

高効率・高減速ギヤを備えた 高出力アクチュエータの研究開発

平成29年1月24日

於モーションコントロール委員会

横浜国立大学

藤本康孝、小布施大志

研究目的・概要：従来のロボット用アクチュエータの課題

従来のロボット用アクチュエータ：

- サイクロイドギヤ(中～大容量)、または、
ハーモニックギヤ(小～中容量)、または、
遊星ギヤ(小～中容量)
+ サーボモータの組み合わせ

課題①：出力密度

- モータの体格は最高回転数に逆比例
- ギヤの入力回転数が低いため、高回転型モータと組合せられない(モータとギヤのミスマッチ)

課題②：エネルギー回生

- 回生動作時には、減速機でエネルギーが消失してしまうため、電源にエネルギーを回生できない

課題③：バックドライバビリティ

- ロボットのタスクに必要なトルクを実現するために1/100程度の減速機を用いると、バックドライバビリティ(逆駆動性)が低下
- 低バックドライブなアクチュエータは、人との接触を想定した協働ロボットやパワーアシストロボットで安全性が問題

本プロジェクト：これら課題を解決するアクチュエータの開発

研究目的・概要：減速機の比較

減速機	減速比	トルク容量	伝達効率	入力回転数	特徴
単純遊星歯車機構(1段)	1/4~1/10程度	小	高	高	減速比が低い
ラビニヨ遊星歯車機構(1段)	1/10程度				減速比が低い
複合遊星歯車機構	1/100程度				設計が難しい
不思議遊星歯車機構	1/100程度				転位歯車使用 損失大
ハーモニック歯車機構	1/30~1/200				ノンバックラッシ 高コスト
サイクロイド歯車機構	1/60~1/200	大	低	低	高コスト

研究目的・概要：減速機のバックドライバビリティ

モータ軸から力を加えたとき
出力軸に伝わる力(順駆動)

$$F_{2t} = F_{1t} - \mu' F_n \quad \text{摩擦}$$

→
$$F_2 = \frac{1 - \mu' \tan \phi}{\mu' + \tan \phi} F_1$$

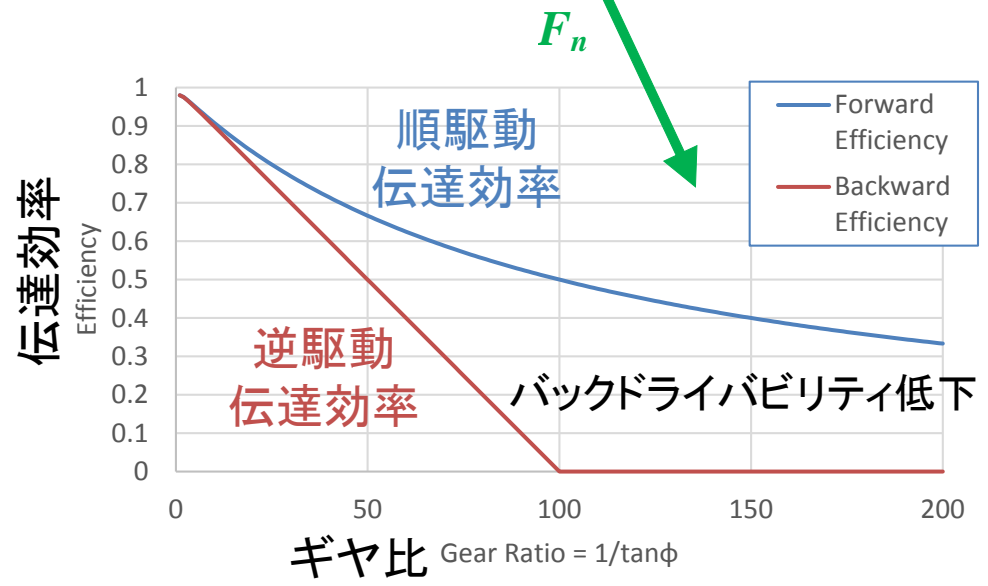
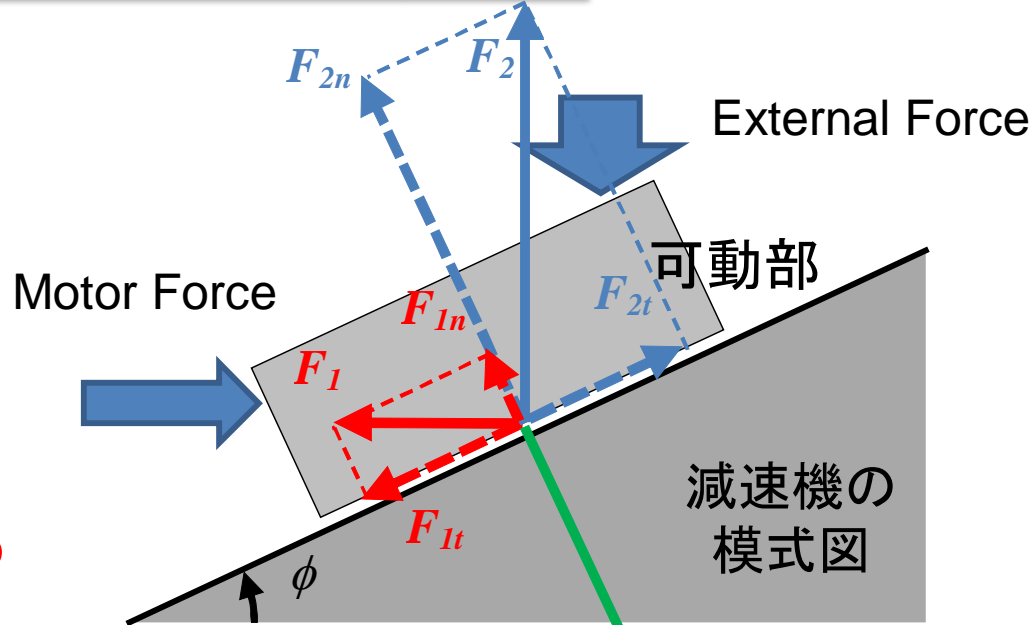
$\mu' \ll 1, \tan \phi \ll 1$ なので力が伝わる

出力軸から力を加えたとき
モータ軸に伝わる力(逆駆動)

$$F_{1t} = F_{2t} - \mu' F_n$$

→
$$F_1 = \frac{\tan \phi - \mu'}{1 + \mu' \tan \phi} F_2$$

$\mu' > \tan \phi$ の場合、力が伝わらない

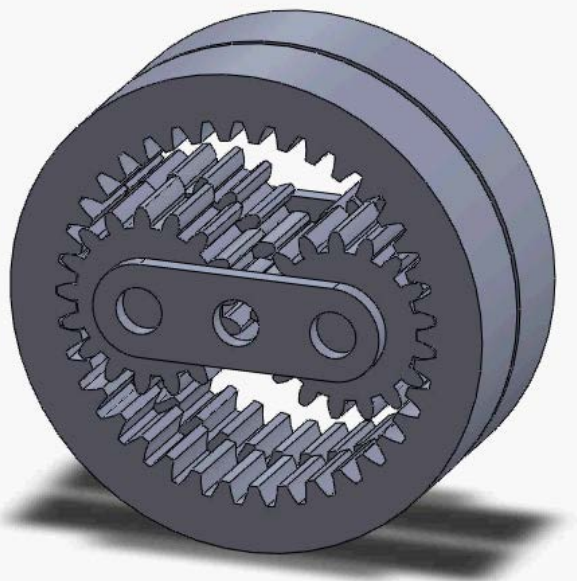


$\mu'=0.01$ の場合の伝達効率

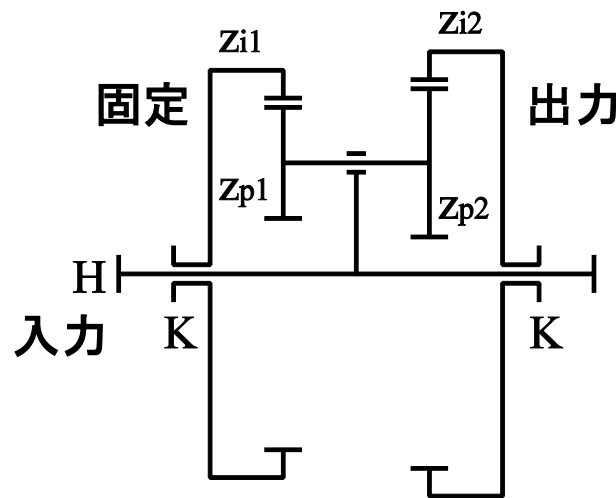
研究目的・概要: ブ레이크スルー技術(提案減速機)

複合遊星歯車機構

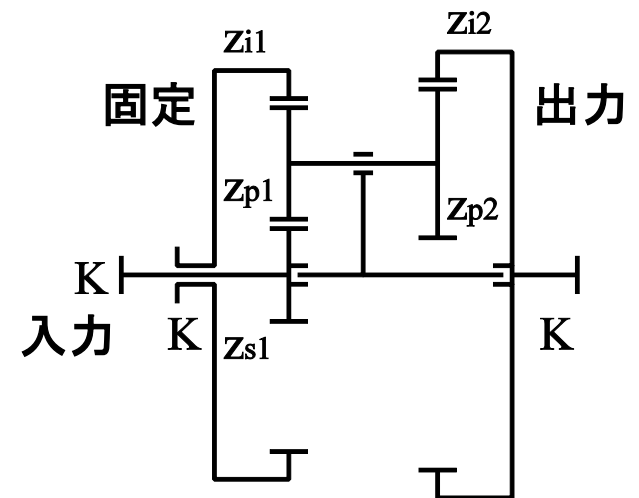
- 動力伝達効率を考慮し、複合遊星歯車機構の歯数を選定
- ほぼ任意の減速比を実現可能(1/10~1/1000)
- 複合遊星歯車機構の動力伝達効率を最大化する設計手法を提案
- 2K-Hギヤおよび3Kギヤに適用



2K-Hギヤ



2K-Hギヤ



3Kギヤ

研究目的・概要：ブレイクスルー技術（減速機設計法）

動力伝達効率の最大化：

- 目的関数：減速機順駆動効率※

$$\eta(z_{p1}, z_{i1}, z_{p2}, z_{i2}, x_{i1}, x_{i2}, X_{rc})$$

- 状態変数：第1遊星歯車の歯数 $z_{p1} \in Z$
第1内歯車の歯数 $z_{i1} \in Z$, その転位係数 $x_{i1} \in R$
第2遊星歯車の歯数 $z_{p2} \in Z$
第2内歯車の歯数 $z_{i2} \in Z$, その転位係数 $x_{i2} \in R$
軸間距離 $X_{rc} \in R$

- 制約条件： $g_L \leq g \leq g_H$ 減速比 g

$$-2 \leq x_{i1} \leq 2$$

$$-2 \leq x_{i2} \leq 2$$

正面かみあい率条件、かみ合い圧力角条件、歯先円条件、
正面歯先円歯厚条件、トロコイド干渉条件、歯先干渉条件、
同軸条件、組立条件、隣接条件

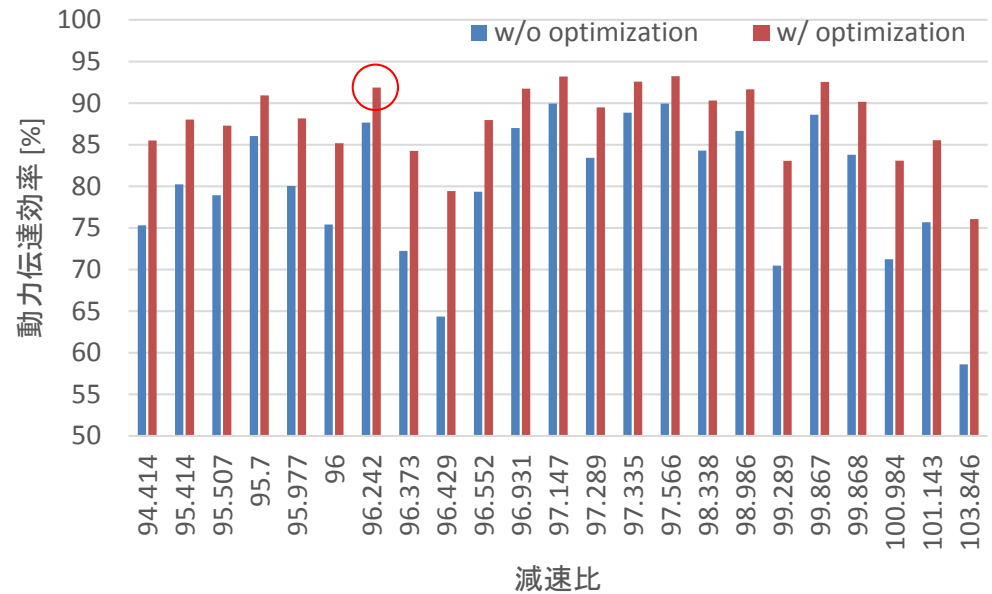
※順駆動効率が最大化されれば、
逆駆動効率も最大化される

研究の内容と成果:【高効率減速機】

減速比1/96、最大トルク120N.m
効率92%、非常に高効率！
小さな力で出力側から駆動可能



バックドライブの様子
(<https://youtu.be/LRE9R0kUDfI>)



最適化により向上した効率

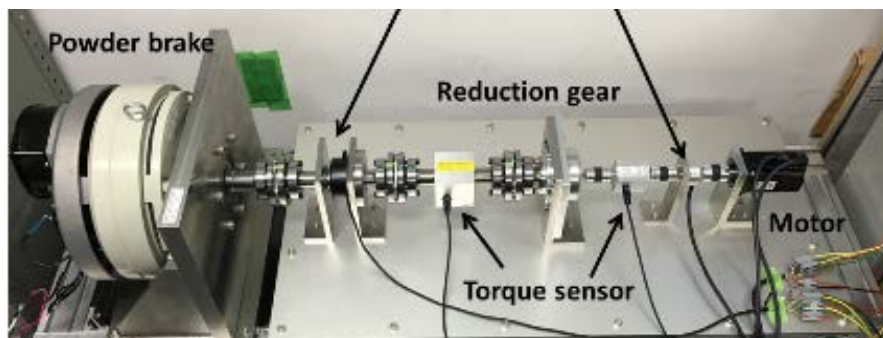


減速機の内部

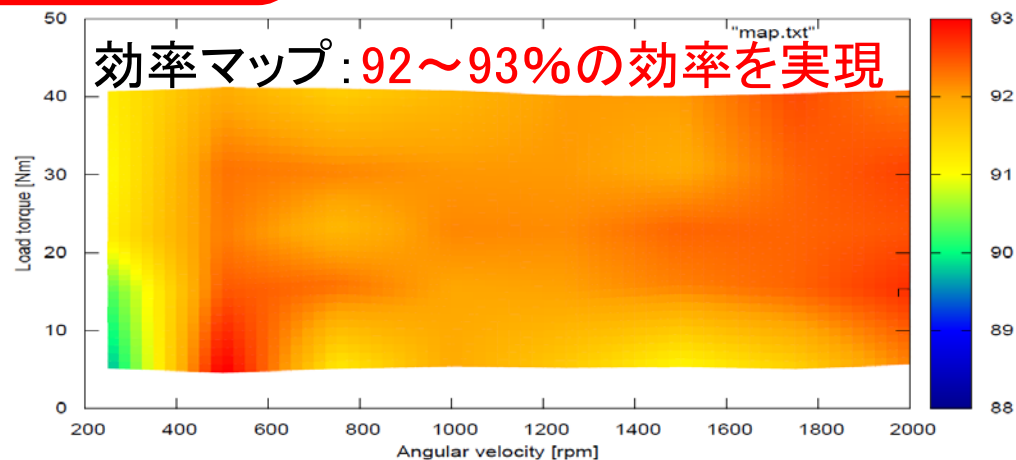
研究の内容と成果：【高効率減速機】

赤字：優位な性能

	先導研究 達成目標	先導研究で開 発した減速機	達成度	ハーモニックギヤ (CSG25軽量ユニット型)
順駆動効率	90 %	93 %	100 %	70 %
逆駆動効率	—	92 %	—	60 %
減速比	—	1/97.1	—	1/100
実現可能な減速比	1/50～1/400	1/49～1/379	100 %	1/30～1/160
許容入力回転速度	15,000 rpm	16,500 rpm	110 %	約7,000 rpm
定格トルク	—	90 N.m	—	87 N.m
逆駆動起動トルク	—	0.034 N.m	—	11 N.m
バックラッシ	—	23 arcmin	—	0.15 arcmin
サイズ	—	φ94 × 62 mm	—	φ86 × 46 mm
質量	—	1.1 kg	—	1.1 kg

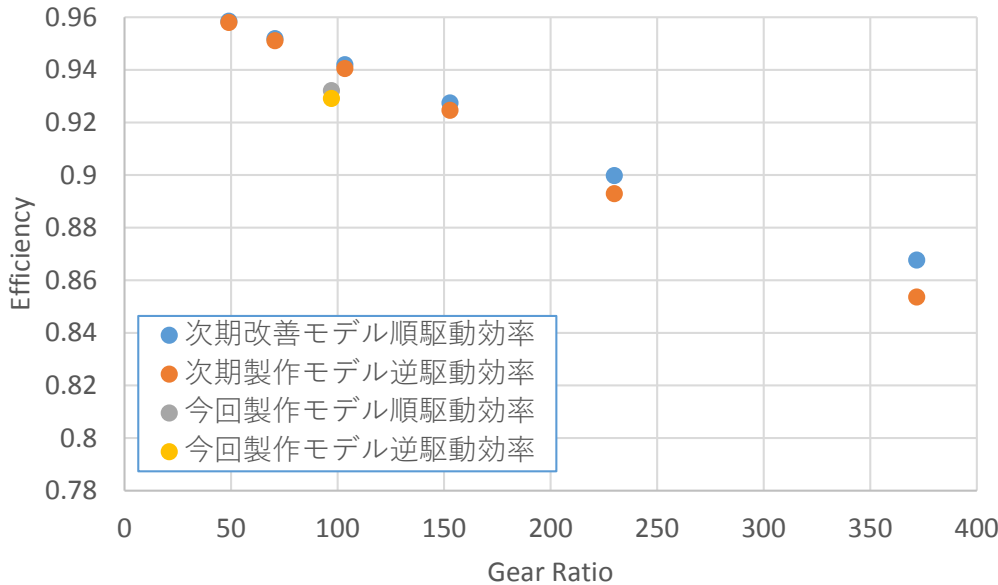


試験装置

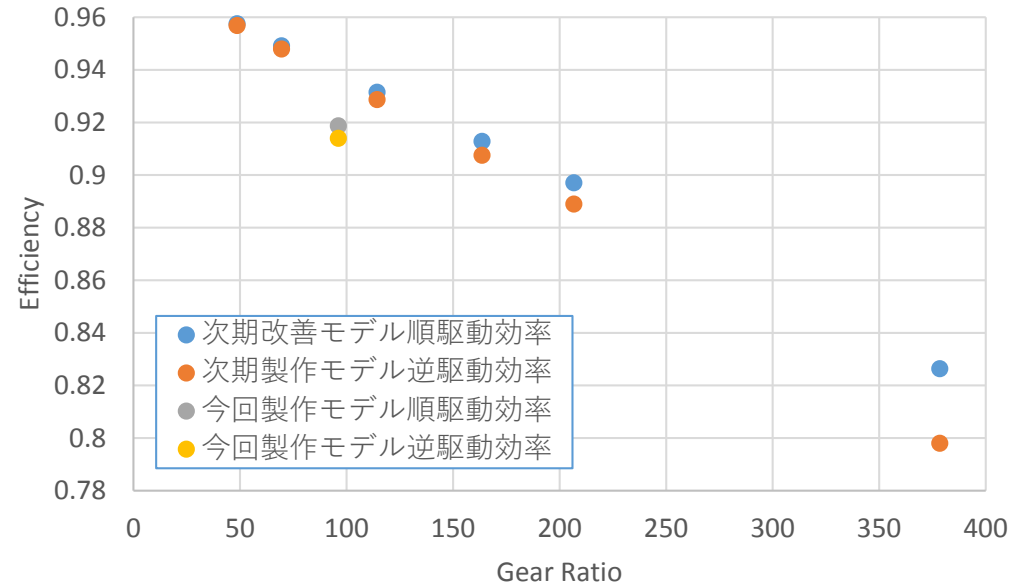


研究の内容と成果:【高効率減速機】

- 効率・トルク容量を改善したモデル



効率改善モデル(遊星数2; 90N.m)



トルク容量改善モデル(遊星数3; 120N.m)

- 1/370のモデルでも逆駆動可能
- ただし、出力軸からみた慣性モーメントが大きい
⇒ キャリアの軽量化が課題

研究の内容と成果：【高効率減速機】

	開発減速機	ハーモニックギヤ(CSG17軽量ユニット型)
順駆動効率	89.9%	65~80%
逆駆動効率	89.2%	40~75%
減速比	1/102.1	1/100
許容入力回転速度	15,000 rpm	7,300 rpm
定格トルク@2000rpm	40 N.m	31 N.m
平均負荷トルクの許容最大値	40 N.m	51 N.m
瞬間許容最大トルク	40 N.m	143 N.m
逆駆動起動トルク	未計測	11 N.m
バックラッシ	未計測	0.17 arcmin
角度伝達誤差		1.5 arcmin
ヒステリシスロス		1.0 arcmin
サイズ(突起部を除く)	φ54 × 27 mm	φ63 × 37 mm
質量	223 g	460 g

小型化モデル



<https://youtu.be/vQqyGsqPwb0>

赤字：優位な性能

まとめ

- 3Kギヤ(約1/100)により動力伝達効率>90%(設計値)を実現
⇒ 逆駆動が可能
 - ロボットの柔らかい制御が可能に
(安全なロボットの実現)
- 小型高回転型モータと組み合わせることで高効率、高バックドライバビリティ(高い安全性)、低コスト、小型、大出力の特長をもつアクチュエータを実現する

今後の課題

- 減速機の効率・トルク容量の改善、バックラッシの低減