T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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)
Title(English)	Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope (Terminal fixation method using a grooved pulley and a figure-eight knot)
著者(和文)	遠藤玄, 堀米篤史, 若林陽輝, 高田敦
Authors(English)	Gen Endo, Atsushi Horigome, Youki Wakabayashi, Atsushi Takata
出典(和文)	日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 864, pp. 18-00067
Citation(English)	Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 84, No. 864, pp. 18-00067
発行日 / Pub. date	2018, 6

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

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）

遠藤 玄 *1，堀米 篤史 *2，若林 陽輝 *3，髙田 敦 *3

Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope
(Terminal fixation method using a grooved pulley and a figure-eight knot)

Gen ENDO*1, Atsushi HORIGOME*2, Youki WAKABAYASHI*3 and Atsushi TAKATA*3

*1 , *3 School of Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan
*2 Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Received: XXXX; Revised: XXXX; Accepted: XXXX

Abstract

A synthetic fiber rope, which is lightweight and has a high tensile strength and flexibility, is receiving much attention as a replacement for a stainless steel wire rope. To exploit the maximum tensile strength of the rope, it is essential to develop a terminal fixation method with the sufficient fixing force. However, practical difficulty exists in the case of the synthetic fiber ropes because the synthetic fiber ropes have very small frictional coefficients compared with a stainless wire rope. This paper proposes a new terminal fixation method using a grooved pulley, a loop with figure-eight knot, and a pin. The grooved pulley is introduced to increase the friction between the synthetic fiber rope and the pulley by wedge effect, and the rope is wound around the grooved pulley. The end of the rope is hanged at a pin by a loop with a figure-eight knot. We experimentally derived the appropriate groove shape, and demonstrated that our method permits the maximum fixation force over 90 % of the rope breaking force. An example of implementation for a prototype model of a coupled-tendon multi-joints manipulator is also described.

Keywords : Synthetic fiber rope, Tendon-driven mechanism, Terminal fixation method, Strength efficiency

1. 緒　　言

高強度化学繊維ロープの開発は現在，目覚ましい進歩を遂げている．高強度化学繊維ロープの引張強度は，ロボット駆動系でしばしば用いられるステンレス製ワイヤロープに比して 1.5〜2 倍以上でありながら，その密度は 1/5〜1/8 と極めて軽量である．加えて，化学繊維ロープはしなやかで柔軟に曲げることが可能であることから，ロープの取り回しや端部に結び目を作るなど，ロボット組み立て時に扱いやすい特長を持つ．これらの有用な特長に着目し，腱駆動ロボット（Nakanishi et al., 2012)(Trenatanakulwong et al., 2014)(Friedl et al., 2015)(Kitano et al., 2016)，空圧人工筋肉（Mori et al., 2009）などに適用されている．筆者らも廃炉作業に用いることを想定した片持ち構造のワイヤ干渉駆動型多関節 3 次元アーム (Horigome et al., 2014)（図 1）を開発している．

ところで従来の金属製のワイヤロープについては日本工業規格において機械・建設・索道・エレベータなどの一般用 (JIS G3525:2006), 航空機用 (JIS G3535:2012)，医療器械や原子炉・運動器具など操作用 (JIS G3540:2012) な

No.18-00067 [DOI: 10.1299/transjsme.18-00067]
*1 正員，東京工業大学工学院（〒 152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-1）
*2 東京工業大学大学院理工学研究科
*3 学生員，東京工業大学工学院

E-mail of corresponding author: endo.g.aa@m.titech.ac.jp

どの規定があり，破断荷重や耐久性の試験方法が詳細に規定されている．また用途に応じて設計上の安全率も各種規格（例えばクレーン構造規格，ゴンドラ構造規格など）により明確に定められている．一方で化学繊維については原糸についての繊維物性を公開しているものの，ロープとして構成した際の特性については，多くの場合明らかではなく，ほとんどは単に引張強度のみがメーカから提供される．また実用化されている用途としてはロープ・釣り糸・漁網・レジャー用品・防護服などであり，駆動伝達系として用いられている例は一部のクレーン以外ほとんど見られない．したがってロボットに代表されるような駆動系の機構要素として化学繊維ロープが金属製ワイヤロープの代替となり得るかどうかは，様々な特性試験を行い詳細に比較検証する必要がある．

実際，筆者らの研究グループでは，固定プーリに巻きかけた際のプーリ直径 D とロープ直径 d の比率により，化学繊維ロープであっても金属製ロープと同様の強度低下が生じること（Horigome and Endo, 2016), JIS G 3535 に基づくプーリでの繰り返し曲げにより PBO 繊維は大きな強度低下を起こすこと（堀米他,2015），一定荷重下でクリープ伸びを生じること（髙田他，2017）などを定量的に明らかにしてきた．同様の研究動機から，高密度ポリエチレン繊維の伸びとその検知手法について実験的に考察した研究（Kirchhoff and Stryk, 2017) や，複数ロープの捩じりによる長さの減少を利用した Twisted String Actuator の耐久性に関する報告（Usman et al., 2017）がある．

本論文では特に化学繊維ワイヤロープの端部固定法について焦点を当てる．なぜなら，例えどんなにロープ単体での強度が高かったとしても，端部を機構部材に強固に固定することが出来なければ，結局のところ固定端で耐え得る引張強度しか利用できないからである．加えて，化学繊維ロープは金属ロープに比して，摩擦係数が 1/3〜1/5 程度と非常に低く，金属ワイヤで通常用いられている方法では十分な固定力が得られないことが十分に予想される．また金属製ワイヤロープについての端部固定法については，様々な手法が開発されており，そのおおよその強度効率（固定力／ロープ破断張力）の指針も示されている（図２）一方，化学繊維ロープに対する端部固定強度については筆者らの知る限り，今まで体系的に議論されていなかった．

このような研究動機から，筆者らは前報において (1) 金属ブロックによりクランプする方法，(2) 円柱部品に巻きかけクランプする方法，(3) 結び目により輪を作りピンに掛ける方法，(4) メーカによる特殊加工（縫い，カシメ）による方法などを定量的に比較した．しかしながら，特殊加工に依らず簡便に実現可能な (1)〜(3) による固定方法では，最大でも強度効率は 83.7 %に留まっていた．

本論文では，さらに高い 90 %以上の固定力を実現する，溝付きプーリにロープを巻きかけることによる端部固定法を新たに提案し，最適な溝形状を実験的に検討する．まず始めに直径 2 mm で芯糸が PBO 繊維，側糸が高密度ポリエチレン繊維で構成されたロープを用いて溝形状を実験的に最適化する．次にロープ構成・素材，ロープ径を変えた場合について，汎用性があるか，実験的に検証する．

簡便な端部固定法の固定力が定量的に明らかになれば，従来開発者個々のノウハウのレベルに留まっていた化学繊維ロープの端部固定法に対し，汎用的な設計指針を新たに提示することが可能となり，これこそが本論文の目的である．

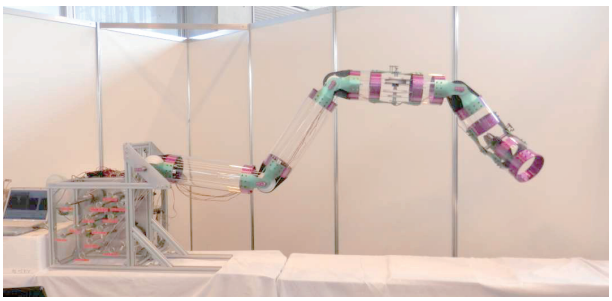


Fig. 1　Coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator.

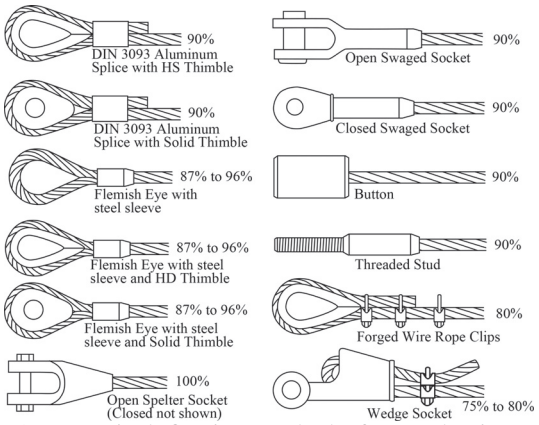


Fig. 2　Terminal fixation methods for steel wire ropes (modified based on data from (Unirope LTD, 2018).)

2. 従来の端部固定法

本節では前報までに検討した従来の端部固定法の強度効率について簡単にまとめる．

ロープ端部の固定力を計測する装置を図 3 に示す．引張荷重試験機に治具を取りつけ，上端の治具に様々な固定法でロープを固定し，ロープ下端はロープ直径に比して十分大きな固定プーリに巻き付けて固定する．上端の治具を 300 mm/min の一定速度で引き上げ，固定部分が破壊するまで引張力を印可したときのロープ最大張力を計測した．試験した端部固定法を図 4 に示す．赤枠は金属製ワイヤの端部固定で良く用いられるブロック材によるクランプである．長さの異なる 2 つのブロックを試験した．紫枠は，筆者らが提案した固定法で，円柱部品にロープを巻き付けた後でネジにより固定する方法で，後述するオイラーのベルトの摩擦を利用することができる．一方で円柱の直径が小さい場合，巻きかけ始めの部分で曲げによる強度低下により破断する可能性がある．橙枠は結びにより輪を作り，これを ϕ6 または ϕ10 のピンに引っ掛ける方法である．結び方としては，もやい結び，変形もやい結び，二重継ぎ，二重 8 の字結びの 4 種類を試験した．最後に緑枠はロープメーカに依頼して行う特殊な端末加工である，縫製とカシメである．縫製の長さやカシメの個数を変化させて計測を行った．直径 2 mm の 3 種類のロープに対して試験を行った．高密度ポリエチレン繊維のみのロープ Dyneema1, 芯糸が PBO 繊維（ザイロン），側糸が高密度ポリエチレン繊維（ダイニーマ）で構成される Zylon3, 比較対象のステンレスワイヤ ϕ2 である．ロープの詳細仕様は後述する．各実験条件で 3 回の実験を行い，その平均値を用いて強度効率（固定力/ロープ破断張力）を求めた．

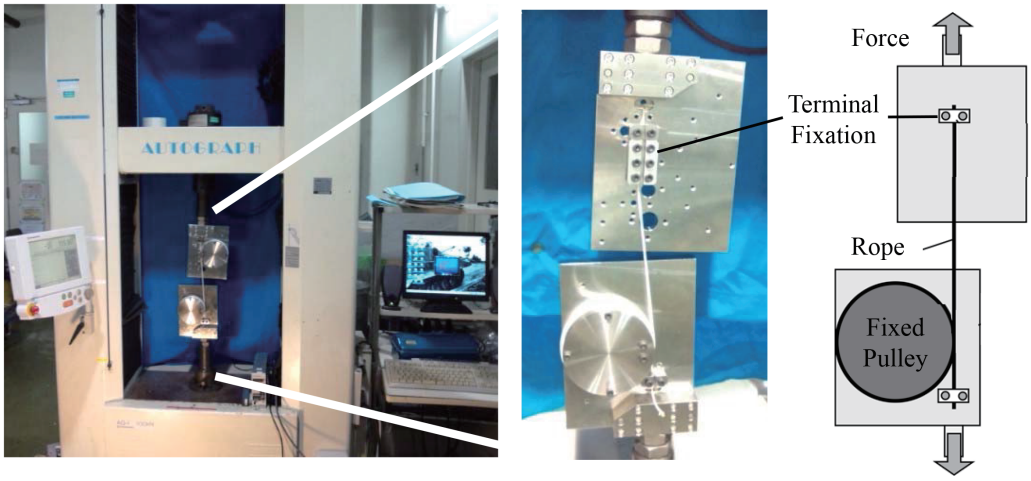


Fig. 3　Experimental setup: (left) tensile testing device (SHIMADZU: AG-I, maximum force: 100kN), (middle) rope arrangement using jigs, (right) schematic figure of the rope arrangement.

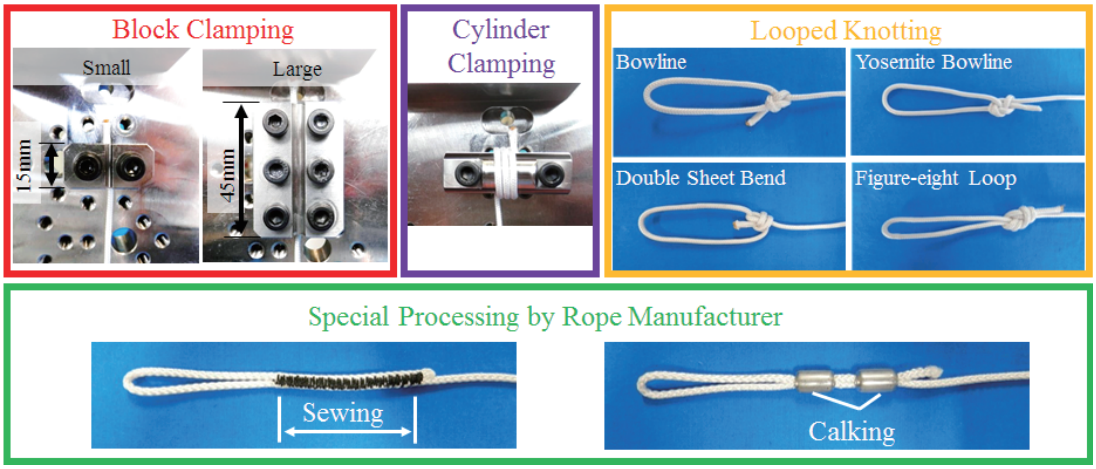


Fig. 4　Terminal fixation methods tested in the previous work.

Table 1　Strength efficiencies of various end fixations (Horigome and Endo, 2016).

		Dyneema1	Zylon3	Stainless3
Diameter	[mm]	2	2	2
Tensile strength	[kN]	2.14	2.99	3.50
Clamping (small)	[%]	28.3	18.6	80.0
Clamping (small)*	[%]	42.9	37.3	-
Clamping (large)	[%]	65.0	72.3	90.2
Clamping (cylinder)	[%]	58.9	83.7	-
Bowline	[%]	47.1	36.6	63.1
Yosemite bowline	[%]	51.2	45.9	-
Double sheet bend	[%]	50.5	46.5	-
Figure-eight loop	[%]	50.9	53.2	73.6
Calking (1)	[%]	58.9	23.9	-
Calking (2)	[%]	89.6	47.8	-
Calking (3)	[%]	83.1	79.2	-
Sewing (10 mm)	[%]	48.8	34.1	-
Sewing (25 mm)	[%]	85.4	73.5	-
Sewing (40 mm)	[%]	81.3	90.8	-

*Making knot at the end of clamping to prevent slipping.

■ : Slipping　□ : Rope breaking

結果を表 1 に示す．Stainless3 では従来のブロック材によるクランプでも 80-90 %の強度効率が得られているのに対し，化学繊維ロープでは 18.6 %-72.3 %と低くなっている．円柱クランプについては Zylon3 に対しては 83.7 %と高い値を示したが，Dyneema1 では 58.9 %であり，有効でないことが分かった．結びについては，その強度効率は 36.6 %-53.2 %程度の値であり，破断に至る場所は結び方に依らず急峻な曲げを伴う結び目であった．また結び方としては二重 8 の字結びが最も性能が良いことが分かった．特殊加工である縫製あるいはカシメについては，十分な加工長ささえ確保できれば最高でおよそ 90 %強度効率となり，表 1 で試験した中では最もよい固定方法であることが分かる．しかしながら，このような特殊加工処理は，加工をする際にロープ全長を決めなければならないという問題がある．一般に製作後の化学繊維ロープは金属製ワイヤロープに比して大きな初期伸びを持つことから，全長を予め指定しなければならないことは，腱駆動ロボットのような複雑なワイヤ駆動経路をもつロボットの場合，実用上大きな問題となってしまう．さらに化学繊維ロープは一定荷重下で徐々に伸びを生じるクリープ特性が知られており，端部固定法としては全長が調節できることが望ましい．

以上から，従来の端部固定法を化学繊維ロープに適用する場合，下記のようにまとめられる．

- 単純なブロックによるクランプでは十分な固定力が得られない．
- 二重 8 の字結びにより輪を作る簡便な方法で最大 53.2 %の強度効率が得られる．
- 特殊加工は最も高い強度効率が得られるが，ロープ長が固定となる問題がある．

より詳細な考察については文献（Horigome and Endo, 2016）を参照されたい．

3. 溝付きプーリとピンを用いた端部固定法の提案

前節で述べたように，ロープ全長が調節可能で，かつ，強度効率が 90 %以上を実現できる化学繊維ロープの固定法は未だ明らかになっていない．より高い強度効率を実現するために，本節では溝付きプーリとピンを用いた新たな端部固定法を提案する（図 5）．二重 8 の字結びによる固定ではおよそ 50 %の強度効率が得られることが分かっていることから，もしこの固定端に至るまでに，張力を 100 %から 50 %以下に減衰させることができればよい．張力を減衰させるためには，船のもやいによる係留と同様に，固定プーリにロープを巻き付け，ベルトの摩擦を利用する方法が考えられる．しかしながら化学繊維ロープは金属製ロープに比して摩擦係数が著しく小さいことから，単なる平プーリでは十分な摩擦力を得られず，適切ではない．そこで，楔効果により摩擦係数を疑似

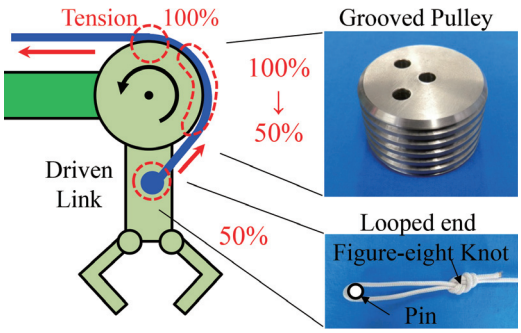


Fig. 5 Schematic image of the proposed fixation method.

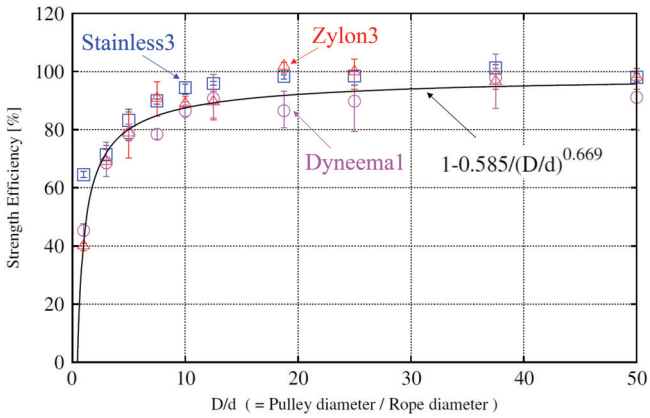


Fig. 6 Relationship between D/d and strength efficiency, and its empirical equation (Horigome and Endo, 2016).

的に増大することのできる，螺旋溝付きプーリを利用することを提案する．

本手法は 2 つの利点がある．第 1 の利点は，ロープ全長を容易に変更可能であることである．端部は二重 8 の字結びにより調節可能であることから，特殊な加工や道具を必要とせずに全長を変えることができる．第 2 の利点は，溝付きプーリにより固定部分をコンパクトに，また巻き付けるロープ全長も短くすることが可能である．通常の平プーリを使うのであれば摩擦力を稼ぐために多くの巻き付け回数が必要となり，その結果，プーリの厚みも増大することになる．巻き数の増大はロープ全長の増大を意味し，結果的に伸び量が多くなり，適切な張力を継続的に張り続けることが難しくなってしまう．また伸び量が多くなればなるほど，弛みによりプーリからロープが脱落する危険性も増すことになる．溝付きプーリを用いることでこれらの問題を解決できる．

4. 溝付きプーリの設計

本論文の目的は，小型でロープ長を容易に調節可能な強度効率 90 %以上の固定方法を開発することである．対象とするロープは Zylon3，直径はロボット駆動機構でしばしば用いられる 2 mm とする．ここでは目標の固定力を得るための溝付きプーリの直径と溝形状について詳細に検討する．

4·1 溝付きプーリの直径

溝付きプーリの直径は小さければ小さいほど小型の端部固定が可能となる．しかしながら，急峻な曲げをロープに与えると，ロープ内の径方向への応力分布が不均一となり，破断しやすくなることが一般的に知られていることから，直径の大きさと固定強度の間にはトレードオフの関係がある．

筆者らの先行研究（Horigome and Endo, 2016）では，化学繊維ロープの静的な曲げによる強度低下について固定プーリの直径をパラメータとして実験的に調べ，次式の実験式を得た (図 6)．

$$\eta_b \approx 1 - \frac{0.59}{\sqrt[3]{(D/d)^2}} \tag{1}$$

ここで，η_b は曲げによる強度効率，D は固定プーリ直径，d はロープ直径である．D =37.5 mm, d =2.0 mm とすると，$\eta_b = 0.916 > 0.9$ となることから，D =37.5 mm と定めた．（同様に結びの輪を引っ掛けるピンの直径も $\eta_b = 0.71 > 0.5$ となるように 6 mm と定めた．）

4·2 溝形状

4·2·1 静力学解析

溝付きプーリより得られる摩擦力を解析的に導出するため，オイラーのベルトの定理（Euler, 1762）の概要を述べる．図 7 左は固定プーリに巻きかけられたロープを表している．同図右はロープの微小要素 $\Delta\theta$ に働く力を考える．張力 T が左端に負荷されているとき，右端の張力はロープとプーリの摩擦力 F_{fr} によって，$T + \Delta T$ へと変化

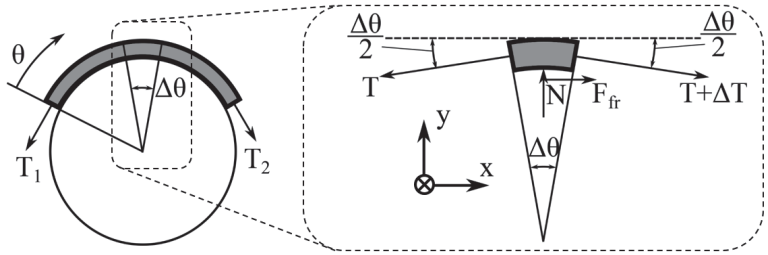


Fig. 7 Analytical model of the rope wrapped around a fixed pulley.

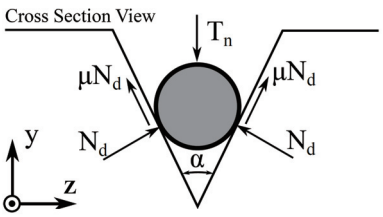


Fig. 8 Equilibrium of forces in the groove

する．（ここで $T \geq 0$，$\Delta T \leq 0$ とする．）プーリからの垂直抗力を N とするとき，x 方向，y 方向の各々の力のつり合いから，次式を得る．

$$F_{fr} + (T + \Delta T)\cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) - T\cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = 0 \tag{2}$$

$$N - (T + \Delta T)\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) - T\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = 0 \tag{3}$$

ここで $\Delta\theta, \Delta T$ を $d\theta, dT$ と書き換え，$\cos\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{2}\right) \approx 1$，$\sin\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{2}\right) \approx \frac{\mathrm{d}\theta}{2}$ と近似することにより次式を得る．

$$F_{fr} + \mathrm{d}T = 0 \tag{4}$$

$$N - (2T + \mathrm{d}T)\frac{\mathrm{d}\theta}{2} = 0 \tag{5}$$

二次の微小量を無視することにより次式を得る．

$$F_{fr} = -\mathrm{d}T \tag{6}$$

$$N = T\mathrm{d}\theta \tag{7}$$

ここでクーロン摩擦を仮定し，μ を最大静止摩擦係数とすると

$$-\mathrm{d}T = F_{fr} \leq \mu N = \mu T \mathrm{d}\theta. \tag{8}$$

上式両辺を T で割り両辺を積分することで次式を得る．

$$-\int_{T_1}^{T_2} \frac{\mathrm{d}T}{T} \leq \int_0^{\theta_w} \mu \mathrm{d}\theta \tag{9}$$

$$\frac{T_1}{T_2} \leq \exp(\mu\theta_w) \tag{10}$$

ここで T_1, T_2 はロープ両端に働く張力，θ_w は巻き付け角である．最大静止摩擦力がロープと固定プーリの間に働くとき，ロープ端部を原点とした巻き付け角を θ，原点での初期張力を $T_1 = T_0$ とすると，ロープ張力 T は角度 θ の関数として下式で表される．

$$T = T_0 \exp(-\mu\theta). \tag{11}$$

ロープ張力 T は，プーリへの巻き付け角度 θ と摩擦係数 μ のみに依存して減衰し，ロープやプーリの直径には依存しないことが分かる．

次に，溝付きプーリの場合のロープ張力 T と摩擦力 F_{fr} の関係を考察する．図 8 は溝にロープが食い込んでいるときの断面図を表しており，そこに働く力が示されている．このとき α は溝の角度，T_n はプーリ中心向きに働く力，N_d は溝壁面から得られる垂直抗力，μN_d はロープが溝底へ動かないように支える摩擦抗力である．前述の式 (2)-(11) の導出は，平プーリに対する議論であるので，α=180 度の場合であるとみなすことができる．z 方向への力のつり合いは左右対称であることから自明なので，y 方向のみについて考えると次式の関係が得られる．

$$2N_d \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 2\mu N_d \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - T_n = 0 \tag{12}$$

ここで式 (7) を用いると，$T_n = T\mathrm{d}\theta$ であることから，

$$N_d = \frac{T_n}{2\left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)+\mu\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} = \frac{T\mathrm{d}\theta}{2\left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)+\mu\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}, \tag{13}$$

が得られる．摩擦力 F_{fr} は溝面への垂直抗力 N_d に比例する．したがって式 (6) を用いると

$$-\mathrm{d}T = F_{fr} \le \mu(2N_d) = \frac{\mu T\mathrm{d}\theta}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)+\mu\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \tag{14}$$

上式を式 (8) と比較することで等価摩擦係数 μ' を

$$\mu' = \frac{\mu}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)+\mu\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \tag{15}$$

のように定義することができ，張力 T も式 (11) と同様に

$$T = T_0\exp(-\mu'\theta). \tag{16}$$

として得られる．まとめると，溝付きプーリのロープ張力は，オイラーのベルトの定理より得られる式に対して，摩擦係数 μ を等価摩擦係数 $\mu' = \mu/\left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)+\mu\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$ で置き換えたものと等しいことが分かる．

4·2·2　溝付きプーリの試作

前節の静力学解析では，クーロン摩擦と剛体の静力学を仮定しており，等価摩擦係数 μ' は溝角度 α のみに依存する．しかしながら，化学繊維ロープは柔らかく変形する材料で構成されているため，図 9 左に示すように溝形状に倣って大変形することが予想され，前述の仮定が成立しないことが予想される．

したがって最適な溝形状を実験的に導出することとした．図 9 右に示すように，設計パラメータとして溝角度 α と，溝底径 ϕ を変化させ，等価摩擦係数 μ' を最大化し，なおかつ応力集中による破断張力の低下を生じにくい最適な溝形状を実験により明らかにする．溝付きプーリの直径 D は 37.5 mm とし，材料は SUS304 とした．9 種類の溝形状 ($\alpha = 30, 45, 60$ 度の 3 種と $\phi = 0.5, 1.0, 1.5$ mm の 3 種の組み合わせ)（図 10）に対し各 3 回ずつ引張試験を行い，固定力を求める．

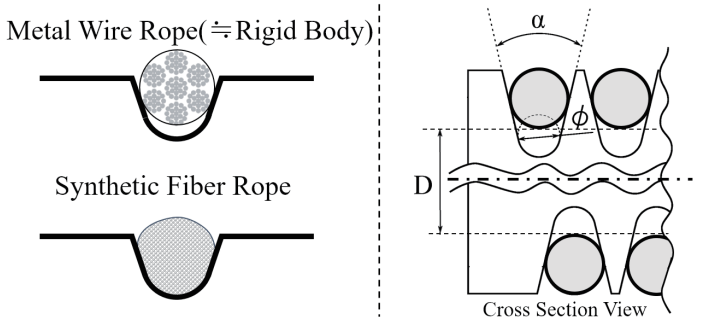


Fig. 9　Rope deformation (left) and design parameters of the grooved pulley (right).

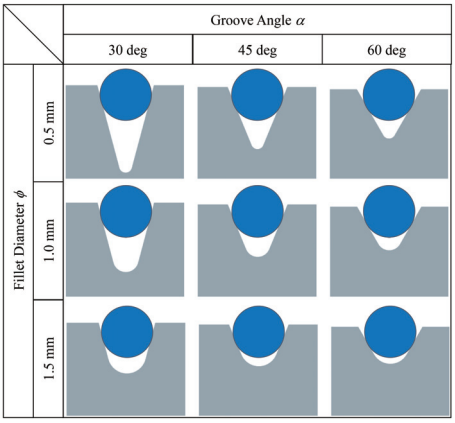


Fig. 10　Groove shape tested.

5.　実　　験

5·1　試験ロープ

表 2 に強度効率計測に用いたロープの詳細仕様を示す．（なお Dyneema1 については表 1 の参照のために記載し，強度効率計測は行っていない．）理想的にはすべてのロープを用いて 9 種類の溝に対して強度効率を計測するべきであるが，組み合わせの数が大きく，実験が困難である．よってまず始めに Zylon3 を用いて最適な溝形状を導出し，その形状が他の素材のロープについても有効であるか確かめることとする．Zylon3 を選定した理由は，本ロー

Table 2　Ropes used in terminal fixation force measurements. All ropes had diameters of 2 mm.

Name	Model	Supplier	Tensile strength [kN] Measured	Estimated	%	Weight [g/m]	Core fiber Fiber	Core fiber Structure	Sleeve fiber Fiber	Sleeve fiber Structure	Cost[*1] [USD/m]
Dyneema1	DB-60	Hayami industry	2.14	3.94	54	1.7	Dyneema® SK-60 UHPE	1760 dtex × 8 strand braid			0.81
Dyneema2	DB-96HSL	Hayami industry	4.68	7.81	59	2.4	Dyneema® SK-71 UHPE	2640 dtex × 8 strand braid			1.62
Zylon2	ZB-308	Hayami industry	6.40	9.89	64	2.9	Zylon® AS PBO	3340 dtex × 8 strand braid			1.80
Zylon3	DY-20ZL	Hayami industry	3.22	3.71	86	2.7	Zylon® AS PBO	10020 dtex	Dyneema ® SK-60 UHPE	770dtex × 16 strand braid	2.25
Vectran2	VB-308	Hayami industry	4.19	6.41	65	2.9	Vectran® HT Polyarylate	3340 dtex × 8 strand braid			1.08
Stainless3	C-200	Asahi intec	3.50	-		16	SUS304	7×19			1.61

UHPE: ultra high molecular weight polyethylene, PBO: poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole).

[*1] When each 200 m length of rope was purchased, 1 USD equaled 111JPY.

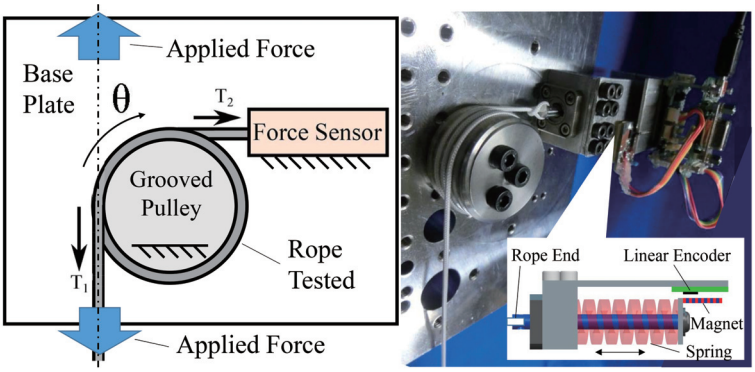


Fig. 11　Tension measurement device.

プが最も固定が困難であると予想されるからである． なぜなら Zylon3 は摩擦係数の低い Dyneema で側糸が構成されており，なおかつ，芯糸には化学繊維中もっとも引張強度の高い PBO 繊維がわずかな撚りのみでほぼ直線的に配置され，側糸に対して芯糸は容易に滑る構造をしていることから，低摩擦かつ高強度の特性となっているためである．他の 3 種のロープは同一の構成である 8 打である．（化学繊維原糸の物性については付録を参照されたい．）従来の金属製ワイヤロープの代表として Stainless3 を測定し，結果を Zylon3 と比較する．

5·2　張力計測装置

等価摩擦係数 μ' を計測するために，図 7 中の張力 T_1 および T_2 を計測する必要がある．T_1 は引張試験機により計測し，T_2 は治具上に取りつけた直動力センサにより計測した（図 11）．ロープ端部は図中青で示されたロッドに取り付けられ，張力が付加されると図中赤で示した圧縮バネが縮み，この変位を分解能 0.015 mm のリニア磁気エンコーダ（AS5306, ams) によって計測する．計測可能な最大値は圧縮バネを変更することで調節する．

5·3　結果

Zylon3 と Stainless3 について強度効率を測定した．引張試験機の上部治具に溝付きプーリを，下部治具にロープ直径に比して 50 倍と十分に大きな ϕ100 mm の平プーリを各々設置した．ロープ上端部を溝付きプーリに巻きかけた角度は，Zylon3，Stainless3 で各々 1350 度，270 度である．もう一方のロープ下端部は，十分な固定力が生じるまで平プーリに複数回巻きかけた．ロープを一定速度で上方に引張ったときのロープ張力 T_1 および T_2 の時系列変化を記録し，破断するまで計測を行った．各実験条件で 3 回の計測を行い，平均値により強度効率を求めた．実験条件を表 3 に示す．

実験結果を表 4，5 に示す．Zylon3 の場合では，ほぼすべての溝付きプーリで 85 %以上の強度効率が得られ，最大値は α=30 deg, ϕ=1.5 mm のとき，91.3 %であった．（以降，この溝形状を最適溝と呼ぶことにする．）また，

Table 3　Experiment condition.

Temperatures	18.5 – 20.0°C
Humidity	28 – 46 %
Tension speed	300 mm/min.
Sampling period of tension	After winding (T_2): 0.015 s Before winding (T_1): 0.01 s

Table 4　The average strength efficiencies at each groove angle α and each groove fillet diameter ϕ with Zylon3. [%]

		ϕ [mm]		
		0.5	1.0	1.5
α [deg]	30	81.4	86.0	**91.3**
	45	89.8	84.2	89.7
	60	89.6	89.3	88.3

Table 5　The average strength efficiency at each groove angle α and each groove bottom diameter ϕ with Stainless3. [%]

		ϕ [mm]		
		0.5	1.0	1.5
α [deg]	30	97.5	97.5	97.5
	45	98.5	97.5	98.5
	60	98.5	97.5	98.5

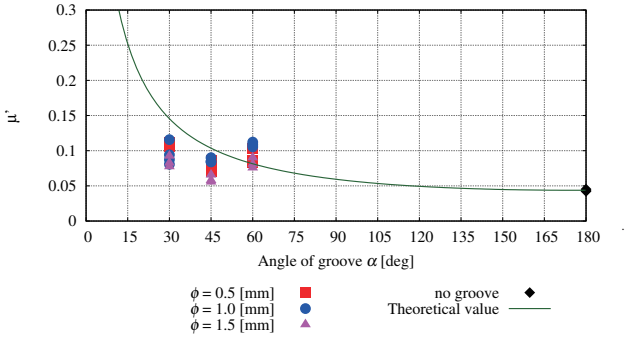


Fig. 12　Relationship between the groove angle and the equivalent frictional coefficient with Zylon3.

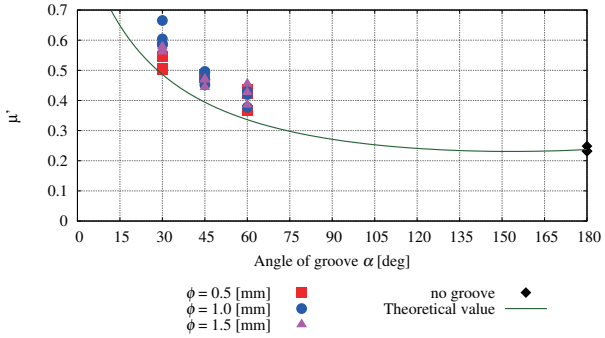


Fig. 13　Relationship between the groove angle and the equivalent frictional coefficient with Stainless1.

α=60 deg, ϕ=0.5 mm のときもほぼ 90 %近い強度効率を達成していることは工業的に利用価値が高い．なぜなら，この溝形状は通常のメートルネジの溝形状とほぼ同じであることから，溝付きプーリを低コストに作成可能であるからである．最大効率である 91.3 %は 4.1 節で議論した静的曲げによる強度効率の低下 η_b=0.916 とほぼ同じ値であることから，最適な溝形状を選べば，溝での応力集中による強度低下を回避できることが示唆される．また，当初の予想通り，強度効率は溝底径 ϕ に依存することが明らかとなり，化学繊維ロープが溝形状に依存して大変形していると推察される．これに対し，Stainless3 では ϕ に依存せずにほぼ一定値を示しており，このような大変形は生じていないものと考えられる．

図 12，13 は溝角度と等価摩擦係数 μ' の関係を Zylon3, Stainless3 それぞれについて表したものである．α=180 deg は平プーリで得られる値であり，同条件で各 3 回の計測を行いプロットしている．Stainless3 の場合，実験的に得られた μ' は α が小さくなるにつれ上昇し，この傾向は理論値の傾向と比較的よく一致する．μ' は最大 0.67 程度と大きな値となっている．これに対し，Zylon3 の μ' は α を小さくしたとしてもほぼ一定で，最大値も Stainless3 のおよそ 1/6 である 0.12 程度に留まっている．この理由を考察する．本論文で提案する溝付きプーリは，ロープを溝に押し付けることにより，溝壁面に対する垂直抗力 N_d が増加する効果を期待して導入している．この効果は図 8 に示すように，ロープ断面を完全な円とし，溝・ロープとも剛体として仮定した場合に得られ，等価摩擦係数 μ' は α, μ のみの式 (15) で表される．しかしながら実際には前述のように化学繊維ロープの強度効率は溝底径 ϕ にも依存することから，化学繊維ロープが大変形を起こし，溝底の一部に接触しているものと推察される．このため，ロープと溝底面の接触面積が増えることになり，垂直抗力 N_d が理論値のようには上昇しないため，結果として等価摩擦係数が増加しなかったのではないかと考えている．

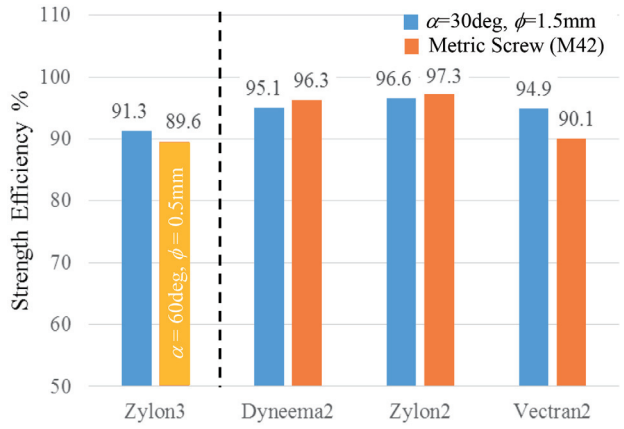


Fig. 14 Strength efficiencies of various material ropes where test pulley grooves are optimum (α=30deg, ϕ=1.5mm) and metric screw (M42).

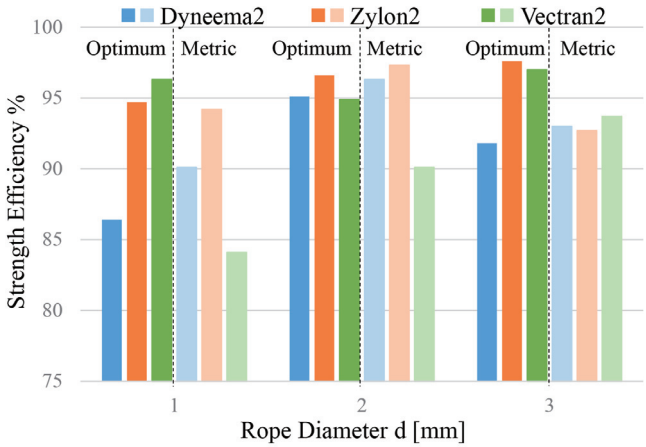


Fig. 15 Strength efficiencies of various rope diameters using metric screws.

強度効率を最大化する溝形状での μ' の平均値を求めると，その値は 0.0842 であり，これは平プーリの場合に比しておよそ 2 倍の摩擦係数である．この値から張力を 91.3 %から 53.2 %，すなわち二重 8 の字結びで許容される張力（表 1）に減ずるためには θ=368 deg の巻きかけ角度が必要であることが算出できる．

次に実験的に得られた最適な溝形状が他の化学繊維ロープについても適用可能であるのか，高密度ポリエチレン繊維（Dyneema2），PBO 繊維（Zylon2），ポリアリレート繊維（Vectran2）を用いて強度効率を測定した．これら 3 種のロープは 8 打によって編まれており，芯糸と側糸が分かれていない一様な構成であることから，構造張力を支える繊維束が直接プーリと接触することになる．各条件で 3 回の測定を行い，その平均値を図 14 青棒に示す．いずれも Zylon3 以上の 94.9～96.6 %の高い強度効率を確認した．したがって最適溝形状のとき，実験した化学繊維ロープの種類に依らず 90 %以上の高い強度効率を実現できることが明らかになった．

さらに，メートルネジを用いて同様に強度効率を計測したところ，図 14 橙棒の結果を得た．ここで用いたメートルネジは，巻き付け後の直径が D=37.5mm にほぼ等しくなる M42 を選択した．実験の結果から，最適溝形状とほぼ同等の強度効率を通常のメートルネジの溝形状でも実現できることが明らかになった．

Table 6 Experimental results of strength efficiency with various rope materials and diameters.

Rope	Pulley	Strength	Rope Diamter d [mm]		
			1	2	3
Dyneema2		Tensile Strength[kN]	1.44	4.68	9.07
	Optimum Groove	Fixing Strength[kN]	1.24	4.45	8.32
		Strength Efficiency[%]	86.4	95.1	91.8
	Metric Screw	Fixing Strength[kN]	1.29	4.51	8.43
		Strength Efficiency[%]	90.1	96.3	93.0
Zylon2		Tensile Strength[kN]	1.95	6.40	13.13
	Optimum Groove	Fixing Strength[kN]	1.85	6.18	12.81
		Strength Efficiency[%]	94.7	96.6	97.6
	Metric Screw	Fixing Strength[kN]	1.84	6.22	12.18
		Strength Efficiency[%]	94.2	97.3	92.7
Vectran2		Tensile Strength[kN]	1.55	4.19	8.65
	Optimum Groove	Fixing Strength[kN]	1.49	3.98	8.39
		Strength Efficiency[%]	96.3	94.9	97.0
	Metric Screw	Fixing Strength[kN]	1.30	3.78	8.11
		Strength Efficiency[%]	84.1	90.1	93.7

最後に，ロープ直径が異なる場合について汎用的に適用可能であるか，検証した．ロープ直径に合わせて，最適溝形状ならびに直径を相似変換した溝付きプーリを製作し同様の試験を行った．対象とするロープ直径は d=1 mm, 3 mm である．また前述の結果から，メートルネジも最適溝とほぼ同等の強度効率であることが分かったので，それぞれ対応するメートルネジの呼び径 M18, M60 を用いて実験した．

前述の d= 2mm の測定値と合わせて結果を図 15 および表 6 に示す．図 15 中，青色は Dyneema2, 橙色は Zylon2, 緑色は Vectran2 を表している．また最適溝プーリを濃く，メートルネジを薄く表している．d=1 mm の最適溝での Dyneema2 およびメートルネジの Vectran2 のみ 90 %を下回ったが，他はすべて 90%以上の強度効率が確認できた．したがって提案した溝プーリによる固定法は異なる直径のロープおよび高密度ポリエチレン繊維, PBO 繊維, ポリアリレート繊維に対しても汎用的に適用可能であることが示された．

6. ロボットへの適用例

本節では提案する端部固定法をワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータに適用した事例を紹介する．超長尺冗長多関節マニピュレータは福島第一原子力発電所の廃炉措置での活躍が期待されている．格納容器内部に手先を到達させるためには 9 m 以上の全長が必要であるのに対し，進入口の直径は 0.3 m 以下で可能な限り小さいことが望ましい．

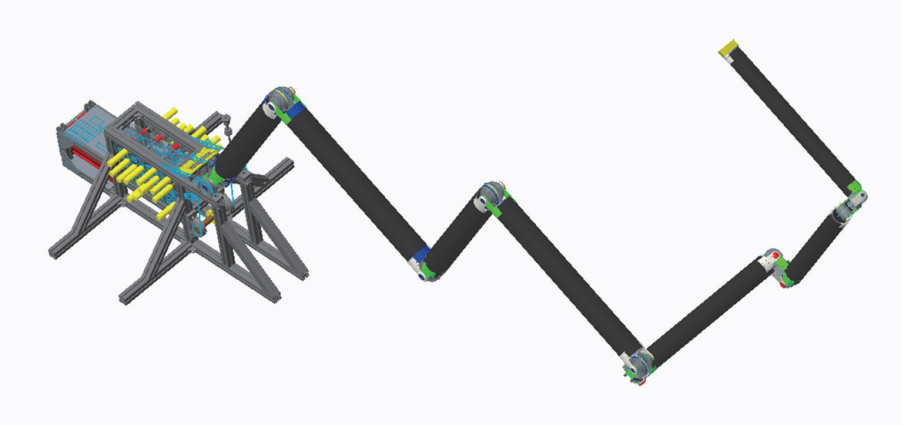


Fig. 16　Prototype model of a coupled-tendon multi-joints manipulator “Super Dragon”

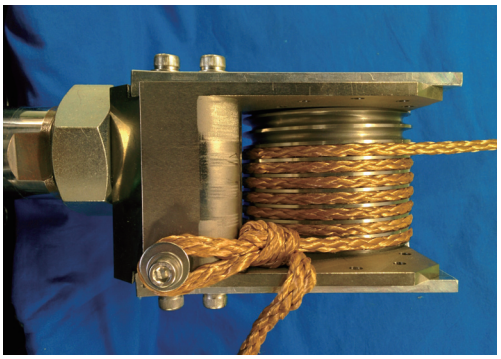


Fig. 17　Terminal fixation for the gravity compensation tendon

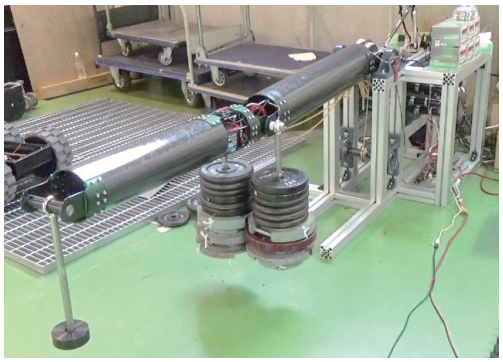


Fig. 18　Experiment with heavy load of 142.4kg applied to two units prototype model.

この著しく困難な設計要件に対し，筆者らはワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータを提案している（Horigome et al., 2014）（堀米，2017）．図 16 に全長 10 m の試作機の 3 次元 CAD 図を示す．すべてのアクチュエータは基部に設置されており，各関節は ϕ1.5 mm の高密度ポリエチレン繊維ロープによる拮抗駆動により駆動される．さらに根元部に働く膨大な自重トルクを支えるため，ϕ5.5 mm の大径の PBO 繊維ロープを自重補償のためにアーム中央に通している．この自重補償用ロープを最大牽引力 30.2 kN を発生可能なエアシリンダ（10A-2FB200B300, Taiyo）により牽引することで，自重補償トルクを生成する．（自重補償と関節駆動の二種類の異なる目的のロープを導入することに対する有用性については，文献を参照されたい（Horigome et al., 2016）．この自重補償用ロープの最大牽引力を固定できる端部を設計する．

図 17 は自重補償用ロープの端部固定法を示している．溝形状は前節で実験的に得られた最適な値を，ロープ径に応じて相似拡大したものを用いている．自重補償用ロープの破断強度は ϕ 2mm の Zylon2 の実測強度から，半径の二乗に比例すると仮定すると 46.1 kN であり，これはエアシリンダ発生力に対し 1.5 の安全率となっている．溝付きプーリの直径を 87 mm と設計するとおよそ 89 %の強度効率が得られ，41.0 kN まで固定できると見積もることができる．Zylon2 を対象とした等価摩擦係数は計測していないが，仮に Dyneema3 と同じ値 μ'=0.0842 を用いると，溝付きプーリへ巻き付けるべき角度は 460 deg と算出できる．図 17 では 1800 deg である 5 回の巻き付けであるため，十分である．

原理検証のために試作した 2 節モデルに重荷重を負荷することで，端部固定法の有用性を確認する．実験の様子を図 18 に示す．２節モデルは全長 2 m であり，自重補償用プーリの半径は 48 mm である．実験は先端部に 1.64 kg の重りを負荷し，アーム長中央の 1 m の位置に徐々に重りを負荷することで根元関節に対してトルクを作用させた．その結果最大 142.4 kg の重りを負荷することができた．このとき，根元関節に働くトルクは 1.46 kNm であり，自重補償用ロープに働く張力はエアシリンダの最大発生力 30.2 kN とほぼ同じであった．

以上の実験から提案する手法により，所望の固定力を達成する固定機構が設計可能であることを明らかにした．

7. 結　　言

本論文では，ロープ長が調節可能な小型かつ強度効率の高い化学繊維ロープの端部固定法を提案した．提案方法は，溝付きプーリと，二重８の字結びによるループをピンに掛ける方法を組み合わせたものである．溝付きプーリは摩擦係数の低い化学繊維ロープの摩擦力を楔効果によって増大するものであり，その最適な形状を実験的に導出した．実験結果は静力学解析の結果と比較し，化学繊維ロープでは大変形によりオイラーのベルトの定理と異なる傾向が得られることを示した．提案する固定法において，3 種類の化学繊維ロープに対して 90 %以上の強度効率が得られることを明らかにした．さらにメートルネジの溝を用いても，最適溝に比肩する強度効率を実現できることを明らかにした．そして，相似な溝付きプーリを用いることで異なるロープ径に対しても適用可能な汎用性を有することを実験により明らかにした．最後に，提案手法のロボット駆動系への適用例を示した．

本論文では提案する溝形状の有効性は直径 1〜3 mm のロープでのみ確認している．また各実験条件において 3 回の実験のみ行っており，試験数が十分であるとは言いがたい．今後の課題としてより大きな直径のロープに対しても適用可能かどうか調査するとともに，N 数を増やすことにより統計的に確からしい解析をする必要があると考えている．さらに溝内で化学繊維ロープが大変形する効果についても，有限要素解析などを通じて明らかにする必要があると考えている．

謝　　辞

本研究の実施にあたり，引張試験機を使用させていただいた，東京工業大学工学院轟・水谷研究室に感謝申し上げます．本論文の成果は，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）の委託業務の結果得られたものです．また成果の一部は，科研費基盤研究 (C）25420214 によるものです．

文　　献

Euler, L., Remarque sur l’effet du frottement dans l’équilibre, in Memoires de l’academie des sciences de Berlin (1762), pp.265–278.

Friedl, W., Chalon, M., Reinecke, J. and Grebenstein, M., FRCEF: the new friction reduced and coupling enhanced finger for the Awiwi hand, Proceedings of the 15th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2015), pp.140–147.

Horigome, A., Yamada, H., Endo, G., Sen, S., Hirose, S. and Fukushima, E.F., Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.5915-5920.

Horigome, A. and Endo, G., 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 (2016), pp.206–217.

Horigome, A., Endo, G., Suzumori, K. and Nabae, H., Design of a Weight-compensated and Coupled Tendon-driven Articulated Long-reach Manipulator, Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2016), pp. 598–603.

堀米 篤史, 遠藤玄, 鈴森康一, 高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 第二報：繰り返し曲げが引張強度に与える影響, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会（2015），2A1-Q08.

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，Vol.83，No.848（2017），DOI:10.1299/transjsme.16-00270.

Kirchhoff, J. and Stryk, O. V., New insights in synthetic fiber rope elongation and its detection for ultra lightweight tendon driven series elastic robots, Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (2017), pp. 64–69.

Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A. and Endo, G., TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking, ROBOMECH Journal, Vol. 3, No.8 (2016), DOI: 10.1186/s40648-016-0047-1.

黒木忠雄，矢吹和之，PBO 繊維” ザイロン” の基礎物性と用途展開, 繊維と工業, Vol. 54, No.1 (1998), pp.16–20.

Mori, M., Suzumori, K., Seita, S., Takahashi, M., Hosoda, T. and Kusumoto, K., Development of very high force hydraulic McKibben artificial muscle and its application to shape-adaptable power hand, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2009), pp. 1457–1462.

Nakanishi, Y., Asano, Y., Kozuki, T., Mizoguchi, H., Motegi, Y., Osada, M., Shirai, T., Urata, J., Okada, K. and Inaba, M., Design concept of detail musculoskeletal humanoid “Kenshiro” - toward a real human body musculoskeletal simulator, Proceedings of the 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2012), pp. 1–6.

大田康雄, 高強度ポリエチレン繊維「ダイニーマ」，繊維と工業, Vol.66, No.3 (2010), pp.91–97.

髙田敦, 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：クリープ特性試験機の製作と初期実験—, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会（2017），1P2-G07.

Treratanakulwong, T., Kaminaga, H. and Nakamura, Y., Low-friction tendon-driven robot hand with carpal tunnel mechanism in the palm by optimal 3D allocation of pulleys, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.6739–6744.

Usman, M., Seong, H., Suthar, B., Gaponov, I. and Ryu, J.H., A study on life cycle of twisted string actuators: preliminary results, Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2017), pp.4680–4685.

Unirope LTD, Efficiency ratings of end terminations (2018), available from <http://unirope.com/efficiency-ratings-end-terminations> (accessed on 1 June, 2018).

山本洋一, 高強力ポリアリレート繊維ベクトランの特性と用途，繊維製品消費科学, Vol.47, No.9 (2006), pp.520–523.

References

Euler, L., Remarque sur l’effet du frottement dans l’équilibre, in Memoires de l’academie des sciences de Berlin (1762), pp.265–278.

Friedl, W., Chalon, M., Reinecke, J. and Grebenstein, M., FRCEF: the new friction reduced and coupling enhanced finger for the Awiwi hand, Proceedings of the 15th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2015), pp.140–147.

Horigome, A., Yamada, H., Endo, G., Sen, S., Hirose, S. and Fukushima, E.F., Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.5915-5920.

Horigome, A. and Endo, G., 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 (2016), pp.206–217.

Horigome, A., Endo, G., Suzumori, K. and Nabae, H., Design of a Weight-compensated and Coupled Tendon-driven Articulated Long-reach Manipulator, Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2016), pp. 598–603.

Horigome, A., Endo, G. and Suzumori, K., Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope -Second report: Influence of repetitive bending on tensile strength-, Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics（2015），2A1-Q08 (in Japanese).

Horigome, A., Yamada, H., Sen, S. and Endo, G., Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator (Investigation of tension transfer efficiency, optimal reel arrangement and tip positioning accuracy), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.83，No.848（2017），DOI:10.1299/transjsme.16-00270.

Kirchhoff, J. and Stryk, O. V., New insights in synthetic fiber rope elongation and its detection for ultra lightweight tendon driven series elastic robots, Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (2017), pp. 64–69.

Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A. and Endo, G., TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking, ROBOMECH Journal, Vol. 3, No.8 (2016), DOI: 10.1186/s40648-016-0047-1.

Kuroki, T. and Yabuki, K., Physical properties and application of PBO fiber ”Zylon“, Sen'i To Kogyo, Vol. 54, No.1 (1998), pp.16—20 (in Japanese).

Mori, M., Suzumori, K., Seita, S., Takahashi, M., Hosoda, T. and Kusumoto, K., Development of very high force hydraulic McKibben artificial muscle and its application to shape-adaptable power hand, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2009), pp. 1457–1462.

Nakanishi, Y., Asano, Y., Kozuki, T., Mizoguchi, H., Motegi, Y., Osada, M., Shirai, T., Urata, J., Okada, K. and Inaba, M., Design concept of detail musculoskeletal humanoid “Kenshiro” - toward a real human body musculoskeletal simulator, Proceedings of the 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2012), pp. 1–6.

Ohta, Y., Ultra high strength polyehtylene fiber “Dyneema”, Sen'i To Kogyo, Vol.66, No.3 (2010), pp.91—97 (in Japanese).

Takata, A., Endo, G., Suzumori, K. and Nabae, H., Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope -third report: creep testing machine and preliminary experiments-, Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics （2017），1P2-G07 (in Japanese).

Treratanakulwong, T., Kaminaga, H. and Nakamura, Y., Low-friction tendon-driven robot hand with carpal tunnel mechanism in the palm by optimal 3D allocation of pulleys, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.6739–6744.

Usman, M., Seong, H., Suthar, B., Gaponov, I. and Ryu, J.H., A study on life cycle of twisted string actuators: preliminary results, Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2017), pp.4680–4685.

Unirope LTD, Efficiency ratings of end terminations (2018), available from <http://unirope.com/efficiency-ratings-end-terminations> (accessed on 1 June, 2018).

Yamamoto, Y., Properties and application of ultra high strength polyarylate fiber “Vectran”, Journal of The Japan Research Association for Textile End-Uses, Vol.47, No.9 (2006), pp.520—523 (in Japanese).

付　　録

化学繊維原糸の物性を表 7 に示す.

Table 7　Physical properties of synthetic fibers(Ohta, 2010)(Kuroki, 1998)(Yamamoto, 2006).

Fiber name	Material	Strength [cN/dtex]	Young's modulus [cN/dtex]	Elongation [%]	Density [g/cm^3]
Dyneema® SK-60	UHPE	28	900	4.0	0.97
Dyneema® SK-71	UHPE	37	1150	3.7	0.97
Zylon® AS	PBO	37	1150	3.5	1.54
Vectran® HT	Polyarylate	24	530	4.0	1.41

UHPE:ultra high molecular weight polyethylene, PBO: poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole).