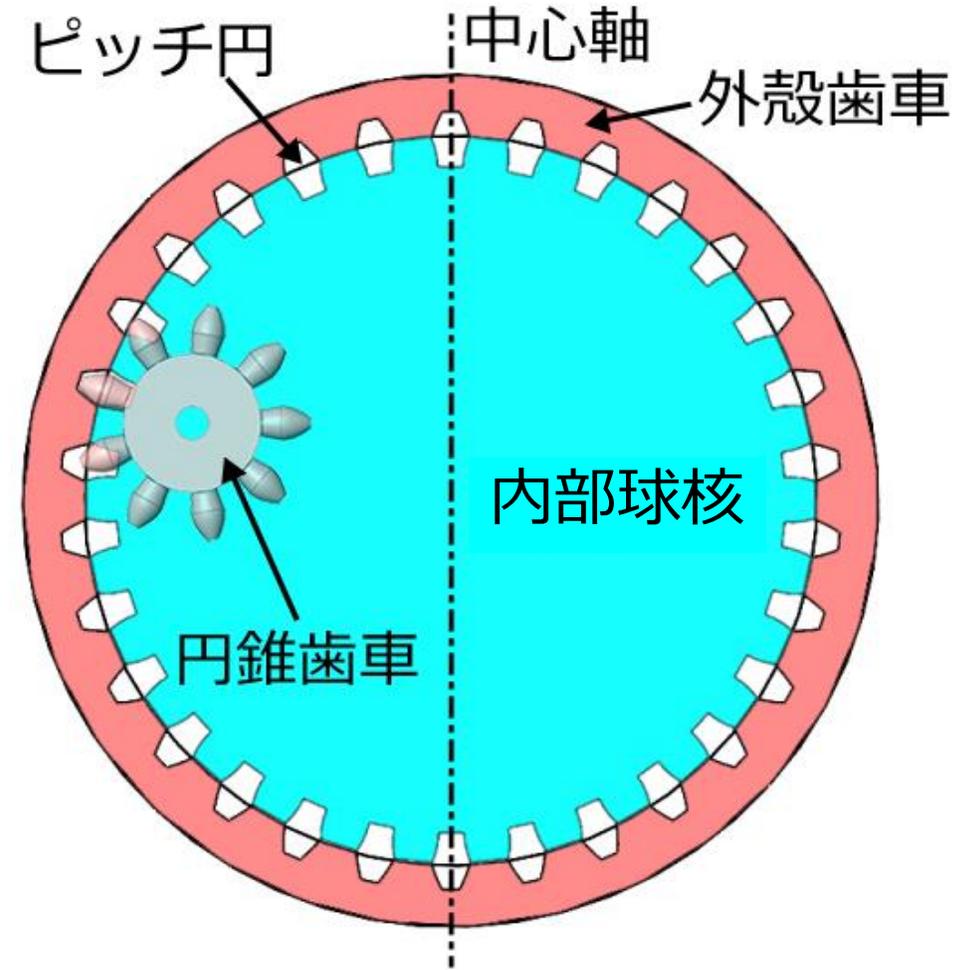
円錐形状の歯を持つ歯車



円錐歯車

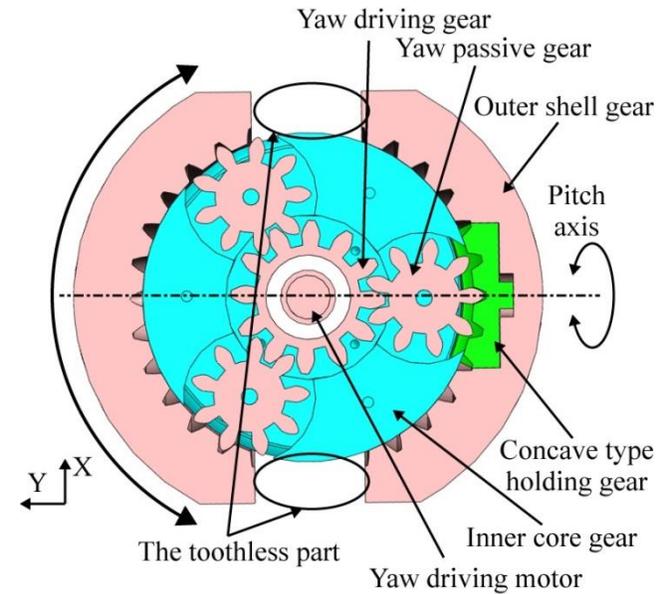
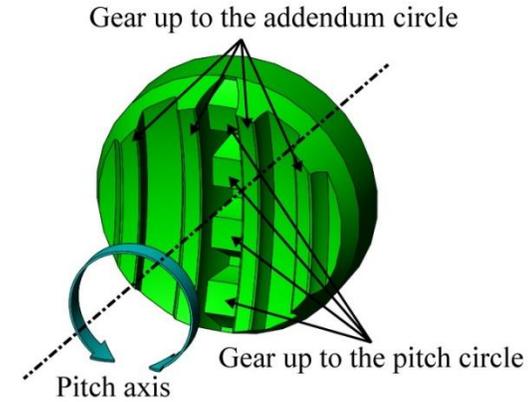
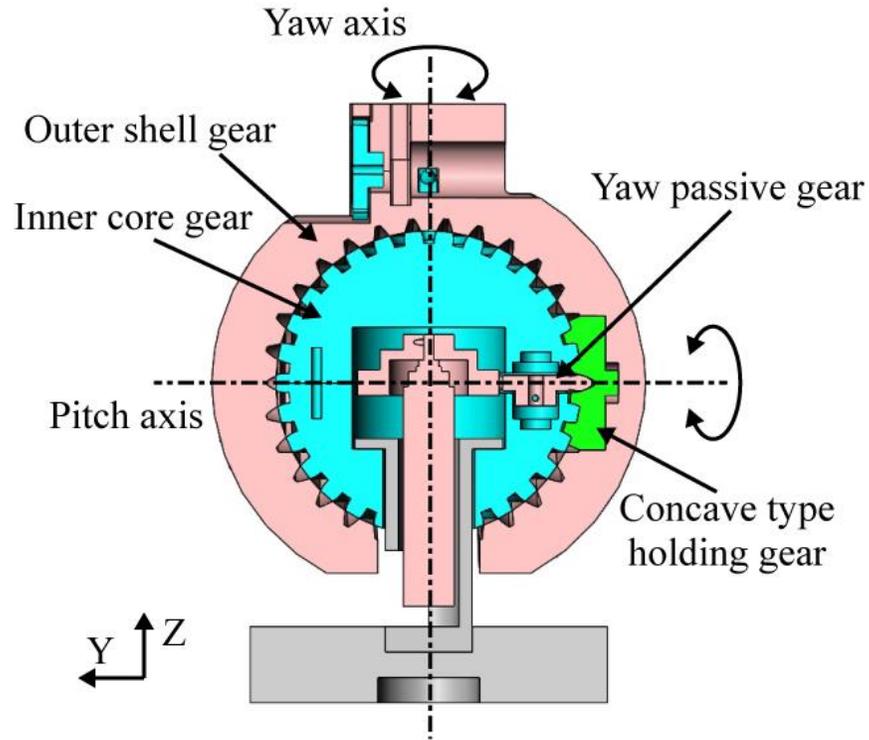
2自由度球状歯車機構の構成部品 (2/3)

- 内部球核と外殻歯車は
同じモジュール、圧力角、歯数で
ピッチ円までの歯を有する歯車であり、
互いの歯先の歯面がピッチ円上で常に
接触している状態である。
- 外殻歯車は、内部球核を、互いの
境界面で滑らせて支持している。



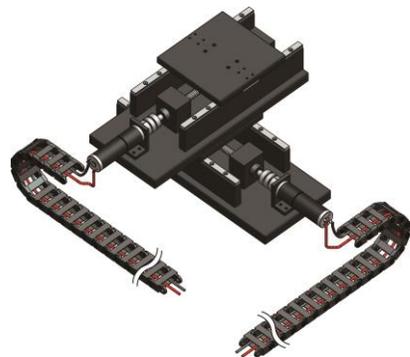
2自由度球状歯車機構の構成部品 (3/3)

【凹型抑制歯車】



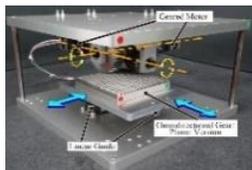
内部球核と外殻歯車の相対姿勢を維持する機能を有する。

研究開発の過程

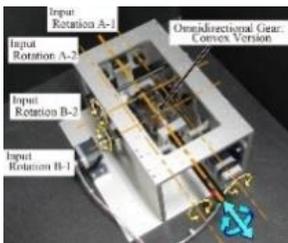


2段構造

1段構造

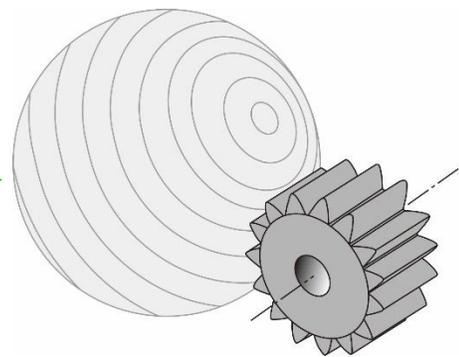
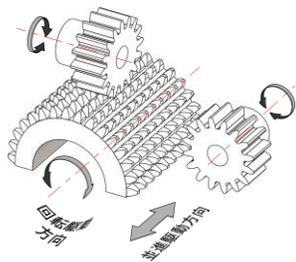
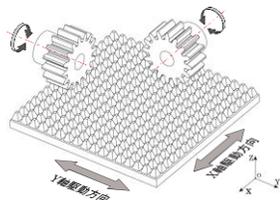
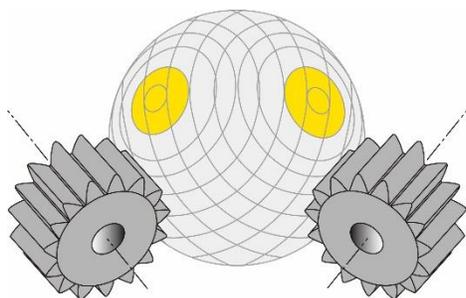


1方向に曲率を有する曲面への対応

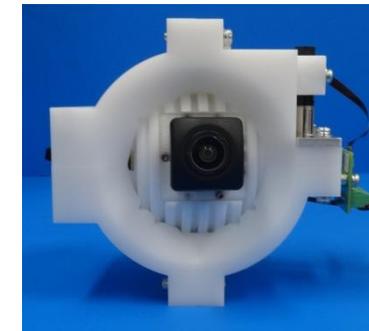


直交する2方向に曲率を有する球面への対応

一旦保留

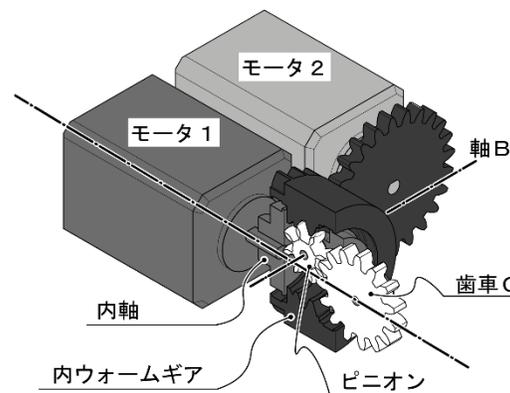


直交する2方向に曲率を有する球面への対応



2段構造への回帰

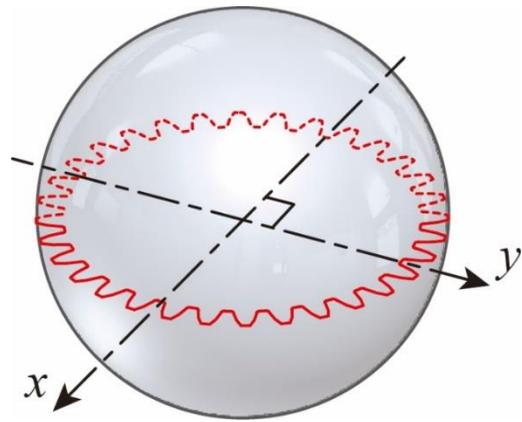
内部球核への入力機構としての「差動機構」を開発。



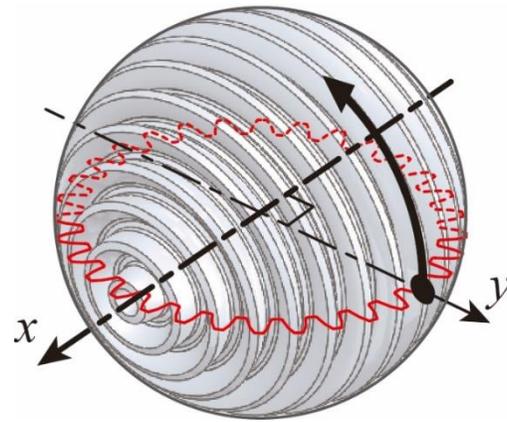
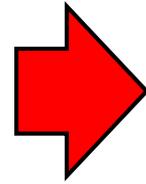
内ウォームギアによる「差動機構」を開発することで、一旦保留した問題を解決した。

「極構造」に平歯車は噛み合えない。

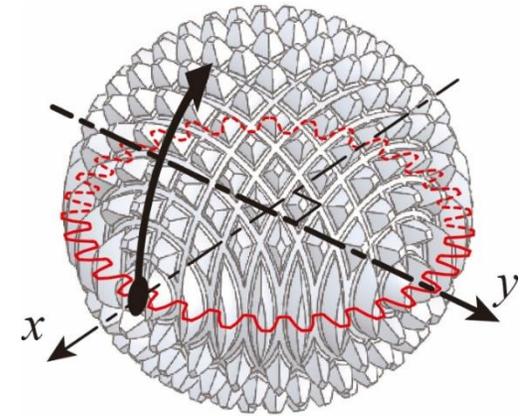
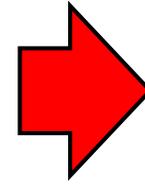
球状歯車の構造の原理



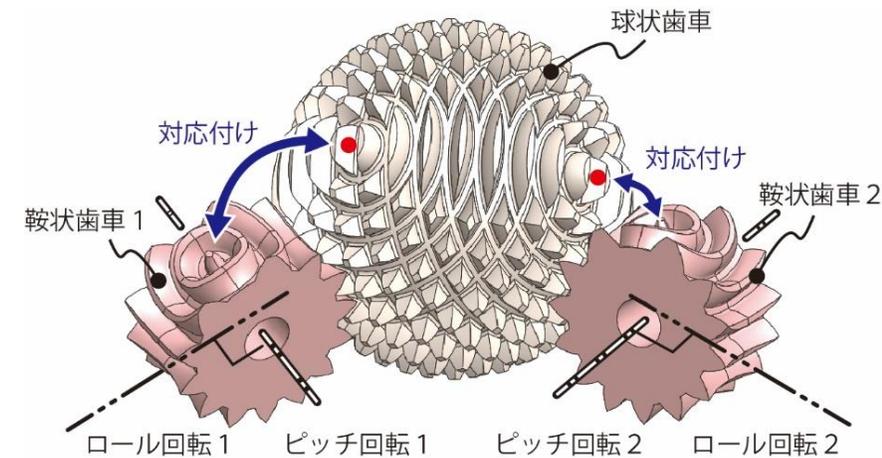
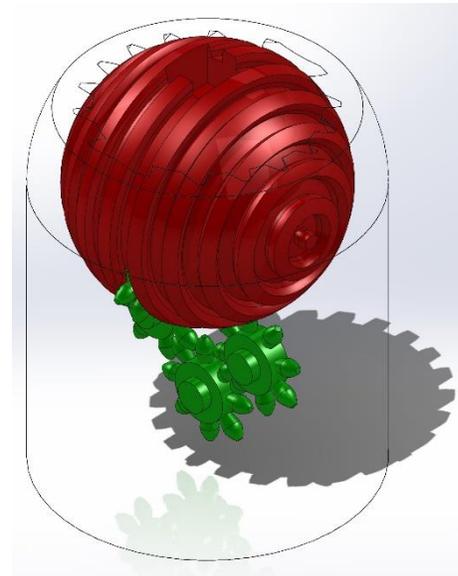
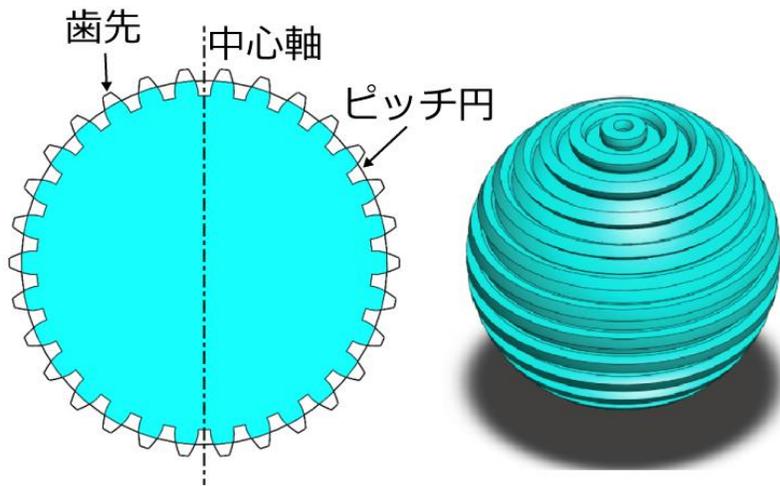
球状歯車の中の
xy平面上にz軸周りに
インボリュート曲線
を描く。



インボリュート曲線
をx軸周りに回転
させる。



インボリュート曲線
をy軸周りに回転
させ、互いに直交
する歯車列を球核の表面に
構成する。

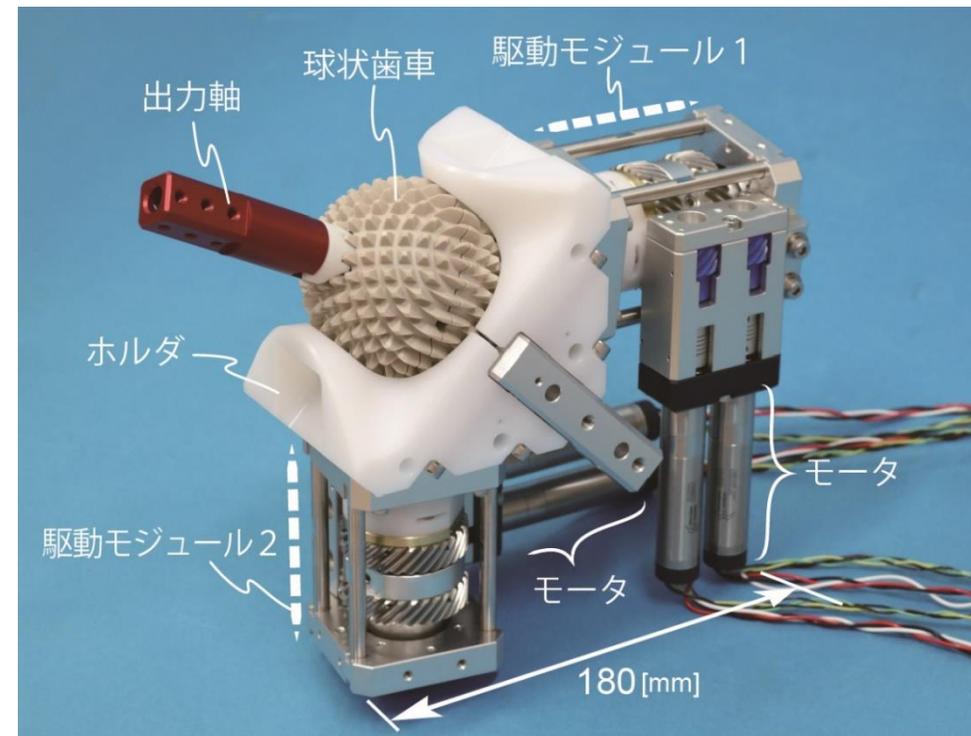
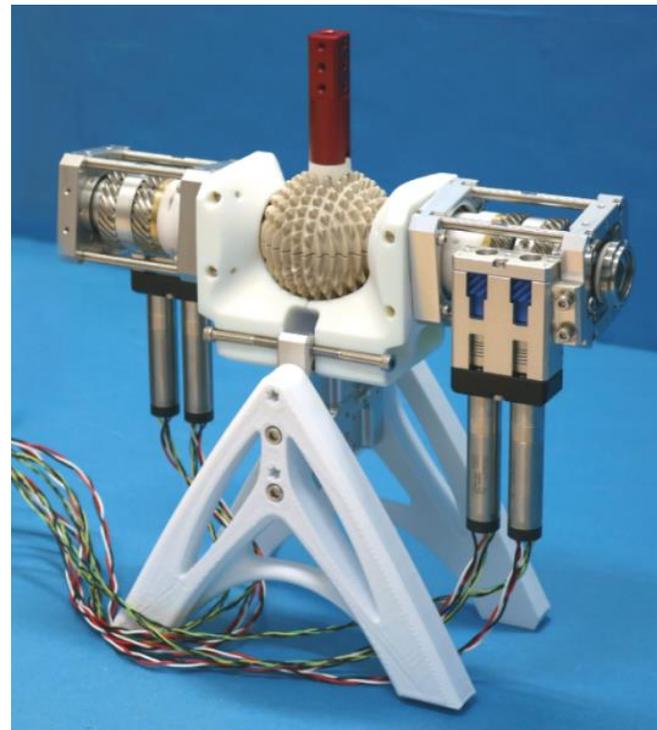


2組の差動機構により駆動される球状歯車

- 2018～2020年にかけて、当時山形大学に在学していた阿部一樹博士（現東北大学特任助教）と共に発明し、研究を進めた。

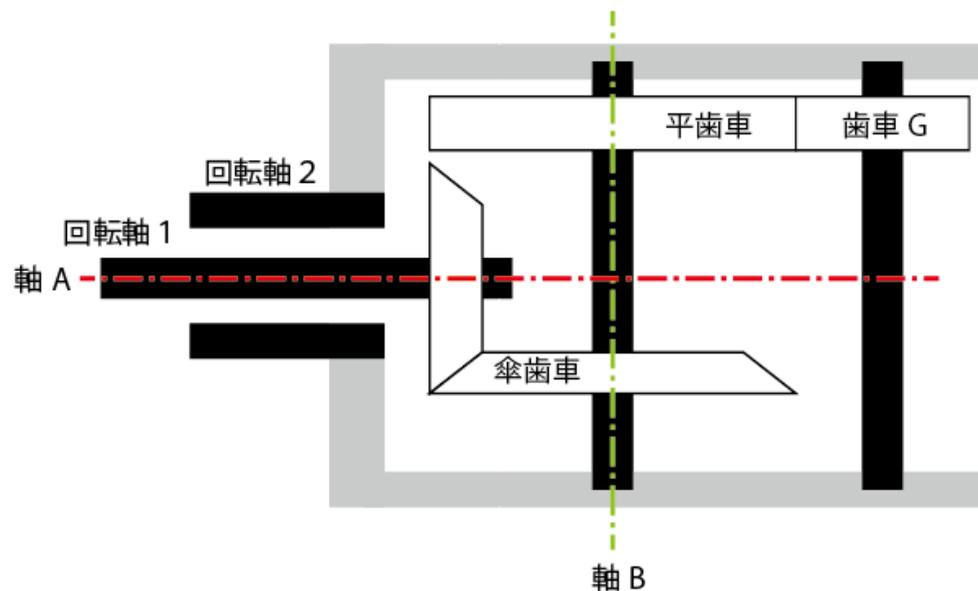


阿部一樹博士



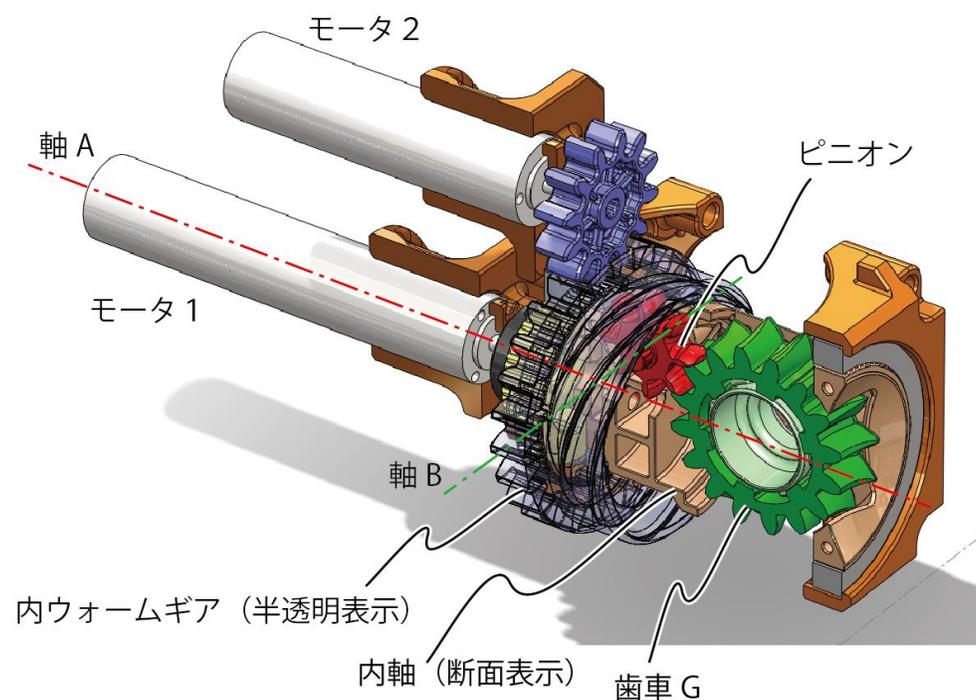
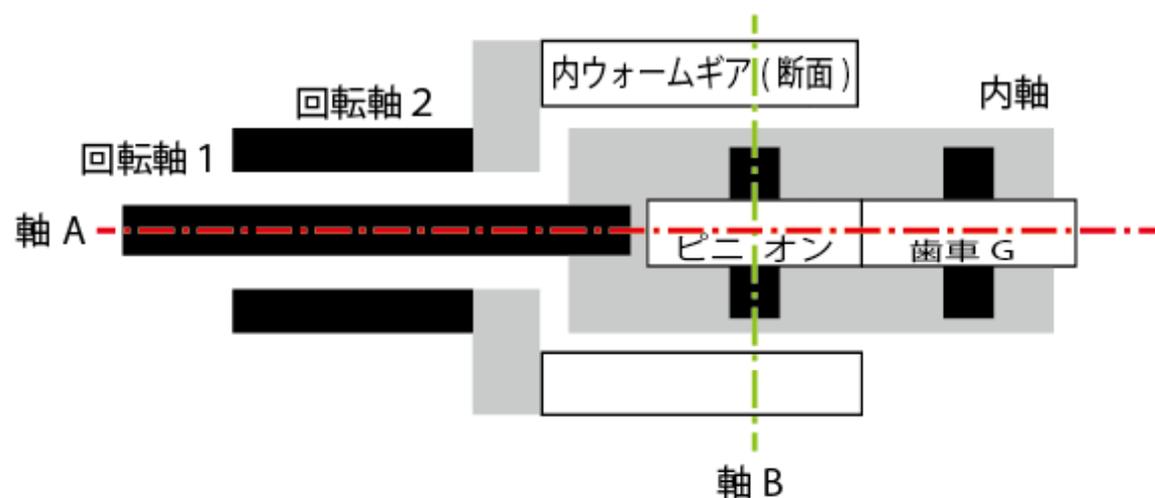
従来の差動機構とその問題点

- 傘歯車を用いた差動機構には、出力のための平歯車（下図歯車G）が別に必要となる。
- 傘歯車を用いた差動機構では、スラスト荷重によるガタとエネルギー損失があった。

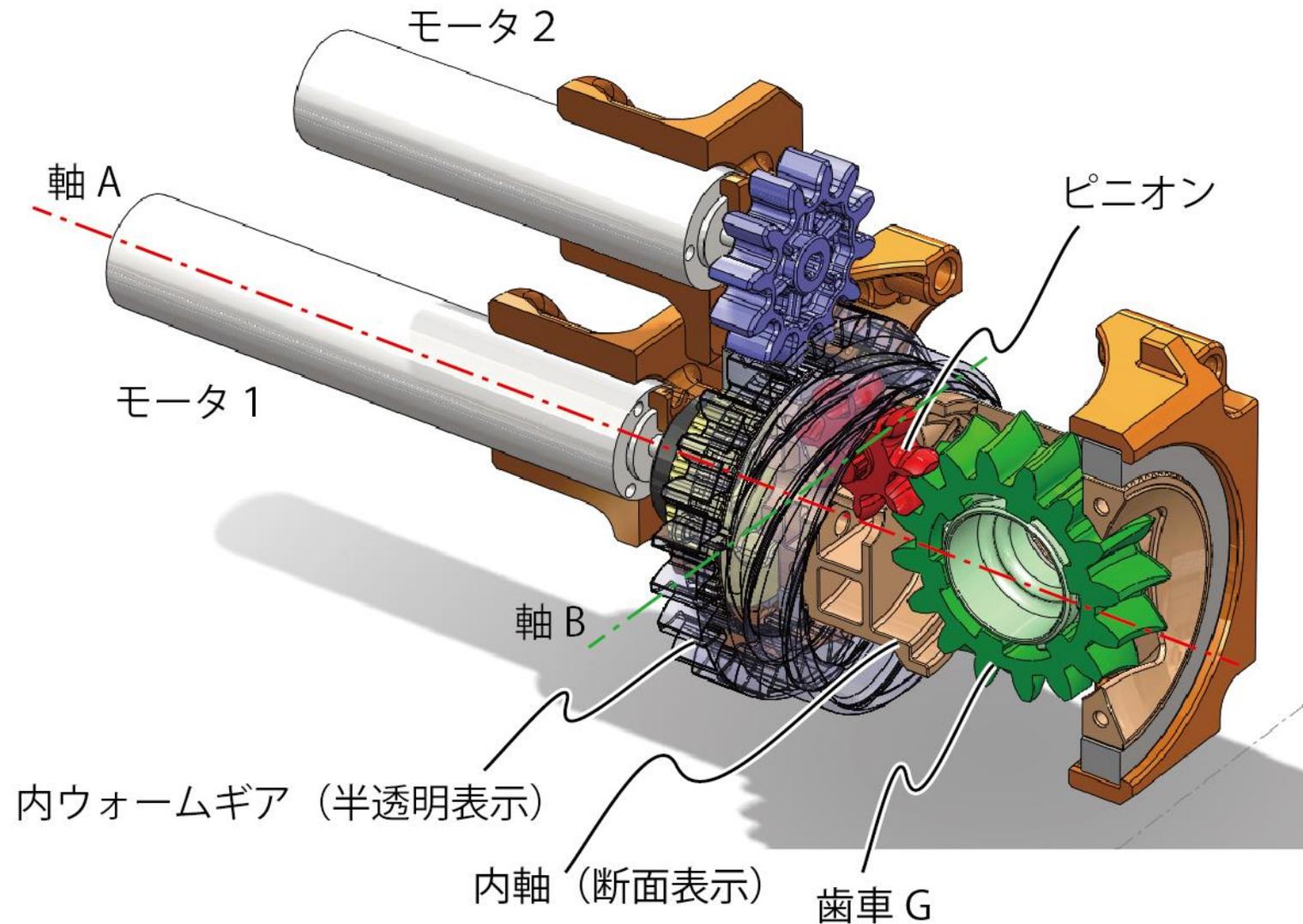


内ウォームギア機構による差動機構の特長

- 内ウォームギア機構においては、ピニオンギアがそのまま出力用の歯車(下図歯車G)と噛み合うため、出力軸に平歯車を別に取り付ける必要が無く、小型・軽量化しやすい。
- 傘歯車と異なり、内ウォームギアはスラスト荷重が大きくなるため、ガタが発生しにくく、静粛性が高い。
- ウォームギア特有の「セルフロック」機能により、重力モーメントなどの負荷に耐えて、姿勢を維持しやすい。
- 密閉性の高い動力伝達機構を実現可能である。

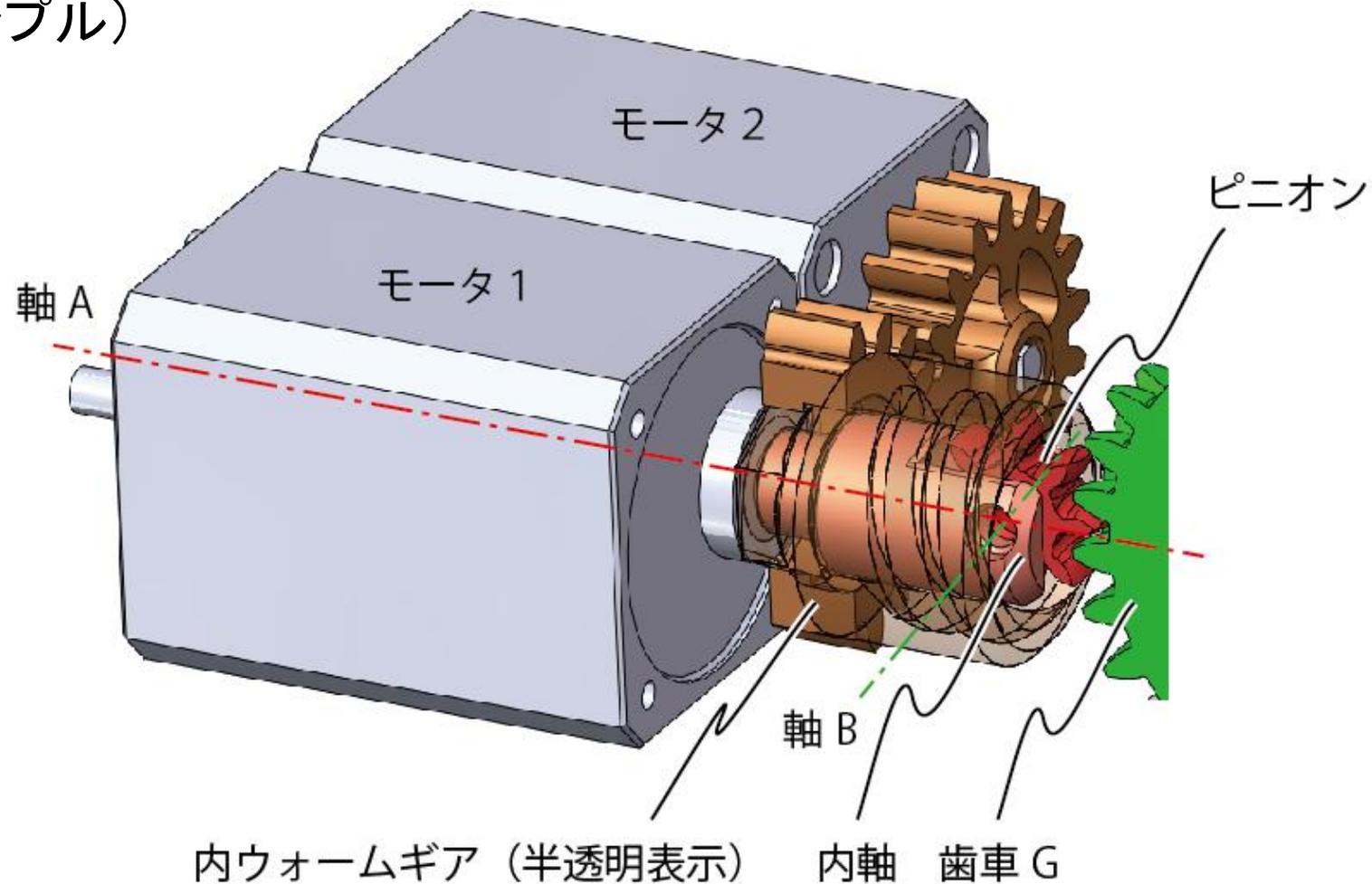


内ウォームギアを有する動力伝達機構の構成例 (1)

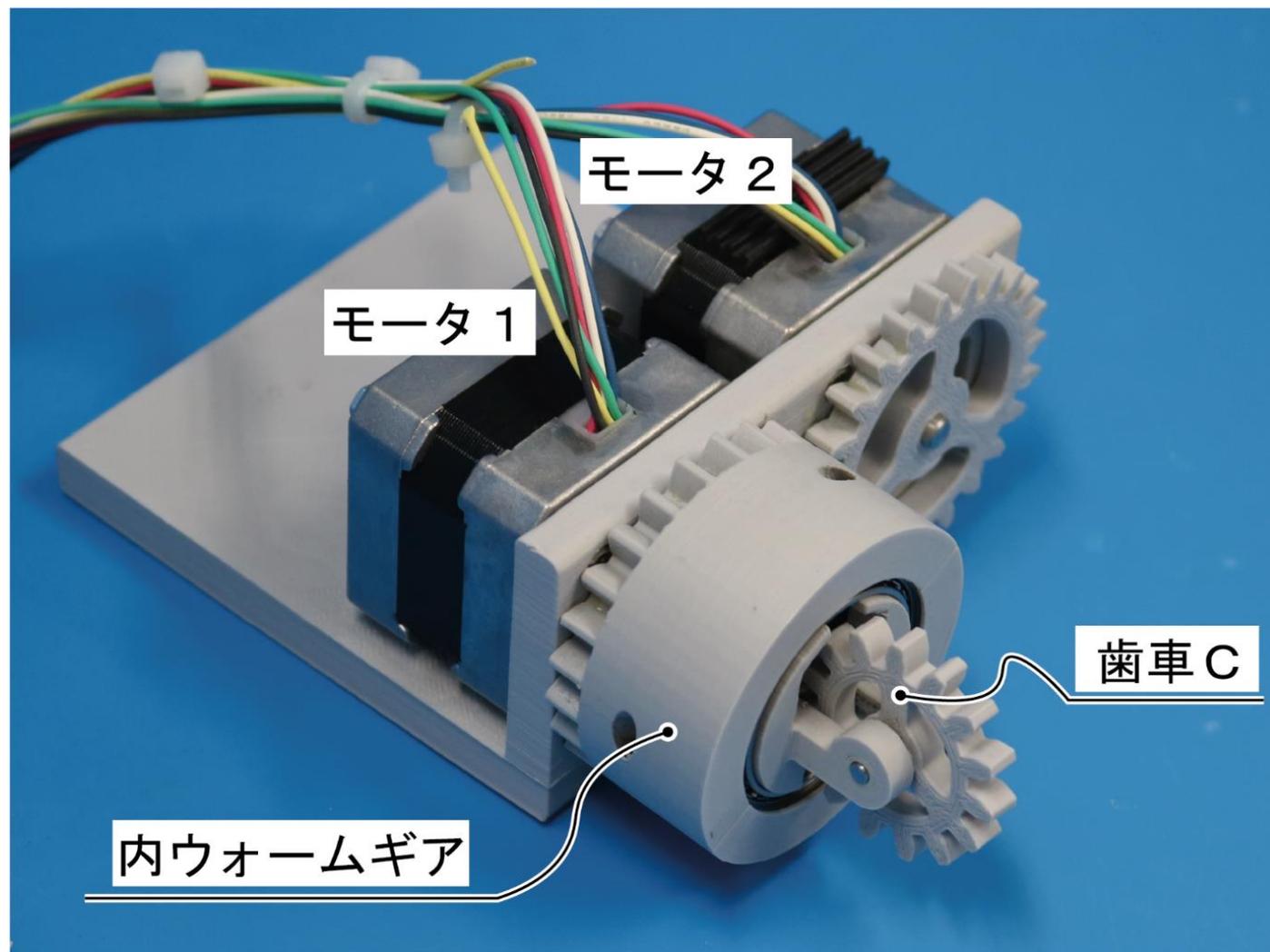


内ウォームギアを有する動力伝達機構の構成例 (2)

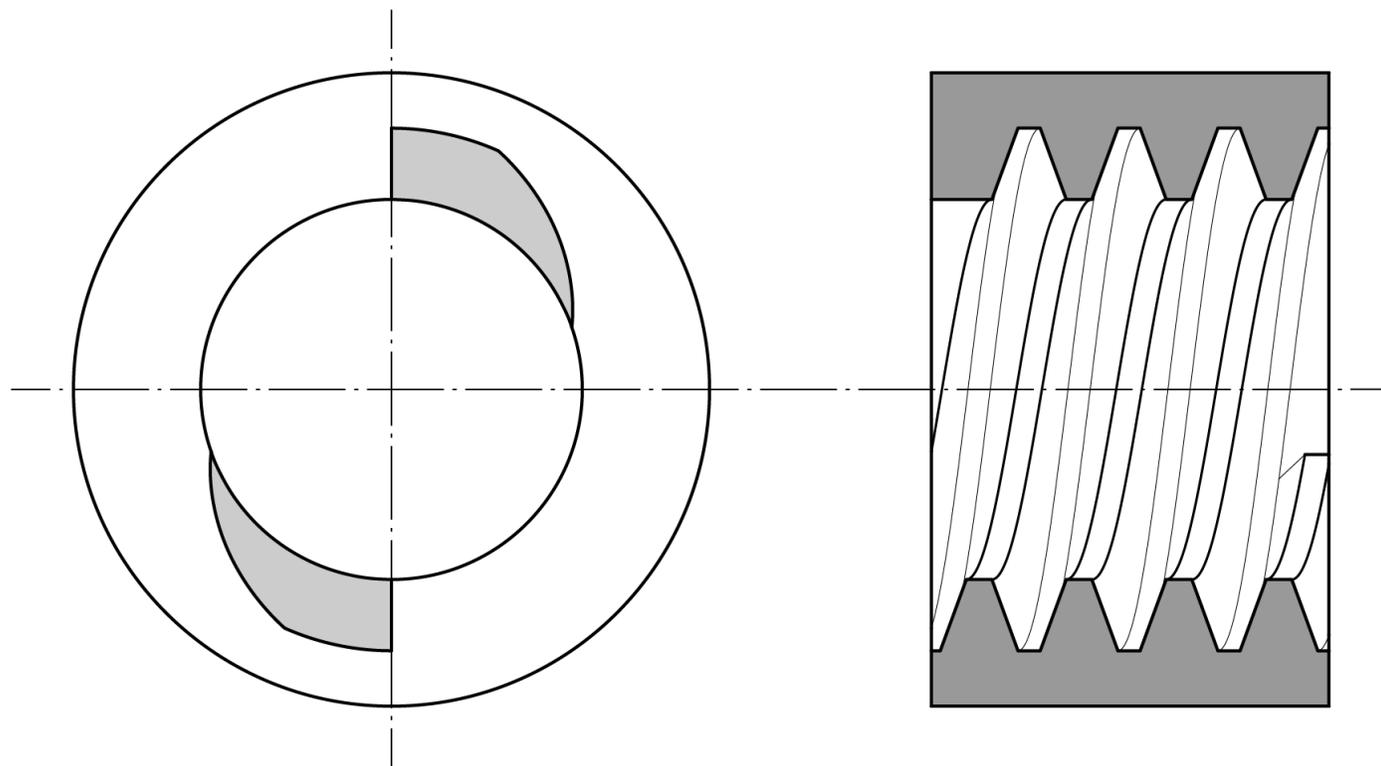
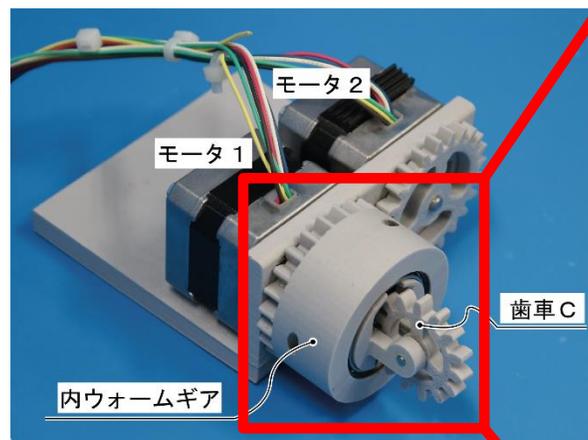
(構成例 (1) よりシンプル)



内ウォームギアを有する動力伝達機構

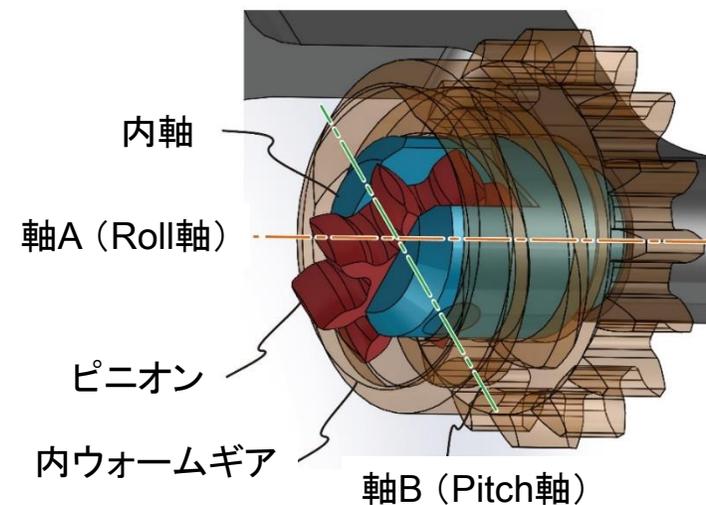


内ウォームギアの機構



内ウォームギアとピニオンの連動によるPitch軸とRoll軸の駆動の分離について

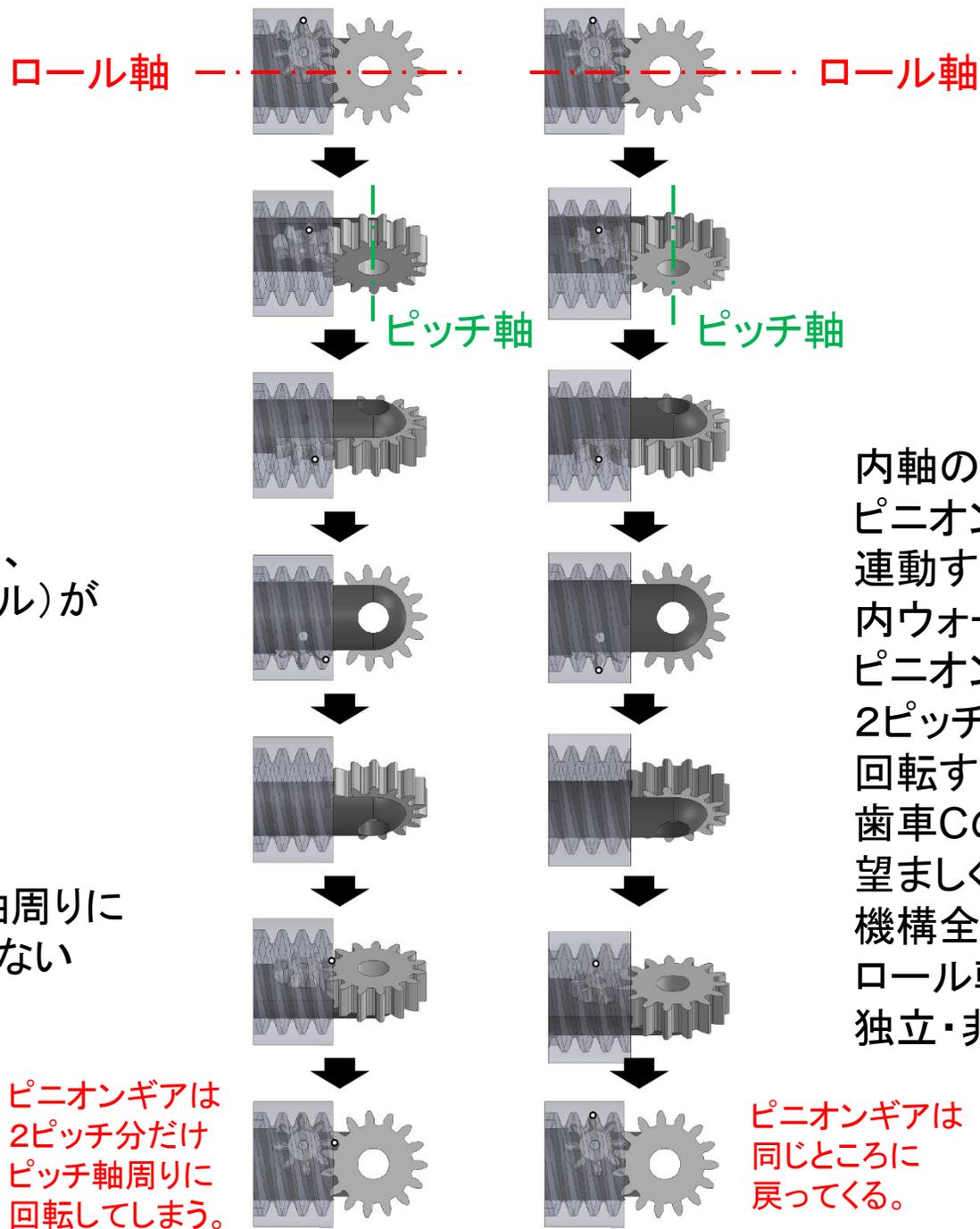
内軸がRoll軸周りに回転する場合、
ピニオンギアも内軸と一緒に回転するため、
そのままだと内ウォームギアと噛み合った
ピニオンギアが、Roll軸周りに一周回転
する度に、Pitch軸周りに1ピッチ分回転
してしまう。その分をキャンセルするように、
内ウォームギアを内軸に同期させて回転させることで、
ピニオンギアのPitch軸とRoll軸周りの回転を独立・非干渉の
ものとしている。



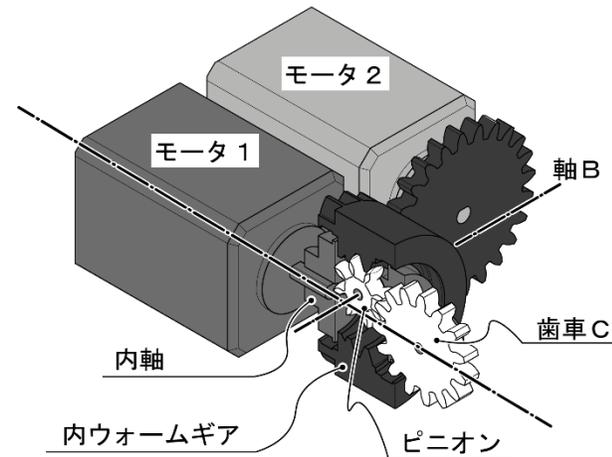
内ウォームギア機構の、 内軸のロール軸周りの 連動による、最終出力軸に おけるロール軸・ピッチ軸 周りの回転運動の 独立・非干渉化

内軸のロール軸周りの回転に、
ピニオンギア(ウォームホイール)が
連動してしまい、
内ウォームギアの螺旋構造を
たどることによって、ピニオンギアが
2ピッチ分だけピッチ軸周りに
回転してしまう。
これにより、歯車Cも、ピッチ軸周りに
回転してしまうという、望ましくない
連動が発生する。

ピニオンギアは
2ピッチ分だけ
ピッチ軸周りに
回転してしまう。

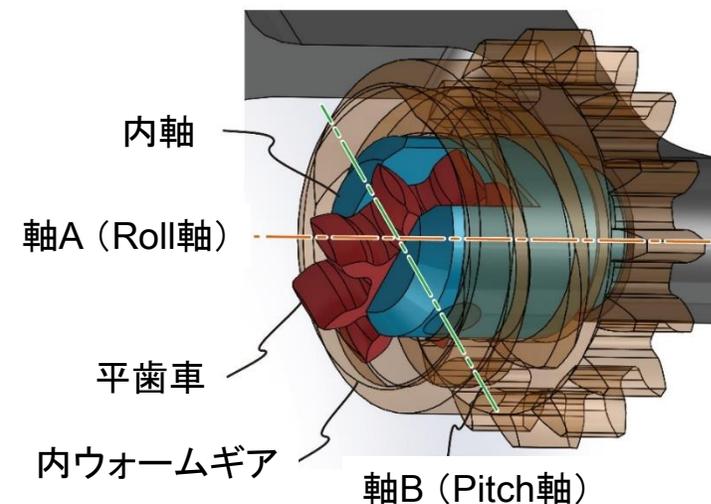
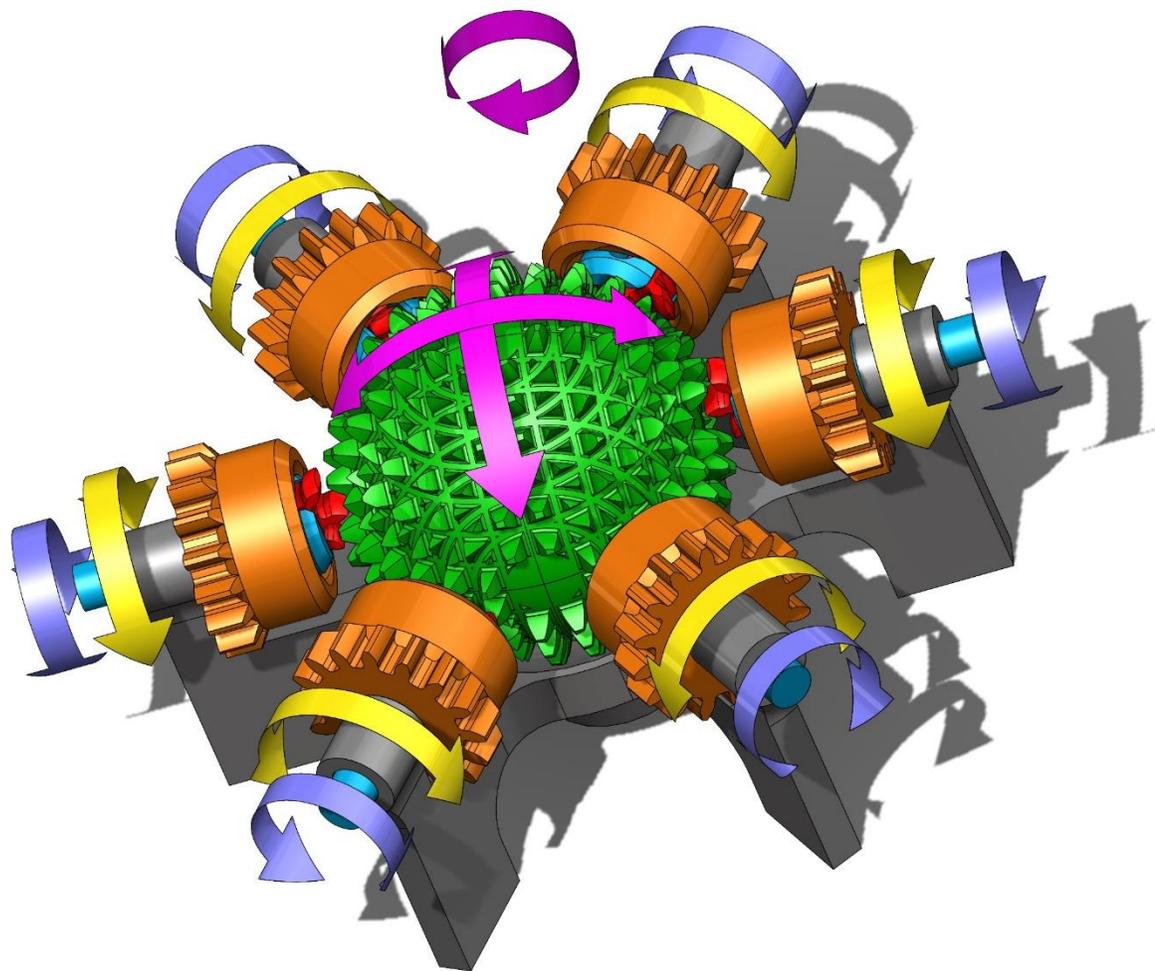


ピニオンギアは
同じところに
戻ってくる。



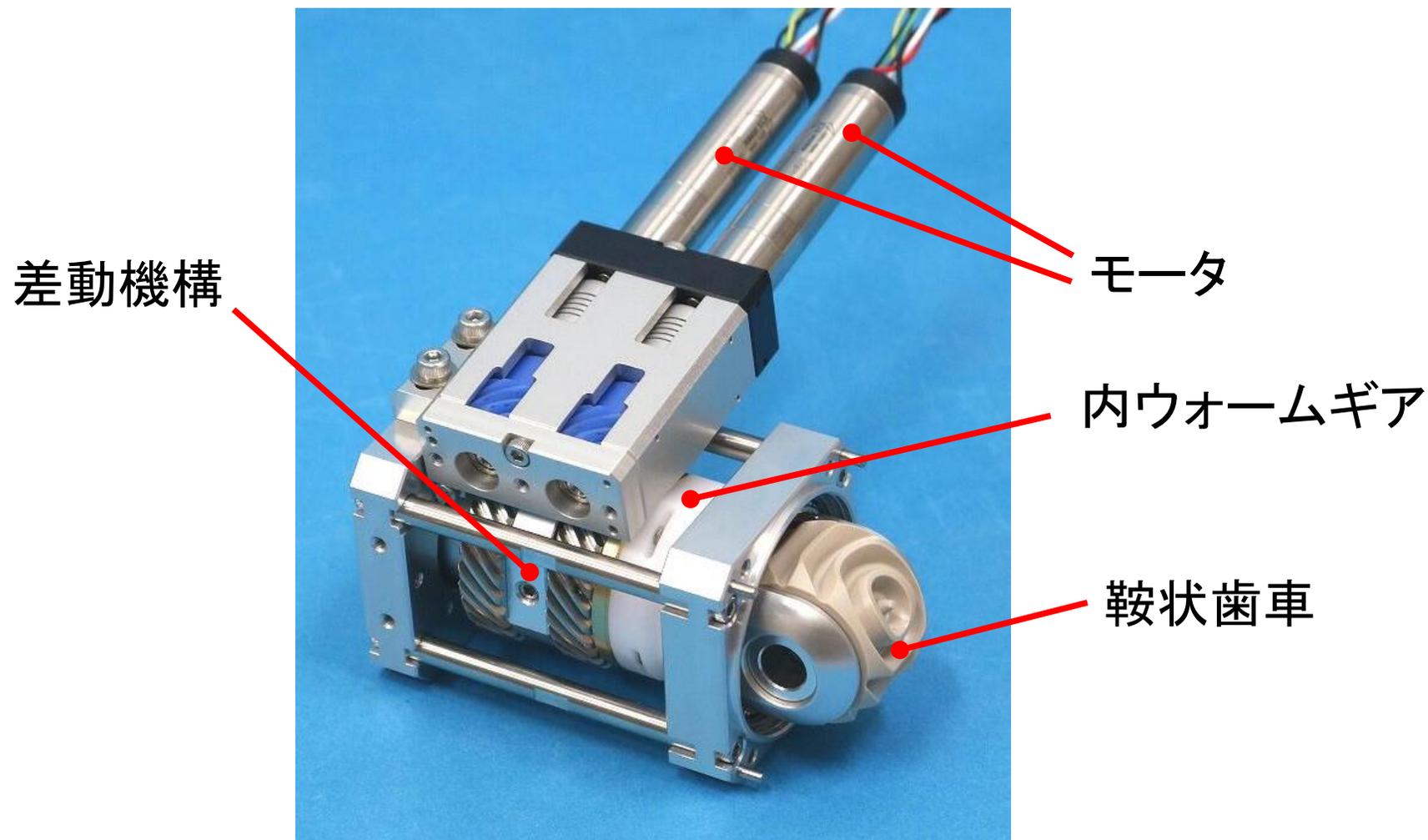
内軸のロール軸周りの回転に、
ピニオンギア(ウォームホイール)が
連動する場合においても、
内ウォームギアが連動し、
ピニオンギアの
2ピッチ分だけロール軸周りに
回転するため、
歯車Cのピッチ軸周りの
望ましくない回転をキャンセルし、
機構全体の出力軸の
ロール軸・ピッチ軸周りの回転を
独立・非干渉にしている。

3自由度を有する球状歯車

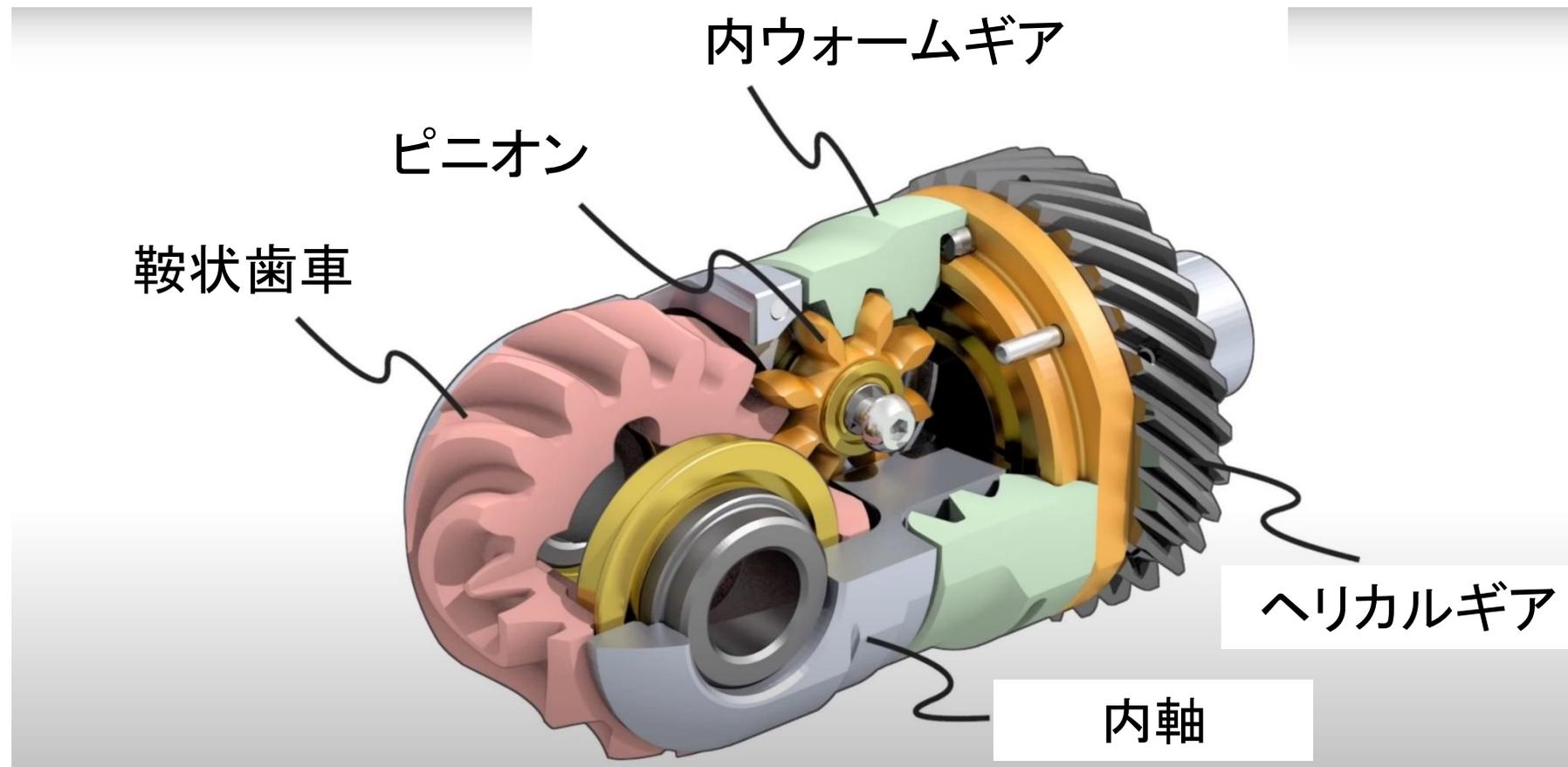


- ・ 設計当初は、差動機構を用いて駆動する「平歯車」6個を60° おきに放射状に配置して、12個のモータを用いて直交3自由度を駆動するという、冗長性の高い機構であった。

内ウォームギアによる差動機構を鞍状歯車の駆動に利用



内ウォームギアによる鞍状歯車用の差動機構の内部構造



内ウォームギアにより可能となった球状歯車の3自由度駆動



(×2)

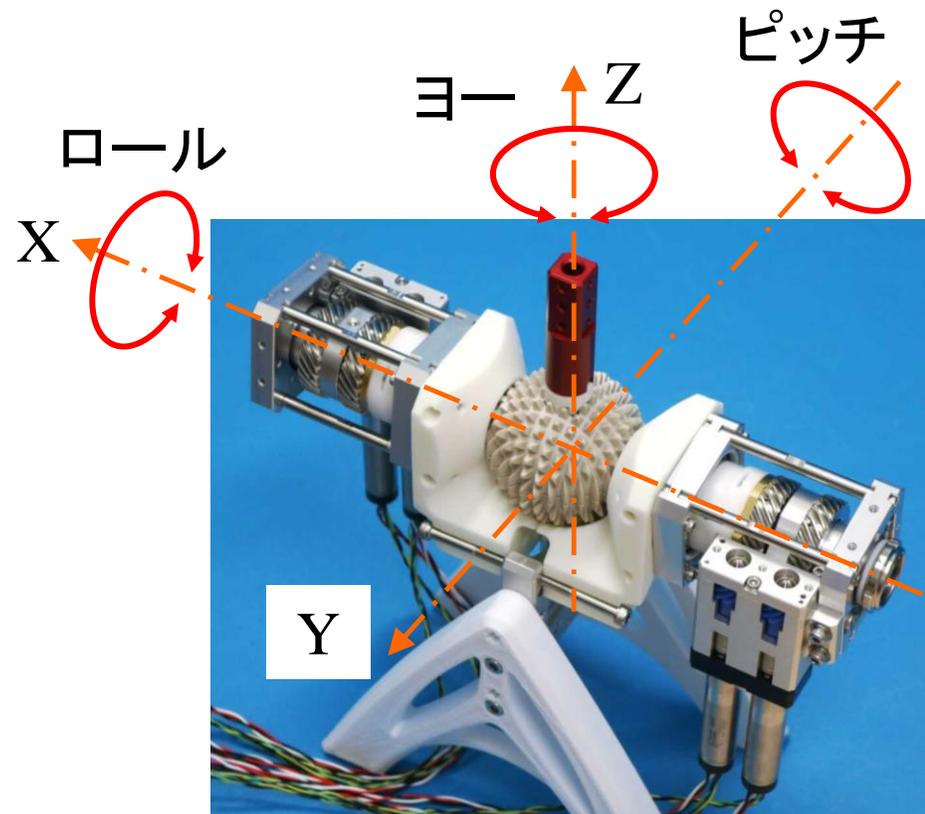
内ウォームギアを有する
駆動モジュール

+



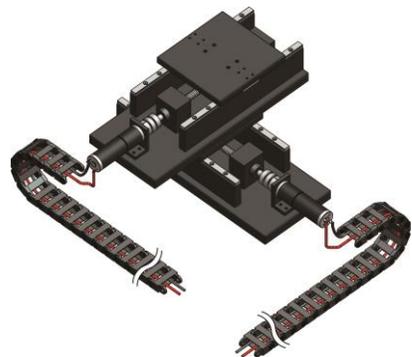
球状歯車

=



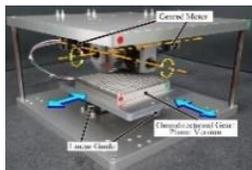
無制限の可動範囲を
有する3自由度の
球状歯車

研究開発の過程

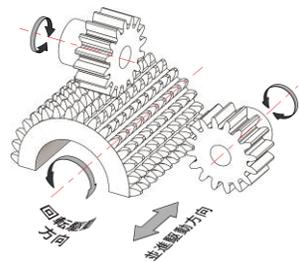
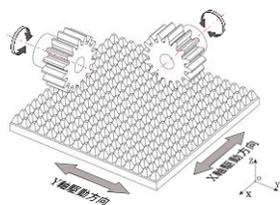
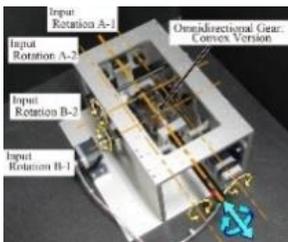


2段構造

1段構造

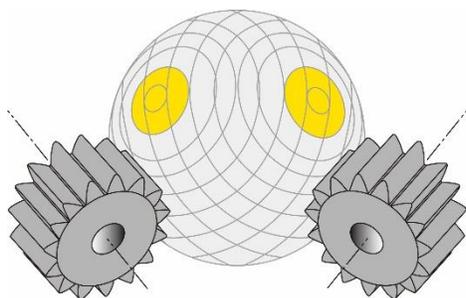


1方向に曲率を有する曲面への対応

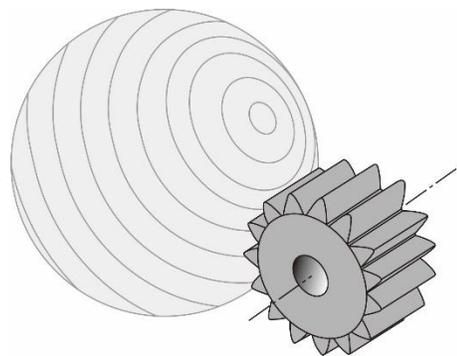


直交する2方向に曲率を有する球面への対応

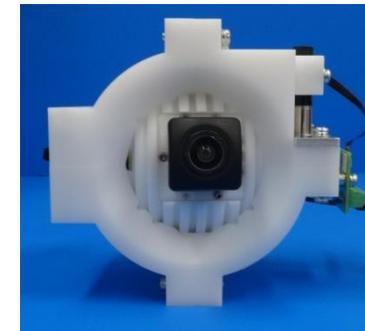
一旦保留



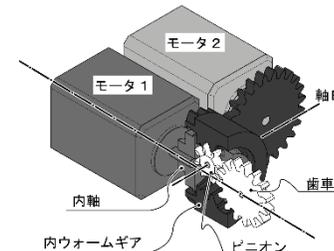
「極構造」に平歯車は噛み合えない。



直交する2方向に曲率を有する球面への対応

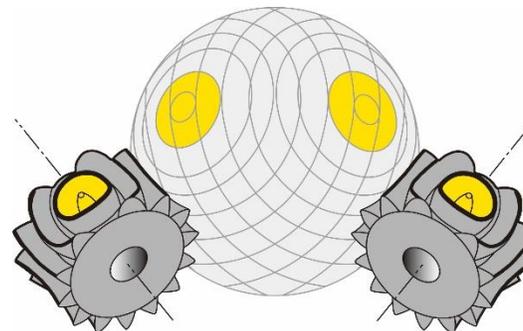


ウォームギアによる差動機構を開発



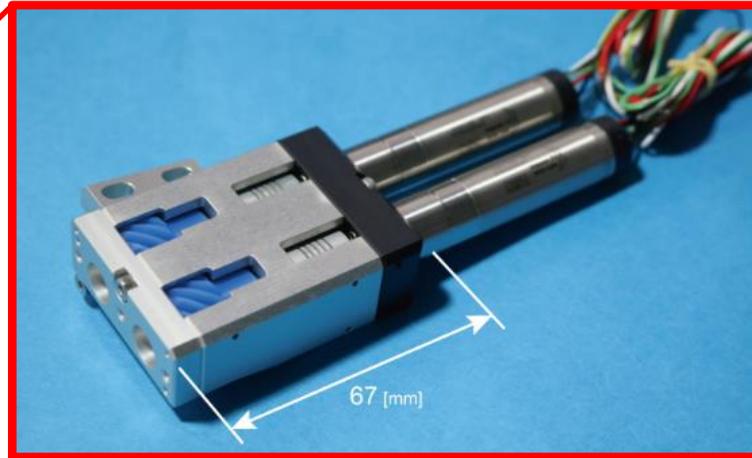
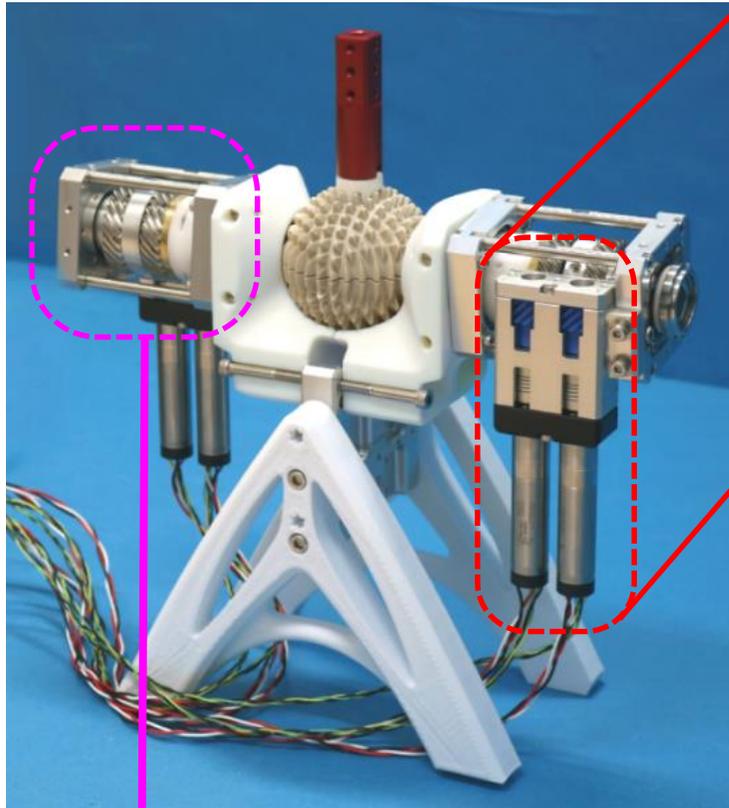
2段構造への回帰

同様の差動機構を2個用いて、1つの球面上に直交した2方向のインボリュート歯形を有する球状歯車を駆動。

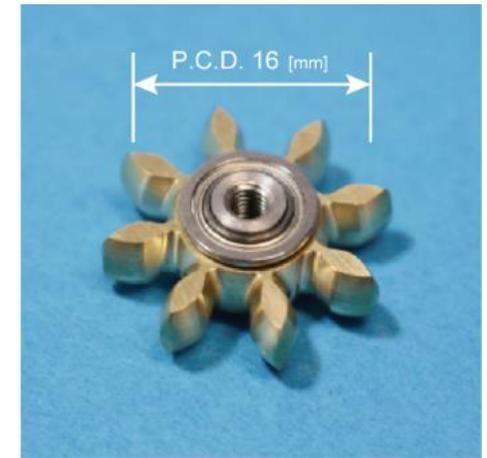


一旦は保留にした問題を解決し、直交する2方向に曲率を有する球状歯車を直交する3自由度周りに駆動できた。

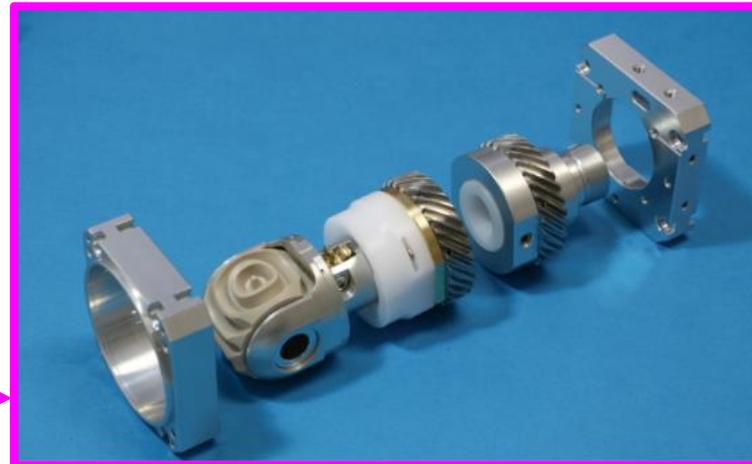
差動機構の構成部品



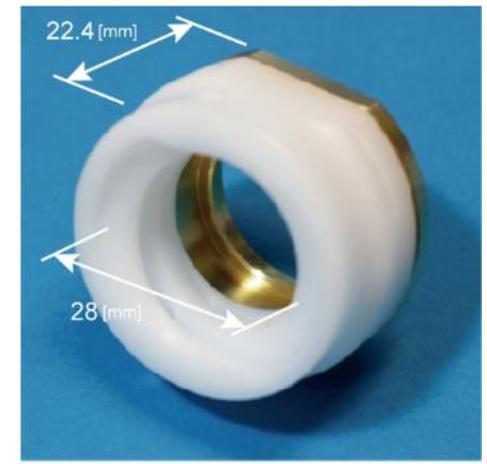
(a) モータユニット



(b) 差動ピニオン

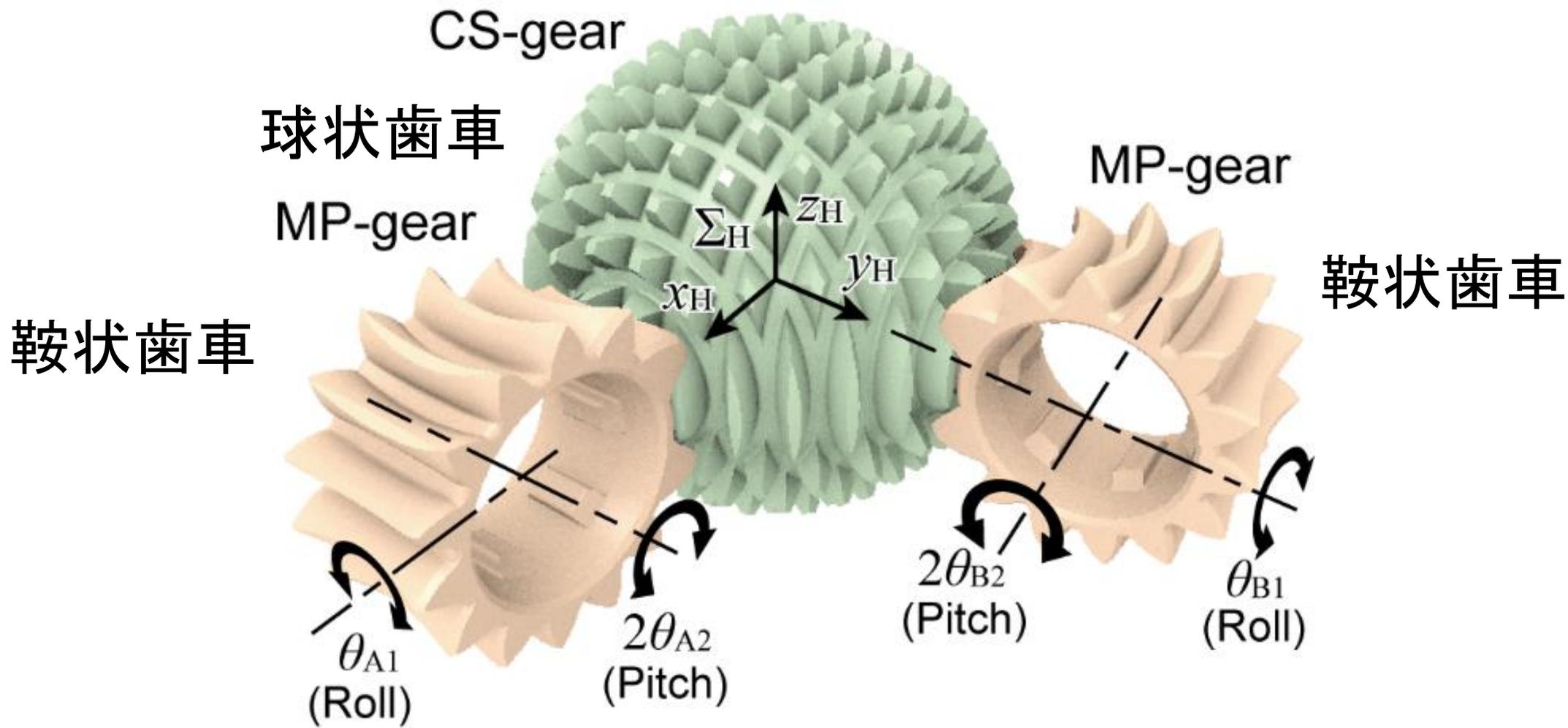


(c) 駆動モジュール内部



(d) 内ウォームギア
(POM製)

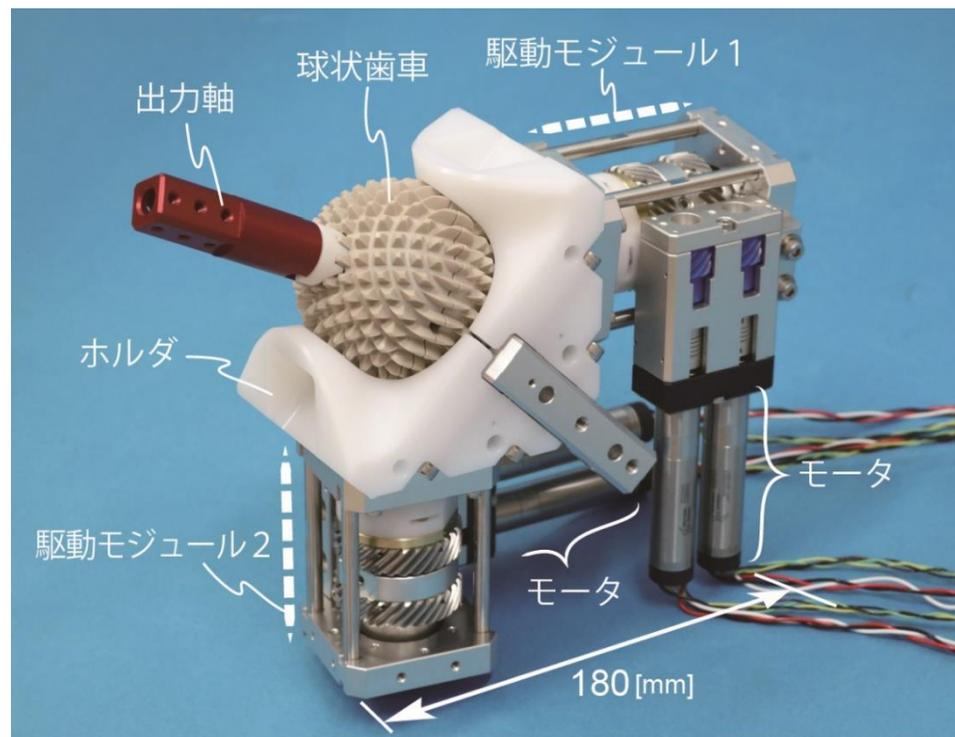
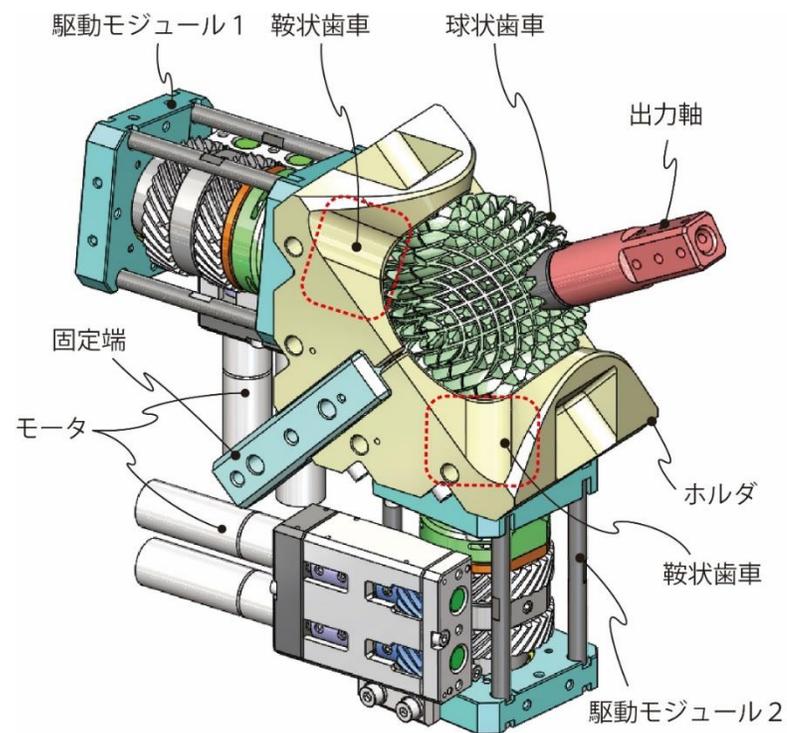
2個の鞍状歯車と差動入力機構で 球状歯車の3自由度を実現した



3自由度球状齒車



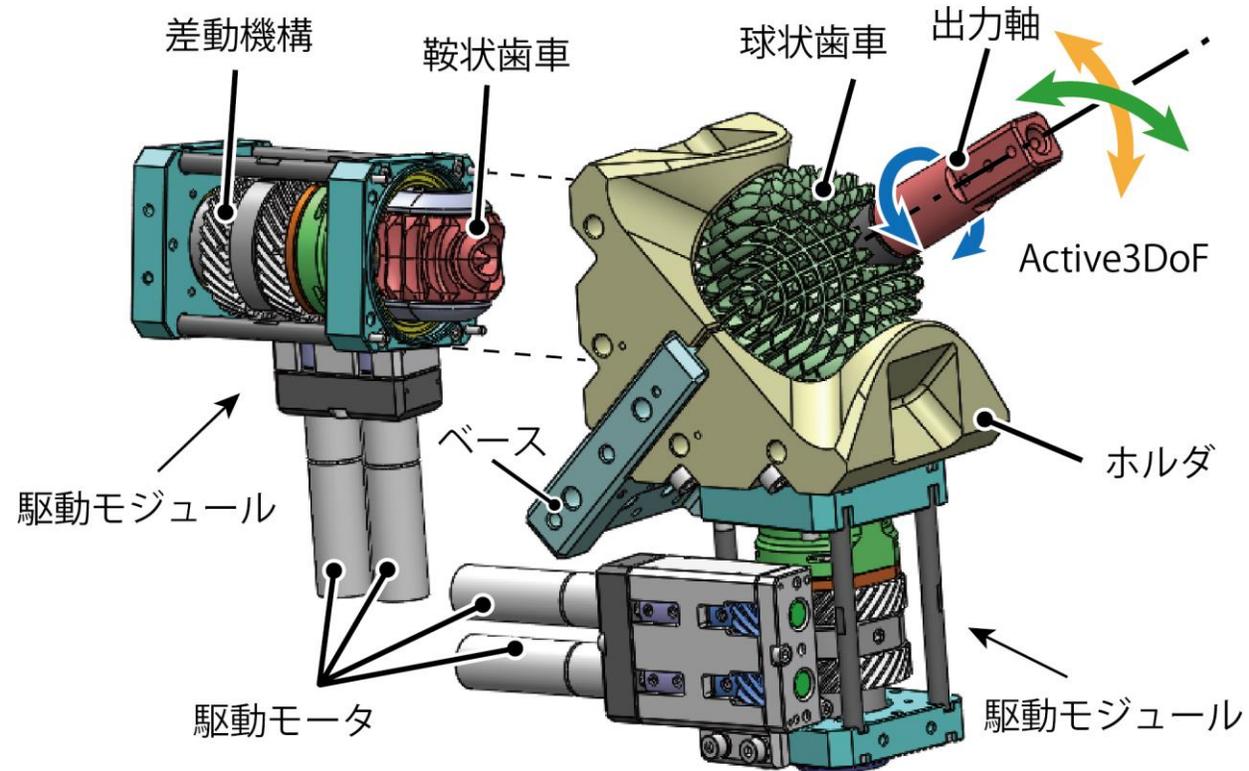
3自由度球状歯車



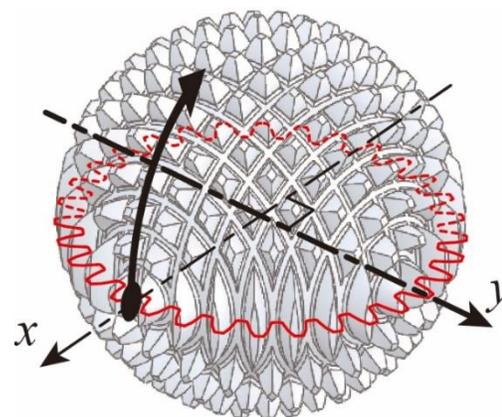
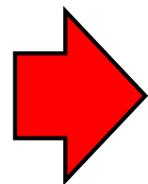
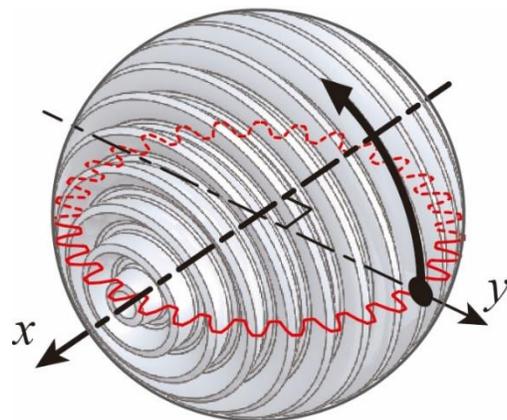
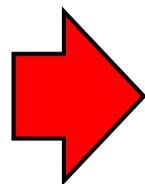
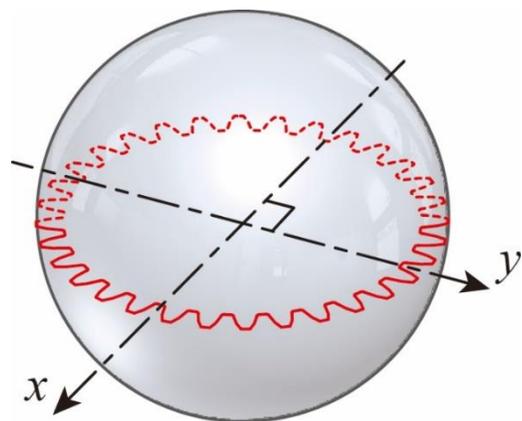
合計4個のモータで、一点で直交する
回転3自由度を実現している。

3自由度球状歯車

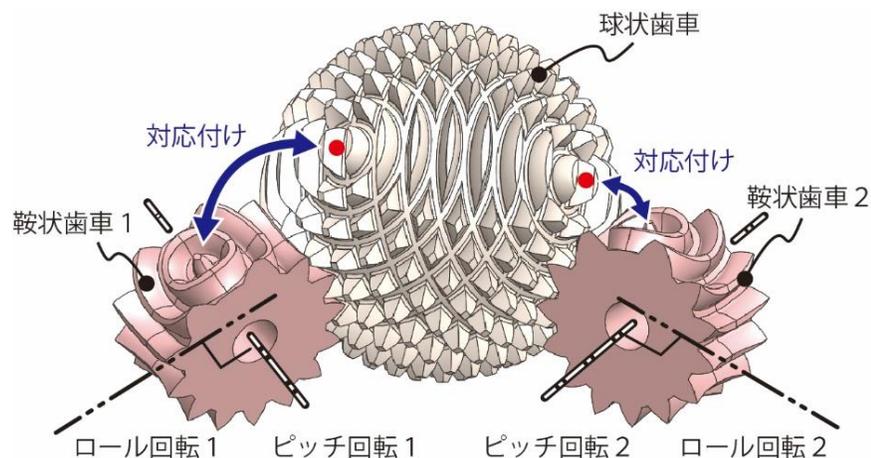
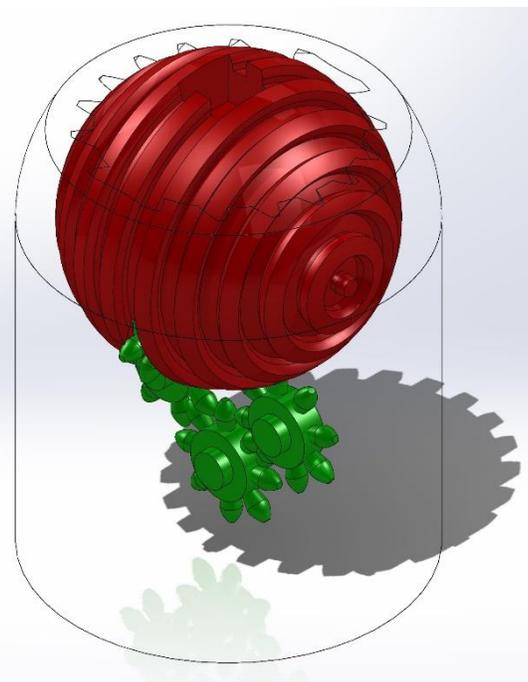
- ・回転3自由度駆動
- ・回転2自由度(鞍状歯車)の駆動モジュール2つ



球状歯車の構造の原理

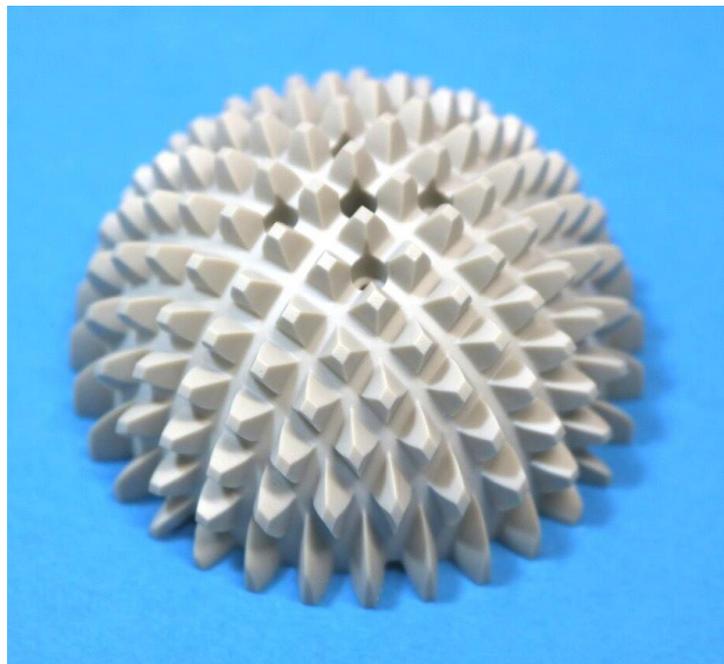


球状歯車の中の
xy平面上にz軸周りに
インボリュート曲線
を描く。

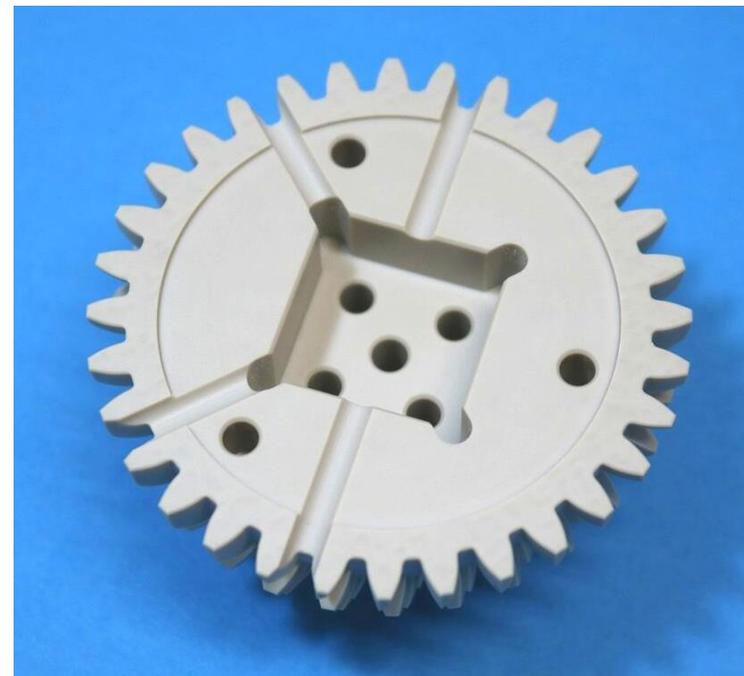


球状歯車の内部構造

※ PEEK (ポリエーテルエーテルケトン)により製作



球状歯車の半球構造



球状歯車の半球構造の裏面

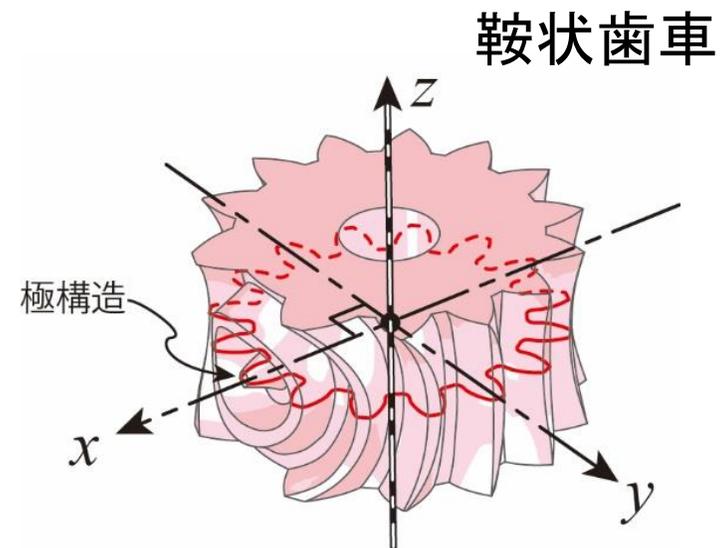
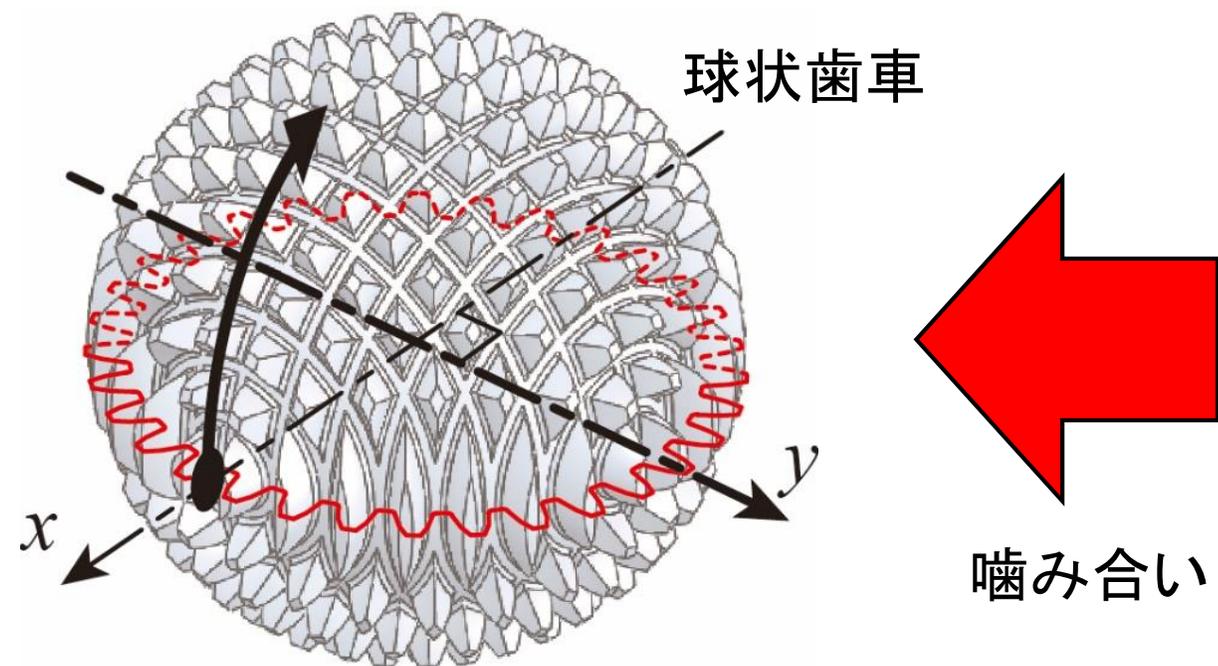
球状歯車は、半球構造を有する部品2個を、お互いに
ネジ留めすることで構成している。

出力軸を取り付けた球状歯車



半球構造の部品2個を組み合わせた上で、
出力軸を取り付けた球状歯車

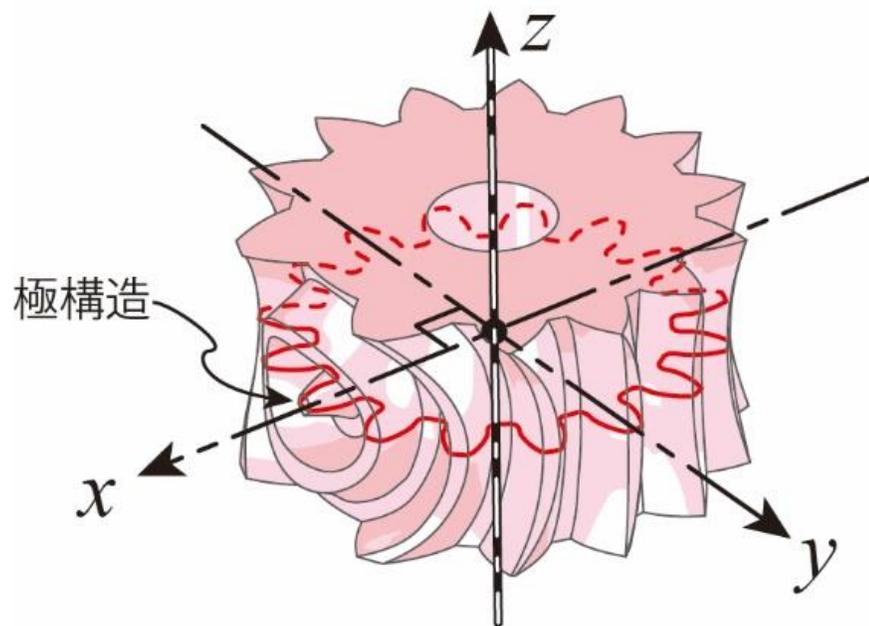
球状歯車と鞍状歯車を噛み合わせる



球状歯車と噛み合う入力用の鞍状歯車は、特殊な極構造を有し、差動機構を介して球状歯車に動力を伝達する。

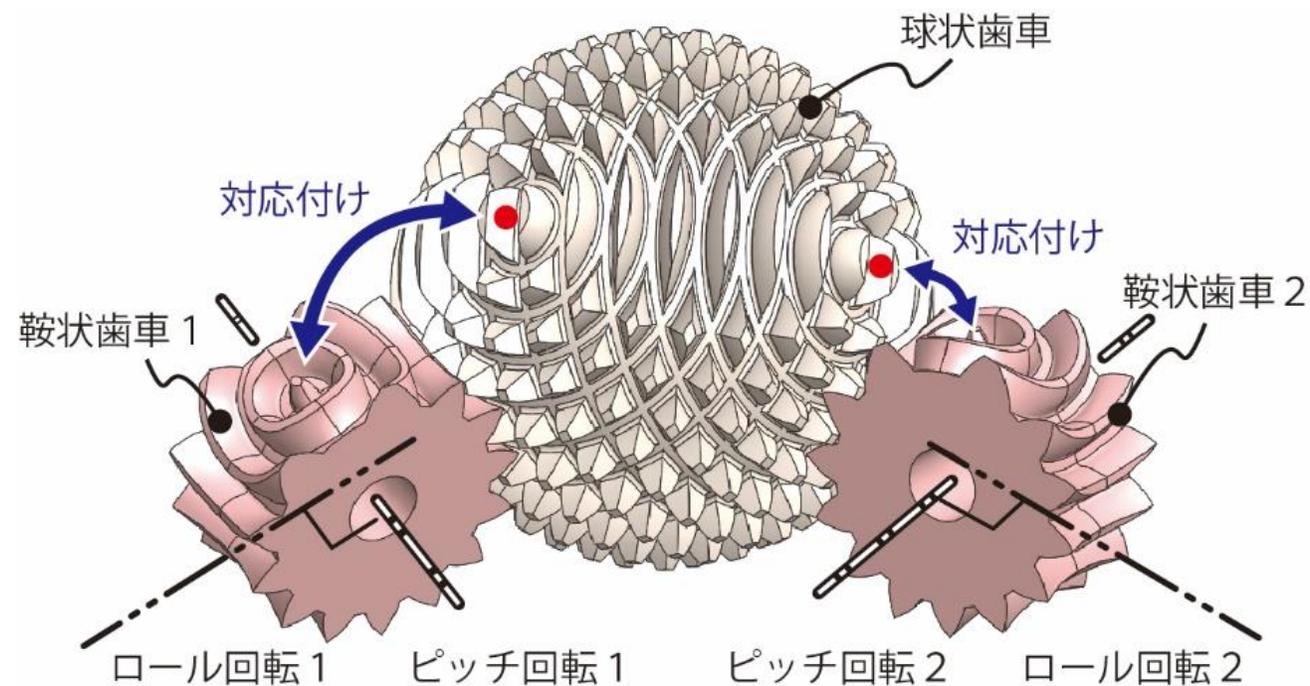
鞍状歯車の構造

※ PEEK (ポリエーテルエーテルケトン)により製作



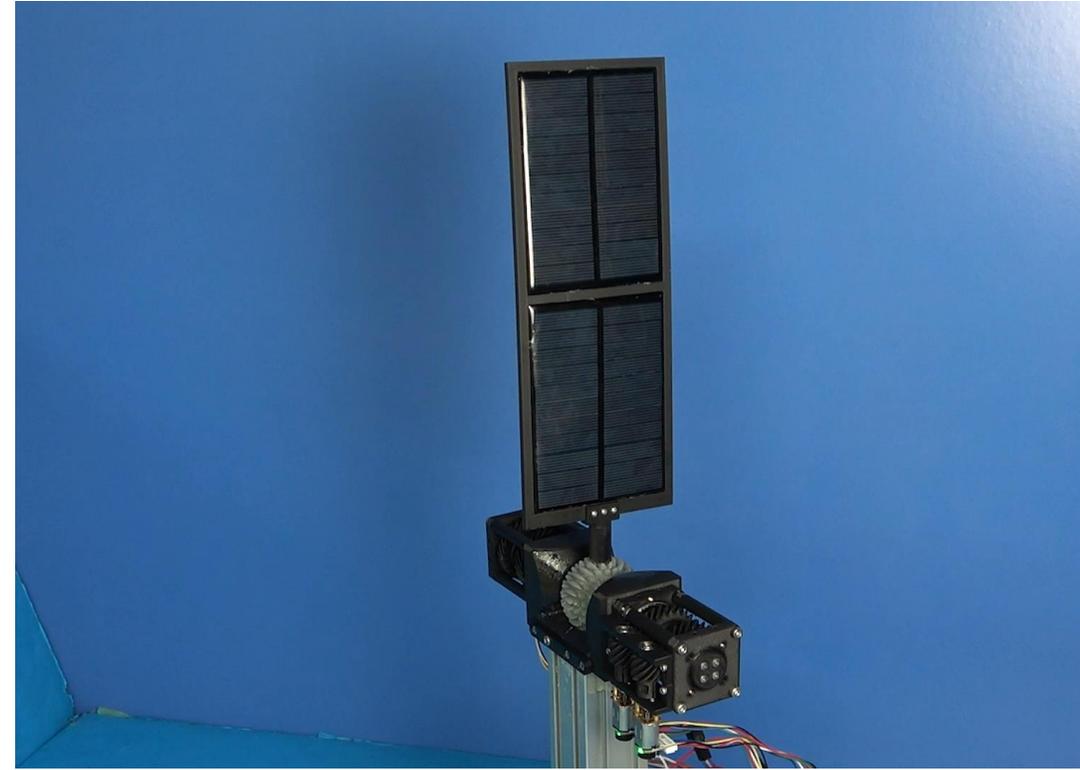
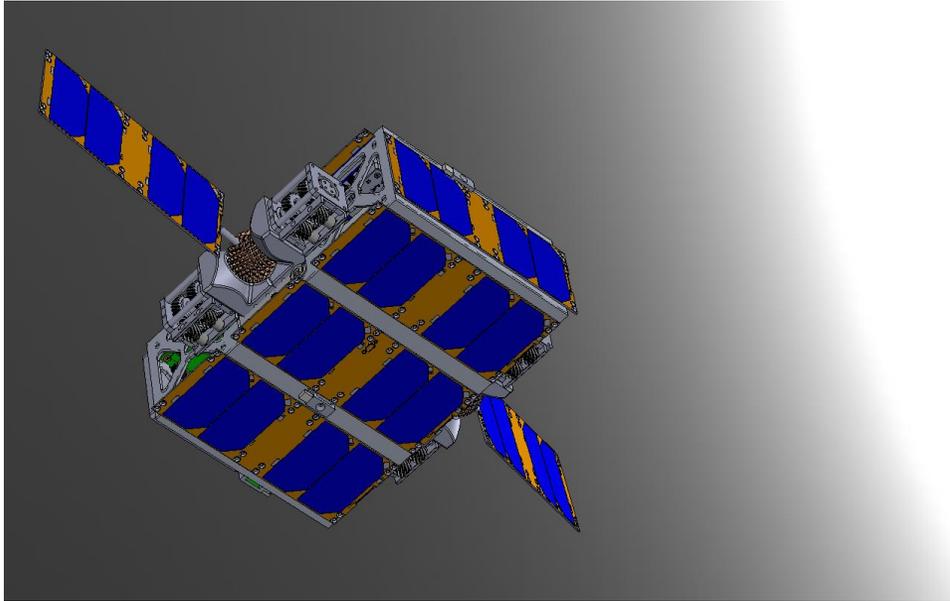
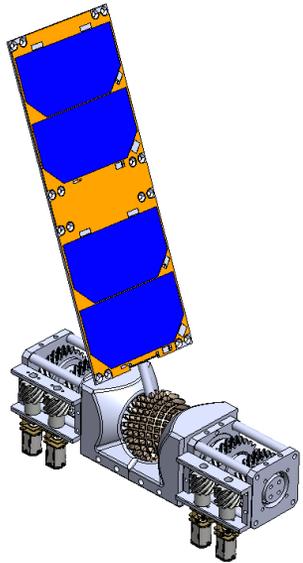
鞍状歯車は、差動機構を介して球状歯車と噛み合う。
また、鞍状歯車と球状歯車との噛み合う歯面には、
対応関係がある。

球状歯車と鞍状歯車の組合せ



入力用の鞍状歯車は、差動機構を介して球状歯車に直交する2軸周りの動力を伝達する。このため、球状歯車は3自由度を有する。動力を伝えない方向には、鞍状歯車は球状歯車の歯と歯の間を滑らかにスライドする。

今後の展開



球状歯車をドローンのカメラおよび人工衛星の太陽電池パネルの「首振り機構」やロボットアームの「関節」に応用してゆく。

参考文献

1. 「差動機構」, 特許第7025801号, 国立大学法人山形大学, 多田隈理一郎, 阿部一樹
2. 「関節装置及び歯車セット」, 特許第7072272号, 国立大学法人山形大学, 多田隈理一郎, 阿部一樹
3. Kazuki Abe, Kenjiro Tadakuma, Riichiro Tadakuma: “ABENICS: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings” , IEEE Transactions on Robotics , Vol.37, Issue:5, 1806-1825, 2021.