T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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12 報：非円形プーリによる小型端部固定法の提案―
Title(English)	Basic study for wire driving with synthetic fiber rope -12th report: Proposal of a small terminal fixation method using a non-circular pulley-
著者(和文)	定近晋也, 難波江裕之, 遠藤玄
Authors(English)	Shinya Sadachika, Hiroyuki Nabae, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, , , 1A1-I10
Citation(English)	, , , 1A1-I10
発行日 / Pub. date	2023, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

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 12 報：非円形プーリによる小型端部固定法の提案―

Basic study for wire driving with synthetic fiber rope
-12th report: Proposal of a small terminal fixation method using a non-circular pulley-

○学　定近晋也 (東工大)　正　難波江裕之（東工大）　正　遠藤玄（東工大）

Shinya SADACHIKA, Tokyo Institute of Technology, sadachika.s.aa@m.titech.ac.jp
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology

Synthetic fiber ropes are used in many robots because of their lightweight and high tensile strength. However, the evaluation of the ropes is needed because physical information on them is not enough. In particular, the coefficient of friction of synthetic fiber ropes is low, resulting in the difficulty of terminal fixation under high tension. This study focuses on the terminal fixation method of the rope using a fixed pulley. From Euler's belt theory and the relationship between D/d and tensile strength, the shape of the pulley that is equal to tensile strength is calculated as a non-circular curve. Based on this curve, we propose the terminal fixation method using a non-circular pulley that enables the area of a fixed pulley to be reduced.

***Key Words*:** Synthetic fiber rope, Tendon-driven mechanism, Terminal fixation method, Mechanical design

1　緒言

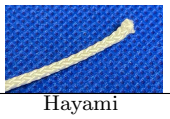
化学繊維ロープは金属製ロープに比べ軽量かつ高い可とう性をもつことから多くの分野で利用されている．化学繊維ロープの 1 つである超高分子量ポリエチレン（UHPE）繊維ロープやポリパラフェニレンベンズオキサゾール（PBO）繊維ロープの密度は金属製ロープの 1/8〜1/5 となっている他，曲げやすいことから扱いが容易である．また，金属製ロープを上回る破断強度を有するロープも開発されており，パラレルワイヤロボットや腱駆動ロボット，Twisted String Actuator などに利用されてきた．

一方で，化学繊維ロープをロボットに適用するにあたり，これらの物理的特性に関する情報は少ない．金属製ロープを用いた設計では，その特性が日本産業規格（JIS）や国際標準化機構（ISO）によって規定されている．しかし，化学繊維ロープでは原糸に関する情報が提供されているものの，ロープとして提供された物性値は大抵の場合，破断強度に限られる．これを踏まえ，包括的な化学繊維ロープ利用のための物理的評価が必要と言える．

本研究では特に化学繊維ロープの端部固定法について焦点を当てる．化学繊維ロープの摩擦係数は金属製ロープに比べ非常に低く，金属製ロープで使用される端部固定手法をそのまま適用することは困難である．これに対し，堀米ら [1] はクランプによる固定手法や結びによって輪を作りピンに引っ掛ける固定手法，縫製・カシメの特殊加工による固定手法において，これらの有効性を破断強度の観点から検証した．しかし，これらの固定手法を用いた場合，元の破断強度に対して 90 % 以下の破断強度を示し，高強度下での使用には適さないという課題がある．また，筆者らの先行研究 [2][3] では径 100 mm の平プーリや径 37.5 mm の溝付きプーリを用いた手法を提案し，元の破断強度に対して 90 % 以上の破断強度を実現した．しかし，前者では固定プーリの面積が大きく，後者では溝ごとにロープを巻きかける構造であるため，固定部が軸方向に長いという課題がある．

そこで，本研究ではオイラーのベルト理論および D/d と破断強度の関係を用いて固定プーリを用いた小型な端部固定法を提案する．オイラーのベルト理論は固定プーリ上におけるロープの巻きかけ角の増加によって張力低下を示す．しかし，プーリ径 D とロープ径 d の比 D/d が小さい場合では曲げに伴う強度低下が生じることが知られている [1]．これを踏まえ，D/d を考慮した固定プーリ上のロープ張力がすべて破断荷重に等しい形状を算出し，その形状をもつ固定プーリを用いた端部固定法を提案する．

Table 1 Specification of Dyneema rope [1]

Model	DB-60 
Supplier	Hayami Industry
Winding number n	4
Strength efficiency E_B [%]	50.9
Tensile strength T_r [kN]	2.14
Diameter d [mm]	2

2　D/d と破断強度の関係を考慮した固定プーリ径

ロープを固定プーリに巻きかけた場合，オイラーのベルト理論よりプーリ前後の張力は巻きかけ角に対して指数関数で減少する．本理論を用いると，固定プーリの巻きかけ角 θ に対し固定プーリ上のロープ張力 $T(\theta)$ は

$$T(\theta) = T_0 \exp(-\mu\theta) \tag{1}$$

で表される．ただし，T_0 は巻きかけ開始地点におけるロープ張力，μ はロープと固定プーリ間の摩擦係数を表す．

一方，堀米ら [1] により固定プーリの径 D とロープ径 d の比である D/d の減少に伴い，破断荷重が低下することが検証されている．ダイニーマロープにおける D/d と強度効率 (曲げた場合の破断荷重/元のロープ破断荷重)E_B の関係は実験に基づく近似式として

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

と表される．

以上より，式 (1) の巻きかけによる張力減衰が式 (2) の D/d に伴う破断荷重と常に一致するように

$$T(\theta) = E_B T_r = T_r \left(1 - \frac{0.59}{\sqrt[3]{(D/d)^2}}\right) \tag{3}$$

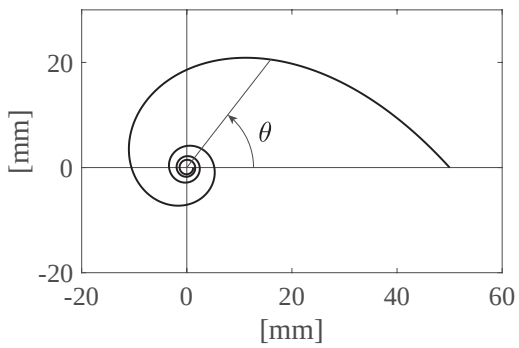


Fig.1 The curve that meet Euler's belt theory and the relationship between D/d and tensile strength.

を満たす $D(\theta)$ を固定プーリの径として定めると，$D(\theta)$ は

$$D(\theta) = d\left(\frac{0.59}{1 - T_0 \exp(-\mu\theta)/T_r}\right)^{3/2} \tag{4}$$

で与えられる．ただし，T_r はロープの元の破断荷重を表す．

3　設計

$D = 100$ mm の円形プーリに対し，提案する本手法を適用する．表 1 に示すダイニーマロープを用いた破断試験時の各パラメータから摩擦係数 μ は二重 8 の字結びによる端部固定をした場合における固定プーリへの巻きかけ数 n および，二重 8 の字結びによる端部固定における破断効率 E[1] から

$$\mu = -\frac{\log E}{2\pi n} \tag{5}$$

と算出できる．また，十分に小さい巻きかけ角 θ を $\theta = \varepsilon$ を用いると，破断時においてロープが固定プーリとの接触を開始する地点での張力 $T(\varepsilon)$ は $D/d = 50$ から式 (2) を用いて

$$T(\varepsilon) = T_r\left(1 - \frac{0.59}{\sqrt[3]{50^2}}\right) \tag{6}$$

と求められる．以上より，式 (5)(6) を式 (4) に代入すると，固定プーリ上のロープ張力がすべて破断荷重に等しい曲線として

$$D(\theta) = d\left(\frac{0.59}{1 - T(\varepsilon) \exp(-\mu\theta)/T_r}\right)^{3/2} \tag{7}$$

が得られ，図 1 のように図示できる．

本プーリ設計のために図 1 に対し，固定可能な形状を考える．図 1 に示される固定プーリでは y 軸上方向に進入するロープに対し，$\theta = 0$ 付近にて固定プーリとの接触に伴い急激なロープの曲げが発生する．そのため，局所的な D/d の減少により本箇所でロープが破断する恐れがある．そこで，$\theta = 0$ における螺旋の接線とロープの進入方向が一致するように螺旋全体を回転させる．これにより，接触開始地点でロープの破断が発生しない形状として図 2 が得られる．本形状は従来の径 100 mm の固定プーリに対し約 1/4 の面積であり，固定プーリを用いた端部固定の小型化を実現できる．

図 3 に設計した固定プーリの 3 次元 CAD 図を示す．本固定プーリは外側部と内側部の 2 つの部品から構成される．外側部は図 2 に基づいた螺旋形状であり，内側は径 15 mm の円柱形状である．なお，円柱形状は図 2 においてロープの 3/4 周以降に必要なプーリ径が小さいことから簡略化し，D/d の影響で破断を生じない十分な大きさの径をもつ形状とした．そのため，ロープは外側部に沿って巻きかけたのち，必要な巻きかけ角を満たすよう内側部に沿って巻きかける必要がある．

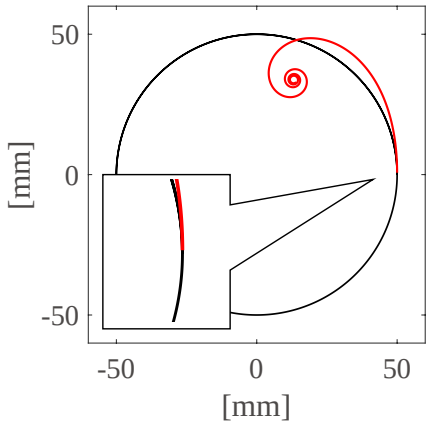


Fig.2 The comparison of pulleys between original one and proposed one. Red line shows the shape of proposed fixed pulley based on Fig.1. Black line shows the shape of original $D = 100$ mm pulley.

Fig.3 The designed pulley such that breaking does not occur on the pulley.

4　結言

本研究ではオイラーのベルト理論および D/d と破断強度の関係を用いて固定プーリ上のロープ張力がすべて破断強度に等しい曲線を算出した．その上で，曲線に基づく螺旋形状を有する固定プーリを用いた端部固定手法を設計・提案した．今後は設計した固定プーリにおいてロープの引張試験を行い，その有効性を検証する．

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H03668 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Atsushi Horigome and Gen Endo. Basic study for drive mechanism with synthetic fiber rope – investigation of strength reduction by bending and terminal fixation method. Advanced Robotics, 30(3):206-217, 2016.

[2] 遠藤玄，洗津，広瀬茂男．高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 第一報: 端部クランプ固定・曲げ比率が引張強度に与える影響．日本ロボット学会学術講演会，2012，4B3-2.

[3] 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，84(864):18-0067，2018.