

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11報: 受動プーリの張力伝達効率-
Title(English)	Basic study for wire driving with synthetic fiber rope -11th report: Tension transfer efficiency of passive pulley-
著者(和文)	永井敏也, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Toshiya Nagai, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2021講演論文集, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , ,
発行日 / Pub. date	2021, 6

# 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11報：受動プーリの張力伝達効率—

Basic study for wire driving with synthetic fiber rope  
-11th report: Tension transfer efficiency of passive pulley-

○学 永井 敏也 (東工大) 正 難波江 裕之 (東工大)  
正 鈴木 康一 (東工大) 正 遠藤 玄 (東工大)

Toshiya NAGAI, Tokyo Tech, nagai.t.ah@m.titech.ac.jp

Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech, nabae.h.aa@m.titech.ac.jp

Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech, suzumori.k.aa@m.titech.ac.jp

Gen ENDO, Tokyo Tech, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

We have developed a rugged terrain mobile robot equipped with an elastic telescopic arm for the purpose of improving moving performance on rugged terrain. The problem of the elastic telescopic arm is the low tension transfer efficiency of the passive pulley. In order to investigate the tension transfer efficiency, an experiment was conducted to obtain the relationship between the tension transfer efficiency and  $D/d$ , where  $D$  and  $d$  are the pulley diameter and the wire diameter, respectively. We revealed that the tension transfer efficiency rapidly decreases when  $D/d$  is less than 10. Moreover, loss of the bearing is not dominant reason for the efficiency decrease.

**Key Words:** Tension transfer efficiency, Passive pulley, Wire/Tendon driven mechanism, Rough terrain mobile robot

### 1 緒言

不整地移動ロボットは災害現場等の足場が不安定な状況下で有効であり、移動範囲の拡大のために走破性の向上が望まれる。走破性を高めるために外部環境を用いた走行方法に着目した。我々は伸縮可能な長尺なアームを車輪型の移動車体に搭載し、これを用いてロープを外部環境に固定、牽引することで走破性を向上させる方法を提案し、弾性テレスコピックアーム搭載型不整地移動ロボットを開発した [1](図 1)。現在までに、アームの伸縮、ロープの張力制御による先端位置の制御、ロープの牽引による不整地走行等の各動作の実験が行われている。

本ロボットは、高強度化学繊維ロープを牽引することで弾性テレスコピックアームに所望の曲げモーメントを生成し屈曲させるが、このロープは多くの受働プーリを経由するため張力低下を生じ、その結果、所望の屈曲が実現できない課題が試作機を用いた実験により顕在化した。化学繊維ロープは複数の受働プーリを介し、アーム先端部に固定されている。理想的には根元で計測された張力がそのままアーム先端部に伝わるのが望ましいが、実際には受働プーリを経由する際に張力の損失が生じている。根元の張力センサからテレスコピックアームの先端までは、小径のプーリが 12 個使用されている。高所作業車の設計規格 (JIS B 9690) によれば転がり軸受を 1 個使用した際の張力伝達効率は 0.98 で規定されている。12 個のプーリを使用した際の先端の張力伝達効率  $E_{12}$  は、

$$E_{12} = 0.98^{12} = 0.78 \quad (1)$$

となる。一方、先行研究で小川らが実施した根元張力と先端張力の関係を測定する実験では、張力伝達効率  $E_{12}=0.25$  程度であり、プーリ 1 個当たりの張力伝達効率は 0.89 と試算される。[2] の規格とは大きな隔たりがあり、試作したワイヤ駆動系に近い条件下で張力伝達効率を調査する必要がある。

一方、堀米らによる先行研究では、受働プーリの直径を  $D$ 、ロープ直径を  $d$  として  $D/d \approx 150$  のとき、受働プーリ 1 つの張力伝達効率は 0.997 となることを実験的に明らかにしている [3]。これに対し、弾性テレスコピックアームでは  $D/d \approx 10$  程度であり、ロープは急峻な曲げを伴っている。一般にロープの引張強度は  $D/d$  の関数であり、 $D/d$  が小さくなるほど低下することが知られているため [4]、張力伝達効率にも何らかの影響を及ぼしているものとの仮説を立てた。本論文の目的は、この仮説を検証す

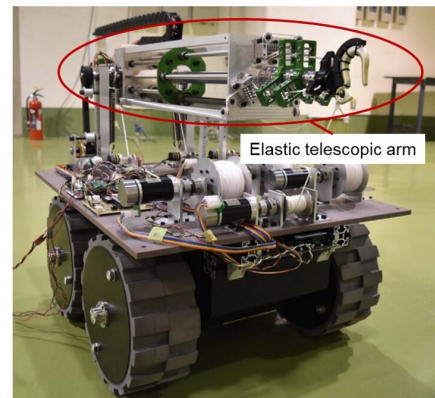


Fig.1 Rough terrain mobile robot with elastic telescopic arm

るため、急峻な曲げ、すなわち  $D/d$  の小さい領域における、 $D/d$  と張力伝達効率の関係を実験的に明らかにすることである。

### 2 張力伝達効率の計測

実験の様子を図 2 に示す。両端に質量 10 kg の重りを取り付けたワイヤをプーリに 1 周ずつ巻き付け、一端に微小な荷重を加え、重りが動き出す時の荷重  $f$  N を測定した。荷重  $f$  は重りの上に小さな重りを重ねていくことで加えた。7.7 g の小さな重りを準静的に重ねていき、重りが動き出す時までの合計の重さを荷重  $f$  とした。この時の張力伝達効率を次式で定義する。

$$E = \frac{W}{W + f} \quad (2)$$

なお、本実験にプーリには、転がり軸受が圧入されたアイドラーを使用した。プーリ径の影響を調べるため、外径 25 mm、内径 6 mm (HBGA25-11: ミスミ) と、外径 15 mm、内径 5 mm (HBGS15-16: ミスミ) を使用した。試験するロープとしては、金属ワイヤロープには、ステンレスワイヤロープ (C-200: 朝日インテック、直径 0.75mm, 1.05mm, 2.00mm, 2.50mm) を使用し、高強度化学繊維ロープには、高密度ポリエチレンロープ (DB-60: ハヤミ工業、直径 1.05mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm)、

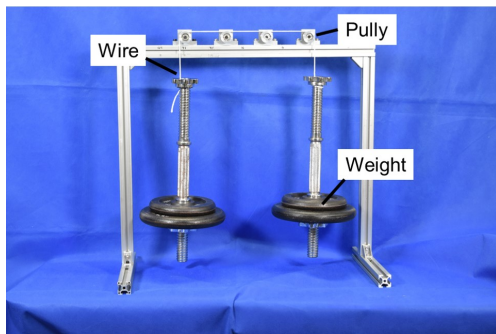


Fig.2 Experiment

PBO 繊維ロープ (ZB-308:ハヤミ工産, 直径 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm) を使用した. なお, 各ロープの型番はワイヤ径 2mm のものを記載している.

### 3 実験結果

各種ロープの測定結果を図 3, 図 4, 図 5 に示す.  $D/d$  が小さくなるにつれ, 張力伝達効率が低下している. ダイニーマ・ザイロンの 2 種の高強度化学繊維ロープに比べ, ステンレスワイヤロープは張力伝達効率が高い. これは, 荷重-伸びの関係において, 高強度化学繊維ロープに比べ, ステンレスワイヤロープは線形性が高く, 変形のヒステリシスが小さいため損失が小さくなる事が影響していると考えられる.

### 4 ベアリングの摩擦損失の解析

張力伝達効率が低下する原因として, ベアリングでの損失が考えられる. ベアリングは半径方向のラジアル荷重と軸方向のアキシャル荷重を受けている. この 2 方向の力を受けているときの摩擦損失を求め, ベアリングによる摩擦損失がどの程度張力伝達効率の低下に影響するか見積もった.

#### 4.1 ラジアル荷重によるベアリングの摩擦モーメント

ベアリングに力が加わったとき, ベアリング内部の玉は大きな接触面圧で曲率半径の異なる軌道と接触する. 玉や軌道は弾性変形をし, 接触面の中でミクロな滑りが生じる. このようにしてベアリングでは摩擦モーメントが発生する. 実験から算出された張力損失に対し, ラジアル荷重によるベアリングの摩擦モーメントの損失が占める割合を計算すると, 全損失の 5.9 % 程度である. 転がり軸受においてラジアル荷重による損失は小さいと考えられる.

#### 4.2 アキシャル荷重によるベアリング内部の滑り摩擦モーメント

ベアリングにアキシャル荷重が加わるとき, ベアリングの内部の玉は負荷軸の周りに回転しながら軌道上を転がっている. この運動のことをスピン運動と呼び, スピン運動によって滑り摩擦が生じている. プーリにロープを螺旋状に巻いているため, プーリの前後の張力差によりアキシャル荷重が発生している. 張力差  $f$  が発生しているときの滑り摩擦モーメント  $M_s$  を [5] に基づき計算すると, ベアリングの内部寸法によって決まる定数を  $\gamma$  として,

$$M_s = \gamma f^{\frac{4}{3}} = 1.29 \times 10^{-4} [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (3)$$

となる. 実験から算出された張力損失に対し, アキシャル荷重によるベアリングの摩擦モーメントの損失が占める割合を計算すると,  $8.57 \times 10^{-4}$  % 程度である. 転がり軸受においてアキシャル荷重による損失はほとんどないものと考えられる.

以上のことからベアリングでの損失は非常に小さいことがわかった.

#### 4.3 考察

ベアリングの摩擦モーメントによる損失は非常に小さく,  $D/d$  が低下すると伝達効率が急激に低下していることから, ワイヤの曲げが強く影響していると考えられる. ロープの曲げによって最大径・最小径の経路長変化が生じ, ロープ外径側のストランドが

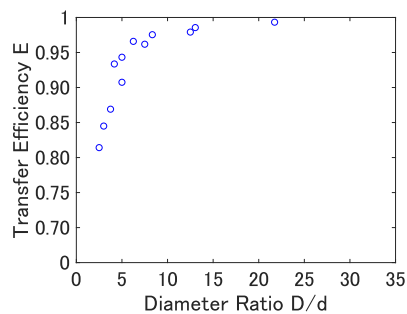


Fig.3 Relation between transfer efficiency of Dyneema and diameter ratio

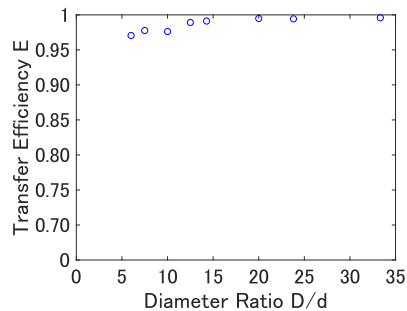


Fig.4 Relation between transfer efficiency of Stainless steel and diameter ratio

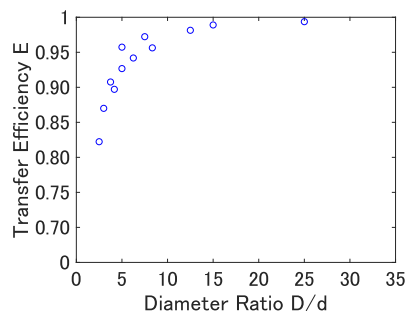


Fig.5 Relation between transfer efficiency of Zylon and diameter ratio

内径側のストランドに対して相対的に滑り, その摩擦力によって張力伝達の損失が起こるものと現時点では推察している.

### 5 結言

本論文では張力伝達に関する実験的検討を行った.  $D/d$  に対する張力伝達効率の低下率は, 化学繊維ロープにおいて  $D/d$  が 10 を下回ると急激に低下している. そのため, 化学繊維ロープを用いるような機構では,  $D/d$  が 10 以上となるようなロープ・プーリの選定が必要となる. 張力伝達を低下させる要因を解明することが今後の課題である.

### 参考文献

- [1] 小川淳司. “弾性テレスコピックアーム搭載型不整地移動ロボットの研究”. 東京工業大学, 工学院, 機械系, 機械コース, 修士論文, 2020.
- [2] “JIS B 9690, 高所作業者一設計, 計算, 安全要求事項及び試験方法”. pp. 65-66, 2013.
- [3] 堀米篤史, 山田浩也, 洗津, 広瀬茂男, 遠藤玄. “ワイヤ干渉駆動型多関節 3 次元アームの開発 (張力伝達効率, リールの最大密度配置および先端位置精度の検討)”. 日本機械学会論文集, 第 83 巻, pp. 16-27, 2017.
- [4] A. Horigome, G. Endo. “Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope - investigation of strength reduction by bending and terminal fixation method”. In *Advanced Robotics*, 第 30 巻, pp. 206-217, 2016.
- [5] 角田和雄. “玉軸受の摩擦モーメントに関する研究 (スラスト荷重の場合)”. 日本機械学会論文集, 第 27 巻, pp. 945-956, 1961.