

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 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14140

研究課題名(和文) 着衣内装着式人間動作補助機向け超小型駆動機構の最適諸元調査

研究課題名(英文) Study of the specification of the micro miniature drive mechanism for wearable human motion assistance device

研究代表者

田中 英一郎 (Tanaka, Eiichiro)

早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・教授

研究者番号：10369952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：人間動作補助機に使用可能な駆動部を実現するため、小型軽量安価を念頭に置き、波動歯車に限らず、ウォームギヤをはじめとする駆動部の構造および諸元について、人間に装着することを前提とした検討をした。まず、多条ウォーム+ヘリカルギヤの使用を提案し、負荷繰り返し試験よりヘリカルギヤにLT625を使用すると摩耗が低減することを確認した。また、ホビー用超小形サーボモータが小形軽量安価に適しているが、過負荷が入力されても連続使用するために歯車内に組み込むトルクリミッターを開発した。挟む樹脂板ごとの最大伝達トルクを確認し、NBRとPVCの負荷トルクごとの最大負荷繰り返し数を確認した。

研究成果の概要(英文)：We studied the minimum structure and specifications of the drive mechanism for human motion assistance device. Multithread worm and helical gear combination was proposed, and from the life time limit test result, we confirmed the material LT625 was longer than Albc. Furthermore, we found the micro miniature servo motor for hobby was good specification from the viewpoints of small, light-weight, and reasonable for human assistance device. To be able to use it continuously, we developed the torque limiter which can include in the gear. We confirmed the maximum transmission torque and maximum load repetition number for each material.

研究分野：機構学

キーワード：人間動作補助機 駆動機構 超小型化 逆入力 トルクリミッター

1. 研究開始当初の背景

高齢化した社会に対し、高齢者だけでなく患者、介助者などに直接装着して動力を補助する補助機が各種開発されている。従来の装着型人間動作補助機の多くはモータによる補助を行っており、その減速機にバックラシのない波動歯車（ハーモニックドライブ）を使用しているが、波動歯車は変形しながら使用する構造であることから一般には歯車の種類の中で耐久性が低い方といわれており、過負荷時に脱調すると復帰できない問題がある。また人間の関節上に出っ張ることなく駆動部を配置するには、高価な薄型扁平モータを使用する必要があった。これに対し、比較的安価な円筒型モータを使用し出力軸を直角にかつ薄型に構成可能なウォームギヤの使用を検討したが、従来のウォームギヤは効率が悪く、またセルフロックがかかるため装着者が自由に動けず危険であった。

2. 研究の目的

以上の状況から、人間動作補助機に使用可能な駆動部を実現するため、小型軽量安価を念頭に置き、波動歯車に限らず、ウォームギヤをはじめとする駆動部の構造および諸元について、人間に装着することを前提とした検討をすることを目的とする。

3. 研究の方法

（1）多条ウォーム+ヘリカルギヤによる可能性検討

ウォームギヤの利点は、わずか1対の歯車対により大減速が可能であり、小型化には最も適している。また、ウォームギヤは一般に、ウォームとウォームホイールをかみ合わせたものをいう。駆動側歯車であるウォームがウォームホイールの側面に配置され、入出力軸の関係が交差軸ではなくねじれの関係になることから、出力軸方向に対しウォームホイールの厚さ分のみ考慮すればよく、最も薄型に構成することができる。

しかしそれと同時にウォームギヤならではの大きな特徴が2つある。1つは動力の伝達効率がおおよそ50%程度である。ウォームホイールは面圧を下げるために接触面を可能な限り大きくとるよう特殊な形をしている。しかし、接触面積が広ければそれに伴い摩擦抵抗が増加し、結果的に効率は低減する。効率の低い歯車を使用すると、必要出力トルクに対して過大なモータをつけなければならず、装着者への負担を増加させる。

もう1つはセルフロック、自動締りと呼ばれる、逆入力ができない現象が発生する。ウォームの進み角が摩擦角よりも小さい場合、出力軸側からの入力ができないのだが、この現象は例えばエレベータなどの巻き上げ機に使用した場合、停電やブレーキ、電気系の故障があったとしても機構的に乗りかごが動く心配はないため、安全装置として使用することができる。しかしこれを人間の関節に

取り付けした場合、補助装置が動くときしか関節が動かせないため、転倒など突発的な動作を必要としたときに対応できず大変危険である。しかし滑らかに動くと停止時は装着者に対して何の支持にもならず、また逆入力側からの反力をモータのみで受けることとなり、モータの負担が増加するため、ある程度の洪さが必要である。

以上の問題を解決するため、まず、ウォームギヤとヘリカルギヤ（はすば歯車）をかみ合わせることにする。これにより理論上点接触となり、大幅に摩擦抵抗を低減することができるが、逆に伝達力を1点に集中させることになり、歯車の摩耗を早めるため、従来この方法を使用する場合は軽負荷時に限られていた。また、歯車の摩耗はバックラシを増大させ、補助機のカタを増大させることになる。補助機に多少のカタがある方が装着したときの感覚として拘束間が軽減されることから好ましいことがわかっているが、カタの拡大は、例えば足関節に装着すると足先で十分上がりきれずに敷居などにつまずく危険性が生じる。そこで、耐摩耗性の高い材料をヘリカルギヤに使用すること、適切なグリスを選定することにより、摩耗量進行を抑えて長期間装置の使用可能性を検討した。

また、多条ウォームを用いることにより進み角を拡大し、逆入力可能としたところ、予備実験より、入力側は80%、逆入力側は40%の効率となり、モータからは高効率に、出力軸からはある程度洪さがあるが動作可能であることを確認した。（図1）

以上より、図2に示すようなウォームギヤ用動力吸収式試験装置を製作した。ウォーム入力軸と出力軸の回転角度をエンコーダで計測し、入出力軸のトルクを計測可能とする。連続化に転ではなく人間の歩行を模擬して往復運動を入力とし、またモータの連続トルクとして4Nmをブレーキにより負荷し、負荷繰り返し数をカウントすることとした。また、ヘリカルギヤの材料としては当初A2017を使用したところ、短時間で摩耗したため、Al1bcを基本とした改良版とLT625を比較することとした。また、グリスは、比較的安価な鉱油にリチウム石鹸を加えたものとした。

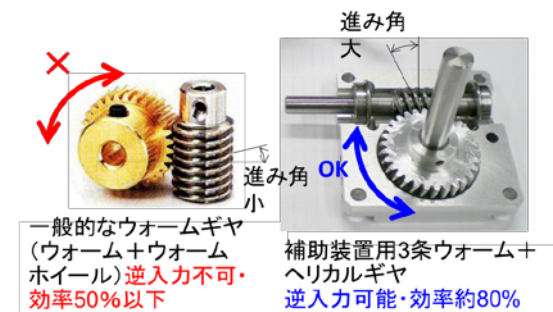


図1 一般的なウォームギヤと補助装置用ウォーム+ヘリカルギヤの違い

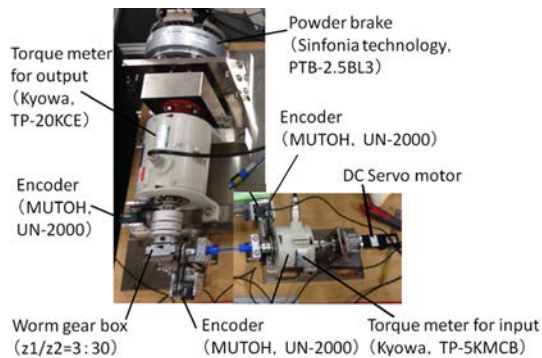


図2 ウォーム用動力吸収式負荷試験装置

(2) ホビー用超小形サーボモータによる可能性検討

一方、駆動部の最小化のために様々な可能性を調査したところ、ラジコン模型やロボット工作などに使用されるホビー用超小形サーボモータの性能の高さに着目した。前述のウォームを用いたギヤボックスとモータを含めると 400g 程度の重量になるが、定格トルクを 4Nm としたホビー用モータは約 100g と超軽量であり、かつモータ、エンコーダ、モータドライバ、ギヤヘッドを込みとしたものでありながら小形安価という、人間に装着するには申し分ない諸元である。しかしながら、駆動系を超小形に作るには、安全率を下げ、設計時の想定負荷以上をかけないようにする必要がある。このホビー用モータは、図3下のように多段減速がされているが最終段の大歯車のみアルミ製であり、定格トルク以上の負荷がかかるとその歯車の歯が折れるようになっている。超小形化のためには理にかなった設計であるが、このサーボモータを過負荷が過ぎた後は連続して使用したい、また使用者が高齢者などの場合自分で歯車交換などはできないことを考えると、過負荷時だけスリップするトルクリミッタが必要である。そこで、図3上のような歯車側と出力軸側の円板で摩擦係数の高い樹脂板を挟み、半割れのギヤボックスで閉じる構造を提案した。この樹脂板の材質、直径の違い、また両方から挟むスチール製の円板に溝を彫り、樹脂板が変形した際の摩擦力を増大させたものを比較することとした。

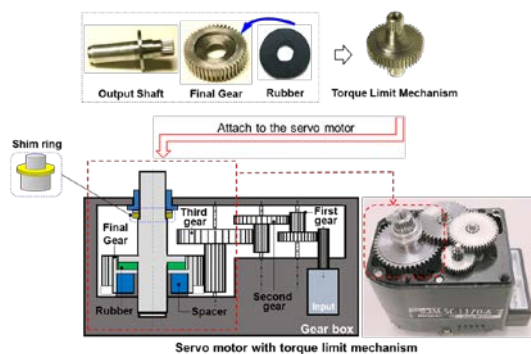


図3 ホビー用モータの構造とトルクリミッタ

4. 研究成果

(1) ヘリカルギヤの材質の違いによる角度バックラッシの変化

図4に摩耗曲線、すなわち負荷繰り返し数と角度バックラッシの関係を2種類で確認した結果を示す。本機構を足関節に使用したと仮定し、足関節中心から靴の先までおよそ 25cm 程度としたとき、角度バックラッシがおよそ 2.3 度になると爪先のガタが 2cm 程度発生する。住宅の敷居の上限が 2cm であることから、角度バックラッシが 2.3 度になるときの負荷繰り返し数を比較すると、Albc は 30 万回程度で達したのに対し、LT625 は 60 万回程度で達した。LT625 は摺動部を対象として開発された材料であることから、すべり接触を伴うウォームとのかみあいには適しているものと考えられる。

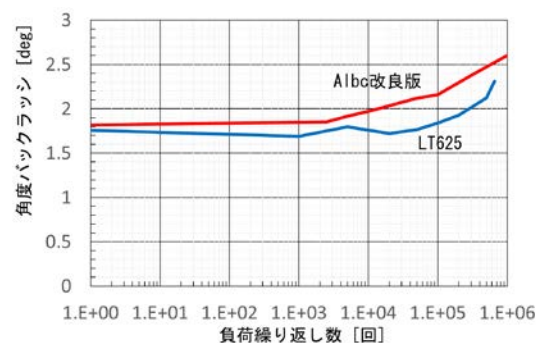


図4 負荷繰り返し数と角度バックラッシの関係

(2) ホビー用サーボモータ内に組み込むトルクリミッタの特性把握

歯車内に組み込むトルクリミッタの最大伝達トルクについて、各種材料およびその直径、また円板に約 1mm の溝を放射線状に 120 度ずつ 3 本加えたときの結果を図5に示す。まず、5 種類の材料の中では、NBR が最も高いトルクを示し、定格トルクの 4Nm を超えた値を示した。CR は、滑り始めは早いが姿勢を維持できなくなるのは NBR とほぼ同様であることが確認できた。また、直径を 14mm から 18mm に増やすと確実に増加した。さらに、溝を掘ることにより、どの材質も 0.5-1Nm 程度の増加が確認できた。溝を掘ることにより、挟まれた樹脂材が溝の中に変形して逃げ、その逃げた部分にせん断力を加えることができ、結果として伝達トルクが増加したと考えられる。しかし NBR は、溝付の場合は複数回使用により亀裂が入り、劣化して分解されるが PVC は形状を維持しており、耐久性の観点からは PVC の方が優れていた。そこで、NBR と PVC を用いたときの負荷トルクと負荷繰り返し数の関係を実験的に確認した。転倒などの状態を想定し、5 秒間その負荷が加えられたとしてその負荷に耐えられるまでの繰り返し数を確認した。SN 曲線として図6, 7に示す。どちらも溝付と溝なしでは、SN 曲線の

勾配が大きく異なることがわかる。PVC は NBR よりも負荷繰り返し数が大きく、またスリップして負荷に耐えられなくても表面が微細化するだけで樹脂板自体は破損していなかった。一方、NBR は負荷に耐えられなくなりギヤボックスを開けると大抵樹脂板が形をとどめないほど分解されていた。また、どちらも負荷トルクによっては、溝なしの方が長寿命の帯域がある。したがって、要求するリミットトルクに応じて溝の有無を決めることが重要といえる。

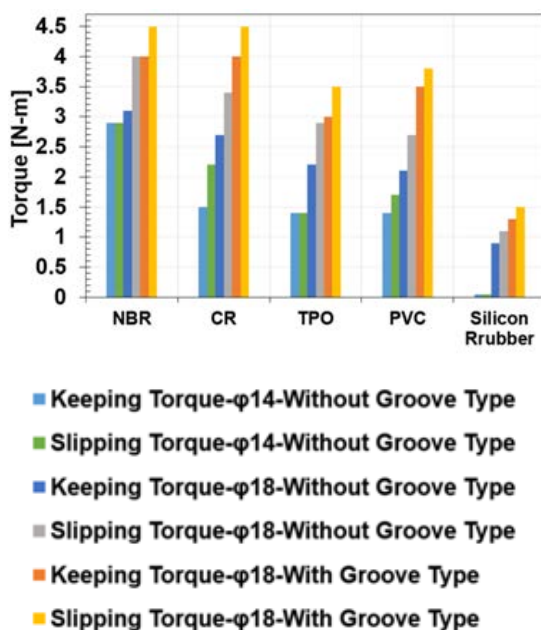


図 5 各種樹脂板による最大伝達トルクの比較

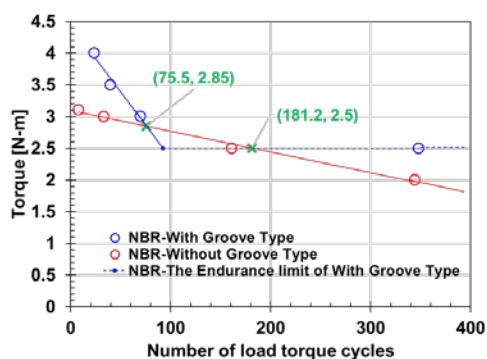


図 6 SN 曲線 (NBR)

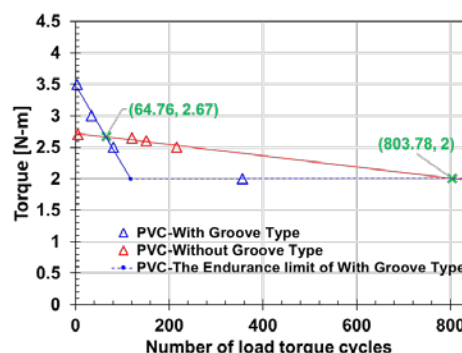


図 7 SN 曲線 (PVC)

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 1 件)

Jyun-Rong ZHUANG, Hayato NAGAYOSHI, Hirotoshi KONDO, Keiichi MURAMATSU, Keiichi WATANUKI, Eiichiro TANAKA, Development of a torque limiter for the gear of an assistive walking device, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 11(2017) No.6, Paper No.17-00376 (2017).

〔学会発表〕(計 3 件)

Jyun-Rong Zhuang, Hayato Nagayoshi, Hirotoshi Kondo, Hee-Hyol Lee, Eiichiro Tanaka, A Safe Torque Limiter Design Applied to An Assistive Walking Device against Unexpected Load, ROBOMECH2018, 2P2-F03, DVD-ROM, (2018).

J. Zhuang, H. Nagayoshi, H. Lee, E. Tanaka, Design and Development of an Overload Protection Mechanism Using Torque Limiter for walking Assistance Device, 11th International collaboration Symposium on Information, Production and Systems (ISIPS2017), Kita-Kyushu, Japan, P2E-2, (2017).

E. Tanaka, H. Nagayoshi, H. Kondo, K. Muramatsu, K. Watanuki, Development of a Walking Assistance Apparatus Including a Torque Limiter in a Gear, MPT2017, Kyoto, Japan, (2017).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: 歯車装置

発明者: 田中英一郎・永吉駿人・莊俊融・綿貫啓一・田中渉・近藤博俊

権利者: 同上

種類：特許
番号：特願 2017-156185
出願年月日：2017 年 8 月 10 日
国内外の別： 国内

名称：歯車装置
発明者：田中英一郎・綿貫啓一・田中渉・近藤博俊
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2016-158452
出願年月日：2016 年 8 月 12 日
国内外の別： 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中英一郎 (TANAKA, Eiichiro)
早稲田大学理工学術院・教授
研究者番号：10369952

(2) 研究協力者

莊俊融 (ZHUANG, Jyun-Rong)
早稲田大学理工学術院・博士課程学生