

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13854

研究課題名(和文) 小型・高効率を実現する複合遊星歯車機構

研究課題名(英文) Compact and Highly-efficient Compound Planetary Gearboxes

研究代表者

藤本 康孝 (Yasutaka, Fujimoto)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60313475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では小型・高効率・高減速比の新しい複合遊星歯車機構を提案した。提案する減速機は内歯車もしくは太陽歯車を持たないため設計上の制約条件を緩和することができ、ほぼ任意の減速比を実現できる。また従来は難しかった極めて大きな減速比も実現できる。具体的には、キャリアを入力とする2K-H型複合遊星歯車機構の4種類の異なる構成を提案し、減速比1/135および1/405の減速機の製作を行った。また歯車の転位を利用し、減速機の効率を最大化する最適化問題として最適な転位係数を求める手法を提案した。さらに減速機の効率と減速比の関係を明らかにした。最終的に減速比1/95、効率96.5%の減速機の設計を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, new compound planetary gear mechanisms with small size, high efficiency, high reduction ratio were proposed. Since the proposed gearboxes have no internal gear or sun gear, design constraints can be relaxed, and it is possible to realize an almost arbitrary reduction ratio. In addition, it is also possible to realize an extremely large reduction ratio which was difficult in the conventional gear mechanisms. We proposed four different configurations of a 2K-H type compound planetary gear mechanism, and manufactured reduction gears with a reduction ratio of 1/135 and 1/405. We also proposed a method to obtain the optimum profile-shift coefficients that maximize the efficiency of the reduction gearbox. Furthermore, the relation between the efficiency and the reduction ratio was clarified. Finally, a reduction gear with a speed reduction ratio of 1/95 and an efficiency of 96.5% was designed.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：遊星歯車機構 アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

高効率、高トルク、高減速比の歯車機構は、各種産業機器や民生機器などに多くの需要がある。これまでに以下のような歯車機構が開発されてきた。①単純遊星歯車機構(1段)：減速比 1/4～1/10 程度、②ラビニョ遊星歯車機構(1段)：減速比 1/10 程度、③複合遊星歯車機構：減速比 1/100 程度、④不思議遊星歯車機構：減速比 1/100 程度（転位歯車使用、損失大）、⑤波動歯車機構：減速比 1/30～1/200、⑥サイクロイド歯車機構：減速比 1/60～1/200、これらの歯車機構の中で、波動歯車機構、サイクロイド歯車機構は特殊な歯車を用いるため、コストが高い。一般的なインボリュート歯車を利用した遊星歯車機構がコストや強度の面で望ましい。ただし、一般に遊星歯車機構の設計においては、(1)同軸条件、(2)組立条件、(3)隣接条件の3つの制約条件を考慮しなければならない。遊星歯車機構を複数段用いた複合遊星歯車機構では 1/100 程度の減速比が実現できるが、複数の遊星歯車機構がこれらの条件を満足する必要があるため、設計の条件が大変に厳しくなる。そこで、この問題を部分的に回避する複合遊星歯車機構が提案されている[1]・[3]。文献[1]では、2つの遊星歯車機構を連結し、一部に転位歯車を用いることで条件を緩和している。文献[2]では、2つの遊星歯車機構を連結し、遊星歯車を非対称に配置することで条件を緩和している。文献[3]では、2つの遊星歯車機構のキャリア同士および太陽歯車同士を連結し、それぞれの遊星歯車軸は独立とすることで自由度を増している。しかし、文献[1]および文献[2]の複合遊星歯車機構は、同軸条件と組立条件を満足するものではないため、精度や効率の点が課題となる。文献[3]の複合遊星歯車機構は、これら条件を満足するが、やはり歯車の歯数の制約があり、特に利用できる内歯車の歯数に制限がある場合には、実現可能な減速比の数が限定される。また、非常に大きな減速比を実現することが難しくなる。本研究では、減速機構の構成を模索し、これらの制約条件を著しく緩和する構成法を提案する。

[1]WO2007-017935A1 遊星歯車装置、[2]特開 2008275112 高減速複合遊星歯車機構（産総研）[3]WO2012-060137A1 複合遊星歯車機構（安川電機）

2. 研究の目的

本研究では、小型・高効率・高減速比の新しい複合遊星歯車機構を提案し、実証することを目的とする。提案する複合遊星歯車機構は、内歯車もしくは太陽歯車を持たないため同軸条件を考慮する必要がなく、設計上の制約条件を緩和することができるため、ほぼ任意の歯数の歯車の組み合わせで複合遊星歯車機構を構成することができる。歯車の歯数の組み合わせにより、従来の複合遊星歯車機構では得られない極めて大きな減速比を実

現することができる。本研究では、提案する機構を実現し、効率等を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

1/100～1/1000 の減速比における歯数の組み合わせについて、体積当たりの減速比が極大となる組み合わせを数組抽出し、その中から 1/135 の減速機構の設計および製作を行う。製作した減速機の駆動試験を行い、諸特性を明らかにする。さらに、減速機サイズの低減および省コスト化の検討を行う。

併せて、減速機の一般化モデルの構築を行い、順駆動動力伝達効率と逆駆動動力伝達効率の関係を明らかにする。

4. 研究成果

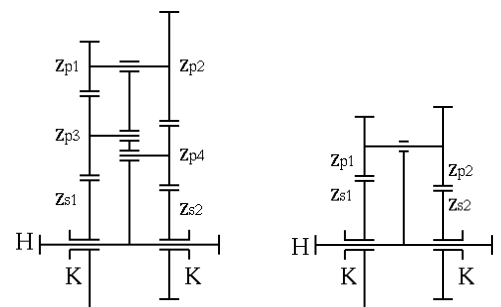
検討した減速機の構成を図 1 に示す。いずれも 2K-H 型複合遊星歯車機構に分類される。最初に Type I の減速機の開発を行った。キャリアを入力、第 2 太陽歯車 Zs2 を出力とすると、減速比は次式で与えられる。

$$G = 1 - I$$

$$I = \frac{Z_{s1} / Z_{p1}}{Z_{s2} / Z_{p2}} \quad (1)$$

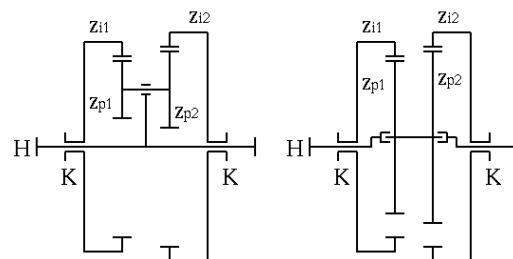
この構成では、歯車 Zp3、Zp4 によって遊星歯車 Zp1、Zp2 の軸間距離を自由に調整できるため、Zs1、Zp1、Zs2、Zp2 をほぼ任意に選ぶことができ、非常に高い減速比も容易に実現することができる。試作では 1/135 の減速機を製作し、所望の減速比が得られることを確認した（図 2）。

次に、歯車 Zp3、Zp4 を廃してコンパクト化したモデル（図 1 (b) Type II）の検討を行



(a) Type I

(b) Type II



(c) Type III

(d) Type IV

図 1: 本研究で検討した複合遊星歯車機構

った。このモデルでは、すべての歯車に同一モジュールの歯車を使用した場合、大きな減速比を実現することができないという問題がある。そこで、Zs1, Zp1 のモジュールと Zs2, Zp2 のモジュールについて、一方をメートル、一方をダイヤモンドラとし、軸間距離を一致させるために歯車の転位を適用することでこの問題を解決した。これにより、非常にシンプルな構成でほぼ任意の減速比を実現することができる。試作では 1/405 の減速機を製作し、所望の減速比が得られることを確認した (図 3)。



図 2: 製作した減速機 (Type I)



図 3: 製作した減速機 (Type II)

製作した Type I, Type II の減速機の駆動試験を通して、これらの減速機には耐久性に課題があることが分かった。具体的には、入力であるキャリアを高速に回転させると、その遠心力によってキャリアに組み付けられた遊星歯車の軸受に過大な力が発生し、軸受の寿命が低下するという問題である。

遠心力を低減するためには、キャリアの半径を短縮すればよいので、太陽歯車の代わりに内歯車を使用したモデル (図 1 (c) Type III) を提案した。

また、これらの減速機モデルの効率式を導出し、検討を行った。効率式を表 1, 表 2 に示す。ただし、 η_0 は歯車対の基準効率である。

表 1: 複合遊星歯車機構の順駆動効率

	Zs1(Zi1)固定 Zs2 出力	Zs2(Zi2)固定 Zs1 出力
$I > 1$	$\frac{\eta_0(I-1)}{I-\eta_0}$	$\frac{I-1}{I-\eta_0}$
$I < 1$	$\frac{1-I}{1-\eta_0 I}$	$\frac{\eta_0(1-I)}{1-\eta_0 I}$

表 2: 複合遊星歯車機構の逆駆動効率

	Zs1(Zi1)固定 Zs2 入力	Zs2(Zi2)固定 Zs1 入力
$I > 1$	$\frac{\eta_0 I - 1}{I - 1}$	$\frac{I - 1}{I - \eta_0}$
$I < 1$	$\frac{\eta_0 - I}{\eta_0(1 - I)}$	$\frac{\eta_0(1 - I)}{1 - \eta_0 I}$

駆動試験を通して、製作した減速機の効率は 50%を下回っていることが明らかになった。効率を向上させるためには、歯車対の基準効率 η_0 を大幅に向上させる必要があることが分かった。

さらに、表 2 の効率式について、減速機の種類に寄らず一般に以下のように近似できることを明らかにした。

$$\text{順駆動効率 } \eta_f = \frac{1}{1 + 1/G'} \quad (2)$$

$$\text{逆駆動効率 } \eta_b = 1 - 1/G' \quad (3)$$

$$\text{ただし、} G' = G / (1 - \eta_0)$$

ここで、 G' は損失率で正規化した減速比である。これより、高減速比になると順駆動効率は双曲的に減少するのに対し、逆駆動効率は線形的に減少することがわかった。さらに、(2)(3)からで、 G' を消去して順駆動効率と逆駆動効率の関係を求めると図 4 が得られる。これより、順駆動効率が 50%以下の場合には、逆駆動は全く不可能であることがわかった。

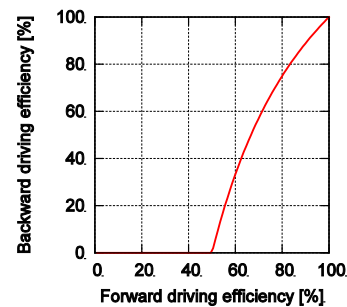


図 4: 順駆動効率と逆駆動効率の関係

そこで、基準効率 η_0 を向上させる方法として、歯車の転位を利用し、効率最大化問題として最適な転位係数を求める手法を提案した。提案手法により Type III の減速機で減速比 1/96、順駆動効率 68%のモデルの設計を行った。なお、歯面の摩擦係数は 0.1 と仮定している。これは、一般的な値である。

さらに、より効率を向上させる方法として、転位係数の最適化に加えて、内歯車と遊星歯車の歯数差を限界まで小さくするモデル (図 1 (d) Type IV) を提案した。歯数差を小さくすることで歯車対の基準効率を向上させることができる。この方法により Type IV の減速機で減速比 1/95、順駆動効率 96.5%のモデル

ルの設計を行った。約 1/100 の減速比でこれほど高効率の減速機はこれまで存在せず、様々な応用が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

①藤本康孝, バックドライブが可能なロボット用高効率減速機の開発, 電気学会産業応用部門大会, 函館アリーナ, 北海道, 2017.8

②小布施大志, 藤本康孝, 高減速遊星歯車機構を用いたヒューマノイドロボットの高出力化, 日本ロボット学会学術講演会, 3I1-02, 東京電機大学東京千住キャンパス, 東京, 2015.9

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: 遊星歯車装置

発明者: 藤本康孝, 道家 輝

権利者: 国立大学法人横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-008496

出願年月日: 2017 年 1 月 20 日

国内外の別: 国内

名称: 遊星歯車装置

発明者: 藤本康孝, 道家 輝

権利者: 国立大学法人横浜国立大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-008497

出願年月日: 2017 年 1 月 20 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

www.fujilab.dnj.ynu.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 6 0 3 1 3 4 7 5

(4) 研究協力者

小布施 大志 (KOBUSE, Daiji)

道家 輝 (DOUKE, Hikaru)