

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 - 第十報：マニピュレータ関節駆動耐久試験 -
Title(English)	
著者(和文)	遠藤玄
Authors(English)	Gen Endo
出典(和文)	第38回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2020, 10
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# 高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討

## —第十報：マニピュレータ関節駆動耐久試験—

○遠藤 玄（東京工業大学）

### 1. はじめに

1883年にニトロセルロースが合成されて以来、多くの化学繊維が合成され高い機能性を付与した素材が開発されている。中でも高い引張強度を持つ高強度化学繊維として、代表的なものを列挙すると、パラ系アラミド繊維（ケブラー）、超高分子量ポリエチレン（UHMW-PE）繊維（ダイニーマ）、ポリアリレート繊維（ベクトラン）、ポリパラフェニレンベンズオキサゾール（PBO）繊維（ザイロン）などがある。

高強度化学繊維を用いたロープはステンレススチールワイヤと同等から2倍以上の強度を持ちながら質量は1/5から1/8と軽量で、なおかつ柔軟性に優れており、ロボット研究の分野ではヒューマノイド [1][2] や多脚ロボット [3] に用いられている。しかしながら駆動系を設計する際に必要な基礎的諸特性の情報は十分ではなく、従来は研究者のノウハウに留まっていた。

そこで筆者の研究グループでは、高強度化学繊維ロープを用いた駆動系の汎用的な設計指針を確立するため、様々な基礎的検討を行ってきた。例えば、曲げによる強度低下 [4]、クリープ特性 [5]、粘弾塑性が機構の動特性に与える影響 [6]、繰返し曲げに対する耐久性 [7]、 $\gamma$ 線、紫外線に対する耐久性 [8][9] などである。

しかしながらワイヤ駆動系に対する最も基本的かつ実用的に重要な

何回まで駆動することが出来るのか？

という問いに対して筆者は未だに答えを持たない。先行研究 [7] において繰返し曲げ耐久性をすでに評価しており、ダイニーマでは14万回の繰返し曲げ後でも90%の引張強度があることを明らかにしているが、これは31.1Nの一定張力を印可し、ロープの伸びは駆動系に影響を及ぼさない装置を用いて計測したものである。純粋なロープ物性という意味では有用であるが、駆動機構が何回動作するか、という観点からはさらなる試験が必要である。なぜなら、実際のロボット機構ではほとんどの場合、外部への仕事により張力は頻繁に変動し、ロープが伸びれば駆動系の滑りや、最悪の場合プーリからロープが脱落することにより機構が破壊するからである。

筆者の知る限り、現実的に駆動可能な回数を報告した先行研究は極めて少ない。文献 [10] では、ヒューマノイドロボットが歩行する際の腰関節角度・トルクの時系列データを用いて、直径3mmのポリアリレート繊維を用いたCapstan Driveによる駆動系が、247,614回の駆動（150kmの歩行に相当）を実現したことを報告している。しかしながら、どのような角度・トルクを与えたのかは明らかにされておらず、結果の再利用性に乏しい。

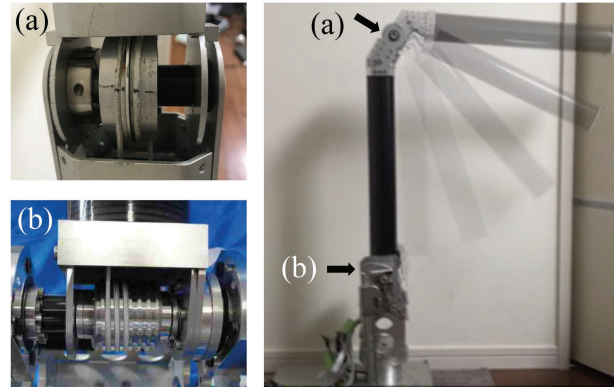


図1 実験装置と関節駆動耐久試験の様子

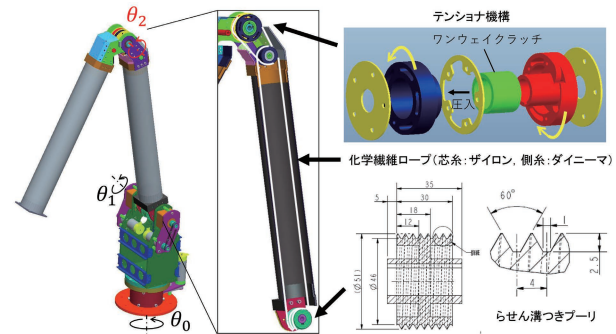


図2 化学繊維ロープによる肘関節駆動機構

本報では最も一般的なロボットであるシリアルリンク型マニピュレータの関節を、化学繊維ロープで駆動した場合について、駆動可能な回数を調査することを目的とし、実験により72.4万回の駆動を達成したことを報告する。

### 2. 実験装置

実験には圃場モニタリング用に開発された3自由度軽作業用ロボットアームを用いた（図1, 2） [11][12]。本実験では特に肘関節 $\theta_2$ に注目し、それ以外の関節は固定する。ベース部にアクチュエータ（Maxon Japan製：RE25, 118752）を設置し、その回転出力はタイミングベルトを介して波動歯車減速機（ハーモニックドライブ製：CSF-11-100-1U-F）で1/100に減速されたのち、らせん溝付きプーリ（図1（b）、素材：A2017）を駆動する。らせん溝はくさび効果によりロープとプーリの摩擦力を増加させる効果を持つ。溝形状は加工の容易さと、溝でのロープの摩擦力増加を考慮して先行研究 [13] の結果から、通常のメートルネジと同じ溝形状とした。ロープはらせん溝に2.5周巻きかけられ、中継プーリを介したのち、肘関節部のテンシヨナ機構（図1(a))内部で両端が固定されている。テンシヨナ機構内部に

は常に張力を増加させる向きにのみ相対的に回転することが出来るよう、図2中の赤・青2つのφ40mmのプーリ間にワンウェイクラッチが挿入されている。ワンウェイクラッチ外筒は青のプーリに圧入後、接着されている。ロープ端部はプーリに1周巻きかけられたのち、結びにより作った輪をプーリ内部のピンに引っ掛けることで固定している。前腕リンクを駆動する軸は赤のプーリにキー溝で固定されている。

駆動用の化学繊維ロープは芯糸をザイロン、側糸をダイニーマとしたφ2mmのロープ（ハヤミ工産製：DY-20ZL）を用いた。本機構ではロープが伸びるとらせん溝プーリに対しロープが滑ることが容易に予想されたため、伸びにくい素材を芯糸に選択した。一方、ザイロンは繰り返し曲げに弱いことが先行研究から分かっているので[7]、表面を保護するために屈曲耐久性に優れるダイニーマを側糸に選択した。破断強度は2.52kNと高くはないが、設計上の手先ペイロード0.5kg 負荷時の張力122.5N に対して安全率は20以上であり十分と判断した。

### 3. 実験条件

関節駆動の耐久性は、負荷トルクに依存することが容易に想像される。そこでまず最も負荷が小さい条件で実現できる最大の駆動回数を調べることにした。マニピュレータの典型的な動作は物体を把持し、持ち上げ搬送する作業である。これを模擬するため、自重による関節トルクが最小・最大となる姿勢を往復する動作を繰り返し実行することとした。すなわち前腕部が鉛直下向きになる姿勢から開始し、90deg 関節を回転し水平になる姿勢を経由して、再び鉛直下向きに戻る姿勢を1サイクルとした往復動作である（図1右）。前腕部の質量は3DCAD 上で0.357kg であり、この運動による自重による静的なトルク変動は0.1~0.6Nm である。周期は3sec とした。

### 4. 実験結果

#### 4.1 新規ロープを用いた耐久試験

新規ロープを用いて張力をかけ、まず予備的な駆動試験を行った。予め1000回程度の動作を行い、テンショナで張力をかけることで、初期伸びを巻き取ってから、繰り返し関節駆動を行った。その結果、試行回数が増えると徐々にワンウェイクラッチが滑り、ロープに弛みが生じ駆動できなくなることが明らかになった。このため、テンショナ機構で十分張力をかけた直後に、図2右上の赤と青で示したプーリを貫通するように側面からネジで共締めすることで固定を行った。この工夫により、長期間の継続的な駆動実験が可能となった。

次に耐久試験を行った。実験は95日間に亘り実施し、一日平均6.2時間稼働させた。ロープの伸びや縦弾性係数の変化による関節剛性の変化を測定するため、およそ5万回ごとに水平姿勢を保持したまま鉛直下向きに手先に4N, 8N を印加してそのときの手先位置変位を計測し、関節剛性を導出した。

実験の結果、本稿執筆時点において、張力調整することなく72.4万回の駆動を達成した。またこのときの関節剛性の変化を図3に示す。この結果から、測定誤差による多少の変動はあるものの、1.5万回以降はほぼ一

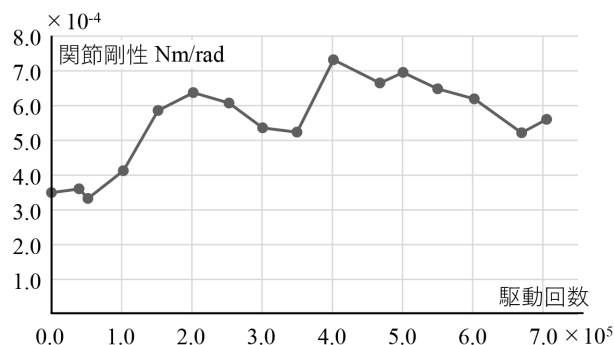


図3 関節駆動回数と関節剛性の変化

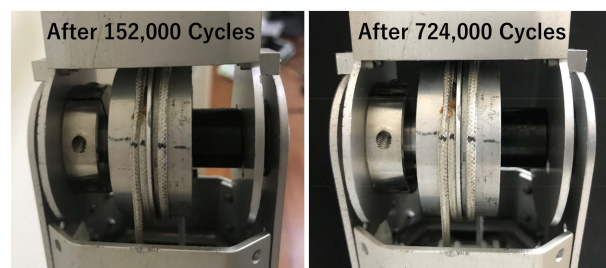


図4 テンショナ部拡大写真

定の関節剛性であり、駆動回数により剛性が特段低下していないことが分かる。またテンショナ部に実験開始時に印をつけておき、およそ5万回ごとにその印を撮影することでロープの伸びを観察した。一例として15.2万回および72.4万回駆動後のテンショナ部を図4に示す。72.4万回駆動後もロープに付した印の相対位置に変化がないことから伸びがないことが分かる。

#### 4.2 長時間経過後の耐久試験

一旦張力を張った後で、どの程度の期間、メンテナンスを行わずに機能するかは、実用的な機構を考える上で非常に重要である。実際、化学繊維ロープは時間経過とともにじわじわと伸びる、クリープ伸びを示すことが広く知られている[5]。そこで、駆動系を組み立ててロープに張力をかけた状態で、およそ4年半の間、屋内環境に放置した後、耐久試験を実施した。4年半の間には張力の調整などのメンテナンスを一切行わなかった。

前節と同様の耐久試験を30日間に亘り行い、一日平均10.8時間稼働させた。その結果、39万回(325時間)の動作が実現できたことを確かめた。(なお、39万回以降は、非駆動関節(図2 θ<sub>1</sub>)の固定が十分ではなく、アームが前傾し手先が床面に衝突してしまい、過負荷により機構が破損したため、実験を中止した。従って39万回以上の動作が実現できた可能性は高いと考えている。)この結果は、化学繊維ロープを用いた駆動系でも長期間に亘り実用的な駆動系として成立し得ることを示唆している。

### 5. まとめ

本報では化学繊維ロープを用いた関節駆動系が、どの程度の駆動回数を実現可能か実験的に調査した。その結果、72.4万回の駆動が可能であることを示した。なお、今回の実験条件では関節負荷トルクは非常に低

い値であり、これを大きくするに従い、駆動可能な回数が減少していくものと予想される。今後は実験条件を変えて駆動回数がどのように変化するのか、定量的に明らかにする予定である。

謝辞 この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務、JSPS 科研費基盤研究 C（25420214, 18K04044）の結果得られたものです。

#### 参 考 文 献

- [1] K. Kawaharazuka et al., “Human Mimetic Forearm and Hand Design with a Radioulnar Joint and Flexible Machined Spring Finger for Human Skillful Motions”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.32, No.2, pp.445-458, 2020.
- [2] Y. Kim, J. Yoon and Y. Sim, “Fluid Lubricated Dexterous Finger Mechanism for Human-Like Impact Absorbing Capability”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 3971-3978, 2019.
- [3] S. Kitano, S. Hirose, A. Horigome, G. Endo, “TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking”, *ROBOMECH Journal*, Vol. 3, No.8, DOI: 10.1186/s40648-016-0047-1, 2016.
- [4] A. Horigome, G. Endo, “Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope - investigation of strength reduction by bending and terminal fixation method”, *Advanced Robotics*, Vol. 30, Issue 3, pp.206-217, 2016.
- [5] 高田敦, 遠藤玄, 鈴森康一, 難波江裕之, “高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討—第三報：クリーブ特性試験機の製作と初期実験—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-G07, 2017.
- [6] A. Takata, G. Endo, K. Suzumori, H. Nabaе, Y. Mizutani, Y. Suzuki, “Modeling of Synthetic Fiber Ropes and Frequency Response of Long-Distance Cable-Pulley System”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 1743-1750, 2018.
- [7] A. Horigome, G. Endo, “Investigation of Repetitive Bending Durability of Synthetic Fiber Ropes”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 1779-1786, 2018.
- [8] 兼清真人, 遠藤玄, “高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 -第七報： $\gamma$  線による強度低下-”, 日本ロボット学会学術講演会, RSJ2018AC1D2-03, 2018.
- [9] 兼清真人, 遠藤玄, “高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 -第八報：紫外線による強度低下-”, 日本ロボット学会学術講演会, RSJ2019AC1G2-07, 2019.
- [10] A. Mazumdar et al., “Synthetic Fiber Capstan Drives for Highly Efficient, Torque Controlled, Robotic Applications”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 554-561, 2017.
- [11] 伊藤祐太, 深津時広, 桑原裕之, 遠藤玄, 福島 E. 文彦, “高度かつ汎用的な計測を可能とする移動型フィールドサーバの開発—軽作業用ロボットアームの開発—”, 第 14 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 2675-2676, 2013.
- [12] 深津時広, 遠藤玄, 伊藤祐太, 小林一樹, 齊藤保典, “広域・精細モニタリングのための移動作業型フィールドサーバの開発”, *農業情報研究*, 第 23 巻, 4 号, pp. 140-153, 2014.
- [13] 遠藤玄, 堀米篤史, 若林陽輝, 高田敦, “高強度化学繊維を用いたワイヤ駆動系のための基礎的検討 (溝付きプーリと二重 8 の字結びによる端部固定)”, *日本機械学会論文集*, 第 84 巻, No. 864, 18-00067, 2018.