

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：51601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14704

研究課題名(和文)加振によりバックドライブ切り替え可能な遊星ギヤ：切り替えに適する加振素子の解明

研究課題名(英文)Planetary Gear with Backdrive Switching Capability by Vibration: Study of Vibration Elements Suitable for Switching

研究代表者

野田 幸矢(Noda, Satsuya)

福島工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：60803278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：歯車の効率に関する理論をもとに静力学解析を行い、バックドライブしにくい条件が固定ギヤと出力ギヤの歯数差に依存することが分かった。さらに動力学モデルを解析した結果、以下のことが明らかになった。(1)終端速度に関しては、固定ギヤと出力ギヤの歯数差が小さく歯面の動摩擦係数が大きいほど存在しうる。今回開発した実験装置では、前述の歯数差を1としても加速し続ける。(2)印加される荷重、加振周波数、振幅が増大するほど必要な加振力は増大する。よって、(2)の結果に関して提案した動力学モデルが妥当か加振力を推定したところ、推定した加振力の結果は動力学モデルの結果とおよそ一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遊星ギヤに関して効率を理論的に求める試みはこれまで多く行われてきた。しかし、遊星ギヤにおいてバックドライブ不可能なことに着目した研究がこれまでほとんどない。したがって、「バックドライブ切り替えに適する加振素子」を解明することは極めて独自性の高い試みである。この研究成果により、将来的にはロボット用シナヤかさ切り替えシステムの信頼性を既存技術より向上させられる。こうした技術は以下のような社会への応用が期待できる。・通常時にはエネルギーを節約し、非常時にはバックドライブさせることができる工場での産業用ロボット。・介護分野において、介護をアシストするロボット

研究成果の概要(英文)：Based on the theory of gear efficiency, static analysis was conducted, revealing that the backdrivability depends on the difference in the number of teeth between the fixed gear and the output gear. Furthermore, through the analysis of the dynamic model, the following findings were made:(1) In terms of terminal velocity, it is possible for the system to continue accelerating when the difference in the number of teeth between the fixed gear and the output gear is small and the dynamic friction coefficient of the tooth surface is large. In the experimental setup developed in this study, even with a tooth count difference set to 1, continuous acceleration was observed.(2) The required vibration force increases as the applied load, vibration frequency, and amplitude increase. Therefore, by estimating the vibration force based on the proposed dynamic model in relation to the results of (2), I found that the estimated vibration force roughly matched the results of the dynamic model.

研究分野：ロボティクス

キーワード：遊星歯車 振動 バックドライブ

## 1. 研究開始当初の背景

人と産業用ロボットが協調作業する状況では、人身事故発生時などロボットの関節を外からの力で逆回転(以下:バックドライブ)できる方がよい。一方、一般的な産業ロボットの関節にはバックドライブが不可能な構造が用いられることが多い。これにより、電流を流さなくても姿勢維持を可能にし、エネルギー消費量を抑制する。よって、これらを両立するためには、状況に応じバックドライブ可能性を切り替えられる方が望ましい。

そのためには、バックドライブ不可能な機構にセンサを取り付け、制御により疑似的にバックドライブさせる方法が一般的である。しかし、この方法ではシステムが複雑になるため、信頼性に問題がある。ここで、加振により摩擦係数が低減する効果に着目する。申請者が以前所属した機関において、通常バックドライブしないウォームギヤを加振時のみバックドライブさせる研究が行われてきた。この方法の特徴として、センサが不要で加振時のみバックドライブさせられる点である。しかし、この研究の適用できる範囲はウォームギヤを用いる減速機に限定される。申請者は図1に示すように、ロボットの関節によく用いられる2K-H遊星ギヤへの応用に着目する。

既に図2に示す予備実験において、加振によりバックドライブできない遊星ギヤが存在することを確認している。さらに、これを加振させるとバックドライブすることがわかった。ただし予備実験では試行錯誤的に設計パラメータを調整したため、バックドライブしない構造など前提条件となる箇所未解明な部分がある。よって、学術的問いを「バックドライブしない遊星ギヤが加振時のみバックドライブするための設計条件とは何か?」と設定する。

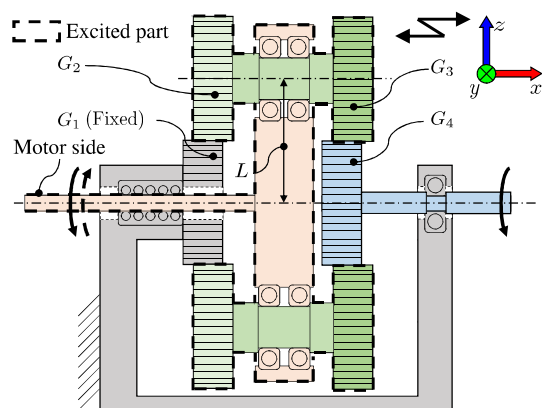


図1 加振による2K-H遊星歯車のバックドライブバリエーション切り替え

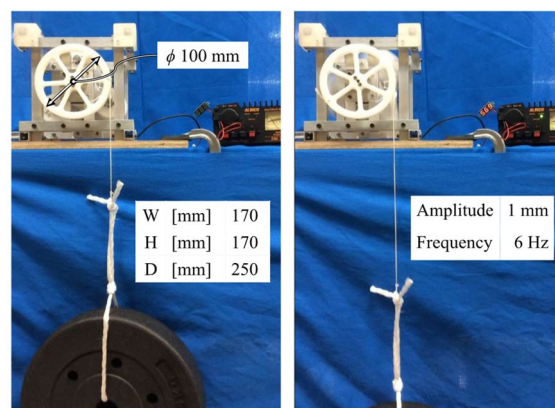


図2 加振により2K-H遊星歯車のバックドライブバリエーションが切り替わる様子

## 2. 研究の目的

本研究ではバックドライブ切り替え可能な2K-H型遊星ギヤに関する設計条件を明らかにする。特に本研究ではどのような加振素子がバックドライブ切り替えに適するのかを検証するため、以下の二つのことを目的とする。

- 前提条件となる2K-H型の遊星ギヤがバックドライブしにくくするための構造を明らかにすること。
- どのような振幅、周波数などの加振条件が、バックドライブさせるのに適するのかを明確にすること。

## 3. 研究の方法

本研究では、静力学モデル、動力学モデル解析と実証実験より2K-H型遊星ギヤのバックドライブ切り替えの条件および適切な振動子を明らかにする。これまで、試行錯誤的にバックドライブしにくい条件等を求めていたため、今回力学モデルを立てモデルが正しいか検証する。具体的方法に関しては以下に示す。

- (1) 静力学モデルの解析では、バックドライブしにくい条件について解析する。これまで歯車の効率に関するNiemannの理論と両角らの遊星歯車の効率に関する理論が存在するため、こ

これらの理論を活用する。

- (2) 動力学モデルの解析では、上記の静力学モデルを発展させ、バックドライブ時に終端速度が存在するのか明らかにする。また、加振に必要な力の概算値を求め、加振にふさわしい振動子について検討する。
- (3) 上記の(1)(2)の妥当性を検討するため、遊星歯車減速装置を製作し検証する。これまで、使用してきたポリアセタール製のギヤでは摩耗の影響で再現性が得られなかったため、金属製のギヤに変更し耐摩耗性を向上させる。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 静力学モデルの解析

前提条件となるバックドライブしにくい条件について、歯面間の静力学モデルより解析した。図3に示すように $G_1$ -- $G_4$ を定め、 $\mu$ を歯面間の摩擦係数、 $\varepsilon_i$ を歯車 $G_i$ の遠のき or 近づきかみ合い率、 $n$ を $G_1$ と $G_4$ の歯数差とする。Niemannの理論と両角らの遊星歯車の効率に関する理論を踏まえ構造に依存する定数  $n$  を

$$n = \frac{\pi(2 - \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i + \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i^2)}{n}$$

と定める。これらを踏まえ力のつり合いの式を整理すると $\mu > 1$ がバックドライブしにくい条件となった。この結果から、以下のことが分かった。

- $n$ に関して、 $n$ が支配的に作用する。
- $\mu = 0.271$ の場合、 $n = 1$ でバックドライブしにくくなる。

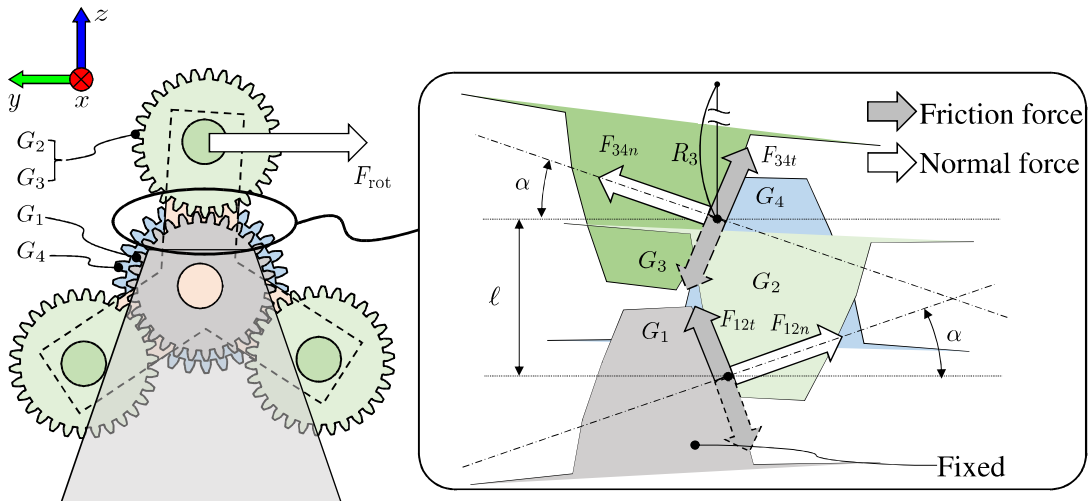


図3 歯車の力学モデル

##### 4.2 動力学モデルの解析

動力学モデルからバックドライブバリエティ切り替えに要する加振力を見積もった。 $\hat{I}$ を系全体の慣性モーメント、 $\tau_{rot}$ を外力によるトルク、 $\lambda$ を幾何学的条件により決まる無次元の定数、 $\mu_d$ を動摩擦係数とすると系全体のバックドライブ時の運動方程式は以下のようなになる。

$$\hat{I} \frac{d\omega_t}{dt} + \tau_{rot} \frac{\mu_d |\omega_t|}{\sqrt{\omega_t^2 + \lambda^2 \omega_n^2}} = \tau_{rot}$$

この結果から、 $\mu_d = 0.174$ のとき、 $|\frac{d\omega_t}{dt}| > 0$ となるためバックドライブ時加速し続けることが分かる。

$Z_i$ を歯車 $G_i$ における歯数、 $\omega_n$ を加振角周波数、 $\hat{M}$ をキャリア部質量、 $m$ を歯車のモジュール、 $\alpha$ を圧力角、 $e$ を振幅とし、加振に必要な力に関して、歯面間の摩擦力とキャリア部を加振させるための加速度に起因するものとし加振に必要な力 $F_{ex}$ を運動方程式から

$$|F_{ex}| = \frac{2\mu_{ax}\tau_{rot}}{mZ_4 \cos \alpha} \left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right) + \hat{M}\omega_n^2 e \cos \omega_n t$$

とモデル化した。ただし、加振方法に関して、ベアリングのバックラッシュより十分に大きな振幅を与えるため本研究では偏芯カムにより加振する。偏芯カムの場合、以下の式で加振に必要なトルクを推定する。

$$\widehat{\tau}_{\text{cam}} = \frac{4\mu\tau_{\text{rot}}}{\pi m Z_4 \cos \alpha} \left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right) e + \frac{\widehat{M}}{\pi} \omega_n^2 e^2$$

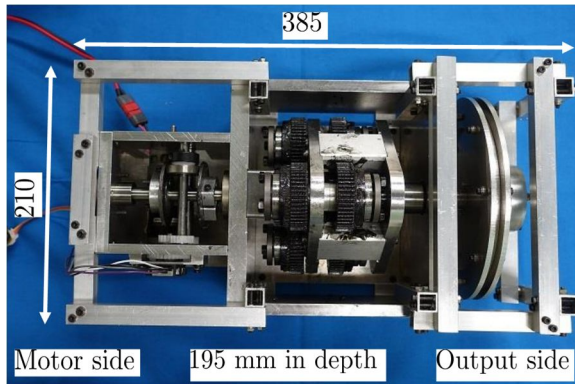
この結果から以下のことが分かった。

- $\tau_{\text{rot}}$ が増大するほど必要な加振力が増大する。
- 加振周波数が高いほど加振力が増大する。

#### 4.3 実験によるモデルの妥当性検証

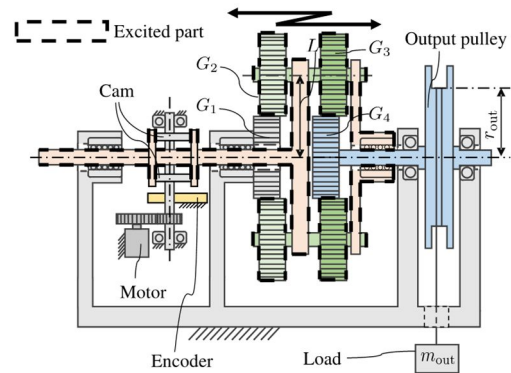
##### (1) 改良した実験装置

提案した理論を検証するための装置を図 4 に、模式図を図 5 に、諸元を表 1 にそれぞれ示す。実験時の再現性を確保するため、これまで開発してきた実験装置より剛性を向上させている。ギヤを簡単に交換できるように軸との締結部には ETP プッシュ (Miki Pulley: ETP-A-15-B) を使用している。偏芯カムを駆動させるため DC モータ (MABUCHI RS-735, 減速比: 8.5:1) を使用し、エンコーダ (CUI-DEVICE: AMT102-V) で偏芯カムの回転数を計測できるようにする。軸表面が傷つかないように高周波焼き入れ処理をした SUS440C を材質として用いた。



(a) Developed device.

図 4 改良した実験装置



(b) Schematic diagram.

図 5 改良した実験装置の模式図

表 1 改良した実験装置の諸元

| Item              |                      | Value          |
|-------------------|----------------------|----------------|
| Gears             | Module               | 1              |
|                   | Pressure angle [deg] | 20             |
|                   | Material             | S45C           |
| Actuator          | Motor Model          | MABUCHI RS-735 |
|                   | Amplitude [mm]       | 1              |
| Distance $L$ [mm] |                      | 50             |

表 2 歯数差とバックドライブビリテ  
ィの関係

| $n$ | $Z_1$ | $Z_4$ | $\rho$ | $\mu_s \Delta$ | Backdrivability |
|-----|-------|-------|--------|----------------|-----------------|
| 1   | 49    | 50    | 25.5   | 1.34           | Seldom          |
|     | 50    | 49    | -24.5  | 1.34           | Seldom          |
| 2   | 50    | 52    | 13     | 0.668          | Always          |
|     | 52    | 50    | -12    | 0.668          | Always          |
| 3   | 49    | 52    | 8.84   | 0.445          | Always          |
|     | 52    | 49    | -7.84  | 0.445          | Always          |

##### (2) 実験装置におけるバックドライブビリティ切り替え動作検証

開発した実験装置でバックドライブビリティが切り替わるか確認した。図 6 に実験の様子を示す。0.368 Nm の負荷を出力軸に与え、およそ 5 Hz の振動となるよう、DC モータに安定化電源 (Kikusui: PWR401L) で 3.6 V 印加した。加振しない 0-14.5 s の間バックドライブせず静止したままであった。一方、加振を始めた 14.5 s 以降バックドライブし、重りが重力方向に動いた。よって、開発した装置でバックドライブビリティが切り替えられることを確かめた。

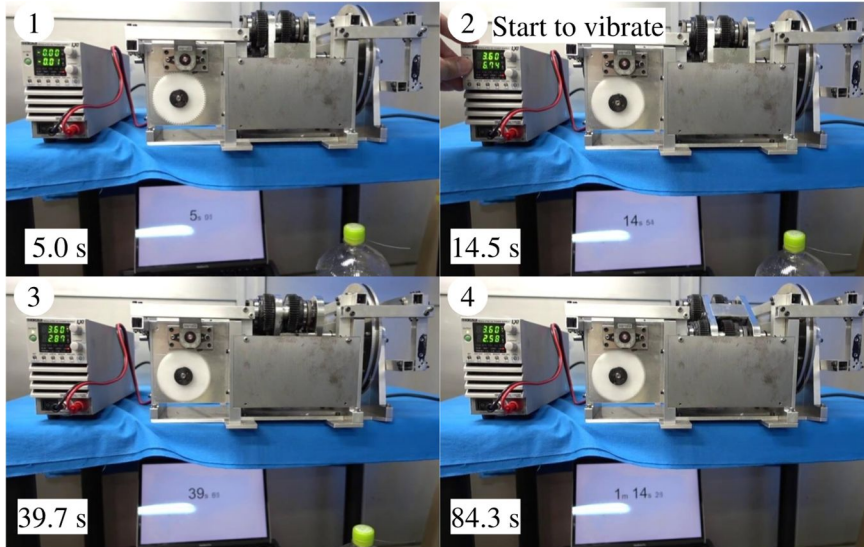


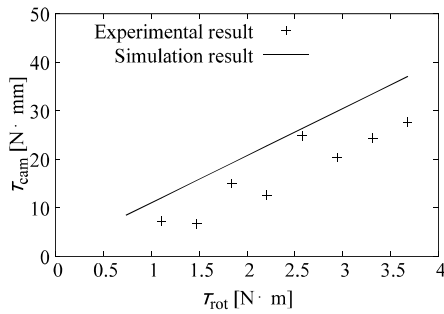
図 6 改良した装置で加振時にバックドライバビリティが切り替わる様子

### (3)バックドライブしにくい条件の検証

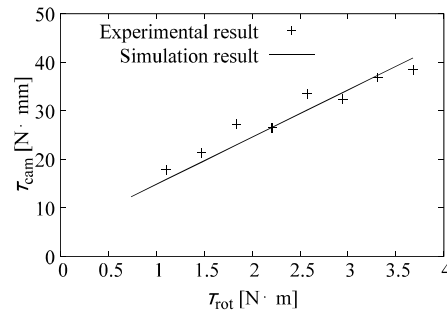
バックドライブしにくい条件について調査した結果を表 2 に示す．出力軸に 3.68 Nm の荷重をかけバックドライブするか確認した． $n \geq 2$ では恒常的にバックドライブするものの， $n = 1$ の場合バックドライブしにくい状況が生じた．バックドライブしにくい状況に関しては，キャリアの位相や歯の摩擦状況によるばらつきがあるもののおよそ上述の理論と一致するものである．したがって，上述の理論でバックドライブしにくい条件を推定できると言える．

### (4)加振に必要なエネルギーの検証

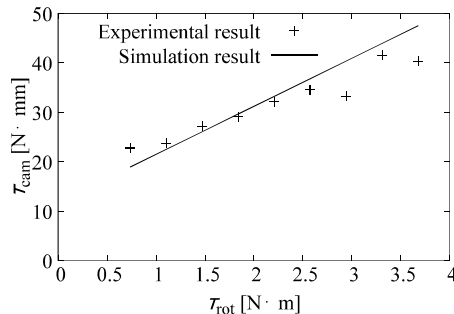
バックドライブ切り替えに必要な加振力の予想値と実験値を図 7 に示す．荷重を 0.368—3.68 Nm の範囲とし，加振周波数に関してもおよそ 5,10,15 Hz となるようにしている．本実験では，加振力の実験値を DC モータの電流と回転数から推定している．図 7 より予想値と実験値がおよそ一致していることが分かる．よって，上述の理論でバックドライブ時に必要な加振力を推定できる．



(a)  $V_{in} = 3.6 \text{ V}$  ( $\bar{\omega}_n = 32.9 \text{ rad/s}$ ).



(b)  $V_{in} = 6.2 \text{ V}$  ( $\bar{\omega}_n = 64.9 \text{ rad/s}$ ).



(c)  $V_{in} = 8.8 \text{ V}$  ( $\bar{\omega}_n = 98.3 \text{ rad/s}$ ).

図 7 加振力と荷重との関係(実験値と予想値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>猪狩 涼, 野田 幸矢, 高山 俊男                                 |
| 2. 発表標題<br>バックドライバビリティ切替可能な遊星歯車機構 第3報: バックドライバビリティ切り替え可能条件の解明 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022                        |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤田 悠史, 野田 幸矢, 高山 俊男                                    |
| 2. 発表標題<br>バックドライバビリティ切替可能な遊星歯車減速装置の検討 第2報: 切替に適した条件とバックドライブの挙動観察 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020                            |
| 4. 発表年<br>2020年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|--------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 高山 俊男<br><br>(Takayama Toshio) |                       |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|