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)	高強度化学繊維ロープを用いたワイヤ駆動系の基礎と実ロボットへの応用
Title(English)	Basics of Wire-driven Mechanism using Synthetic Fiber Ropes and Their Application to Robots
著者(和文)	遠藤玄
Authors(English)	Gen Endo
出典(和文)	日本機械学会2022年度年次大会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 9

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

高強度化学繊維ロープを用いたワイヤ駆動系の基礎と実ロボットへの応用

Basics of Wire-driven Mechanism using Synthetic Fiber Ropes and Their Application to Robots

○正　遠藤 玄[*1]
Gen ENDO[*1]
[*1] 東京工業大学　Tokyo Institute of Technology

In recent years, high-strength synthetic fiber ropes development has remarkably progressed. One of the ropes achieves two times higher tensile strength than a conventional stainless steel wire, while its weight is 1/5. Suppose we can utilize these synthetic fiber ropes as a wire-driven mechanism. In that case, it is possible to develop a high-performance robot mechanism that can not be achieved with conventional driving mechanisms. This paper introduces the basics of the wire-driven mechanism using synthetic fiber ropes and their application to robots developed by our research group.

Key Words : Wire-driven Mechanism, Tendon-driven Mechanism, Synthetic Fiber Rope, Mechanical Design, Robot

1. 緒　言

ひも状の可撓体を用いて動力を伝達する機構であるワイヤ駆動機構（Wire-driven Mechanism）は，(1)軽量安価な機構構成，(2)アクチュエータ配置の設計自由度が高い，(3)極めて大きな変位を生成できる，(4)増速／減速機になり得る，(5)複数の部材を同時に駆動できる，などの特長がある．これらは例えばクレーン，エレベータ，ロープウェイなどの産業用機械を思い浮かべれば，容易に理解できよう．また生物の多くは筋肉の収縮により腱を引張り，関節を拮抗駆動しており，これらに着想を得た駆動機構は，腱駆動機構（Tendon-driven Mechanism）とも呼ばれ，ワイヤ駆動機構の一部と考えられる．

従来は，ロボットの駆動系に用いることのできるひも状の可撓体といえばステンレス鋼に代表される金属製のワイヤロープしか選択肢がなかったが，近年，高強度化学合成繊維を撚り合わせ，製紐した非金属性ロープの強度は著しく向上し，現在では直径 2.0mm で 720kgf もの引張強度を有するロープも開発されている．これは同径のステンレス鋼ワイヤロープの引張強度 360kgf の 2 倍である一方，質量はわずか 1/5 程度である．もしこの高強度化学繊維ロープをロボットの駆動系として活用することが出来れば，従来機構ではなし得なかった高い性能の駆動系を実現できる可能性がある．

筆者らの研究グループでは，2012 年より高強度化学繊維ロープを用いたロボット駆動系の研究開発に着手した．本稿では現在までに明らかとなった高強度化学繊維ロープの基礎的諸特性と，これを用いたロボットの概要を紹介する．

2. 基礎的諸特性

金属製ロープを高強度化学繊維ロープにそのまま単純に置き替えるだけでは，その特長を十分に活かすことが出来ず，むしろ多くの場合，性能が低下する結果となる．なぜなら高強度化学繊維ロープは，引張強度は高いものの，長期間の荷重負荷によりじわじわと伸展するクリープ伸びや，摩擦係数が低いことに起因する端部固定の困難さなど，特有の好ましくない性質があるためである．加えて，金属製ワイヤロープに関しては，機械工学便覧やメーカのカタログ，各種法令にその設計指針がまとめられているが，高強度化学繊維ロープについては基礎資料そのものが著しく不足していた．

そこで筆者らの研究グループでは，ロボットの駆動系として用いる際の設計指針となる基礎的諸特性の計測試験を実施した．対象としたロープ原糸（英略称，商品名）は，高密度ポリエチレン（HMPE, ダイニーマ・イザナ

ス)，PBO（PBO, ザイロン)，ポリアリレート（PAR, ベクトラン)，パラ系アラミド（P-Aramid, ケブラー・テクノーラ）であり，直径 2mm の 8 つ打ちロープを試料とした．これらに対し，繰り返し曲げ[1]，繰り返し捩じり[2]，紫外線[3]，γ線[4]，それぞれに対して引張強度を評価基準として耐久性を明らかにした．また伸びに関しては，衝撃荷重[5]，クリープ伸び[6]の試験を行っている．結果の概要を表 1 に示す．さらに高強度化学繊維ロープの伸びを生じる粘弾塑性は，四要素モデルで近似できることを明らかにするとともに，10m 以上の長軸間距離のワイヤ駆動系で周波数応答を計測した結果から，ステンレス鋼ワイヤロープと実用的に遜色ない制御が実現できることを明らかにした[7]．

Table 1　Summary of characteristics of synthetic fiber ropes

Characteristic	HMPE	PBO	PAR	P-Aramid
Tensile Strength	7.2 kN (Heat set)	6.5 kN	4.2 kN	4.1 kN
Repetitive Bending	◎	△	△	○
UV Resistance	○	△	△	◎
Radiation Resistance	△	◎	◎	◎
Impact Loading	△	○	○	◎
Creep Elongation	△	◎	◎	○

3.　高強度化学繊維ロープを用いたロボット

図 1 左は福島第一原子力発電所の格納容器内調査に用いることを想定した全長 10m，全 10 自由度，手先ペイロード 10kg の超長尺多関節アーム Super Dragon である[8]．全質量は 300kg であり，アーム部分は 50kg である．アクチュエータはすべて基部に搭載されており，ワイヤ干渉駆動機構により関節を屈曲させることで，アームそのものの著しい軽量化と高い耐放射線性を実現している．

図 1 右は四脚歩行ロボット TITAN-E1 である[9]．1 脚 3 自由度のうち，腰関節・膝関節の 2 自由度の駆動を高強度化学繊維ロープにより駆動している．歩行時に生じる衝撃荷重を高強度化学繊維ロープが吸収するとともに，過負荷時にはロープが破断することにより，アクチュエータや減速機などの高コストな駆動系を守ることができる．1996 年に開発され国内の研究機関で研究用プラットフォームとして用いられた TITAN-VIII[10] とほぼ同等の大きさでありながら，出力重量比で 4 倍の性能向上を実現している．

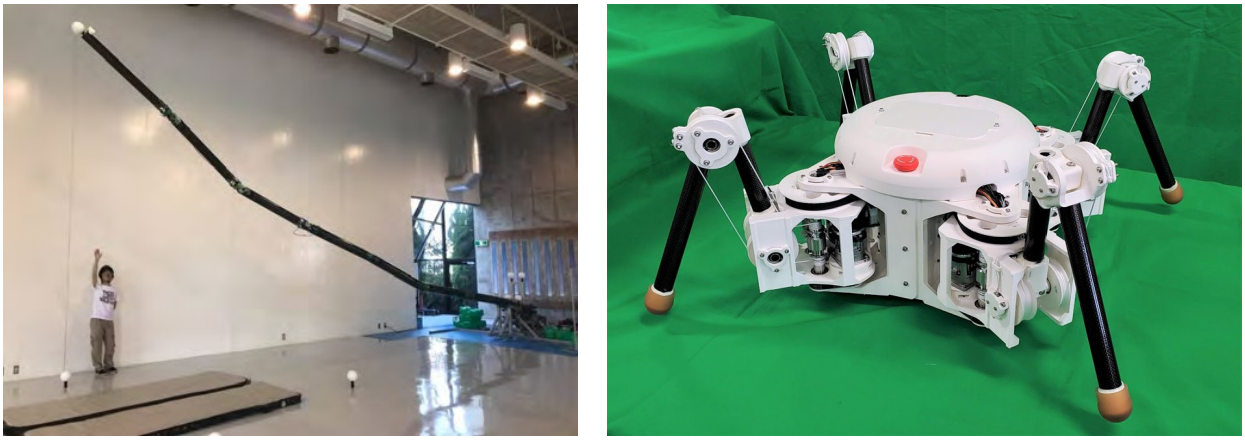

図 1　高強度化学繊維ロープを用いたロボット（左：ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム Super Dragon，右：四脚歩行ロボット TITAN-E1）

4.　結　言

本報では高強度化学繊維ロープをロボット駆動系として用いることの有用性とその基礎的諸特性について，筆者らの研究グループの取り組みを紹介した．また高強度化学繊維ロープを駆動系として用いたロボットの概要を紹介した．

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(18K04044)，および JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA19P 19210348 により得られたものです．

文　　献

(1) Horigome, A., Endo, G., “Investigation of Repetitive Bending Durability of Synthetic Fiber Ropes, ” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, (2018), pp.1779-1786.

(2) 中村吉秀, 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―第五報: 繰り返しねじり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, (2017), 1P2-G09.

(3) 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-”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会, (2019), RSJ2019AC1G2-07.

(4) 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：γ 線による強度低下-”, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, (2018), RSJ2018AC1D2-03.

(5) V. Sry, V., Mizutani, Y., Endo, G., Suzuki, Y., Todoroki, A., “Consecutive Impact Loading and Preloading Effect on Stiffness of Woven Synthetic-Fiber Rope, ” *Journal of Textile Science and Technology*, Vol. 3, Issue 1, (2017), pp. 1-16.

(6) 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.

(7) Takata, A., Endo, G., Suzumori, K., Nabae, H., Mizutani, Y., Suzuki, Y., “Modeling of Synthetic Fiber Ropes and Frequency Response of Long-Distance Cable-Pulley System, ” *IEEE Robotics and Automation Letters,* Vol. 3, No. 3, (2018), pp.1743-1750.

(8) 遠藤玄，髙田敦，堀米篤史, “ワイヤ干渉駆動型超長尺多関節アーム Super Dragon の開発”，日本機械学会論文集, 85 巻，第 875 号, (2019), p.19-00075.

(9) 角田柊平, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄, “熱溶融積層方式による樹脂構造材を用いた四足歩行ロボット TITAN-E1 の開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2022), 2A1-Q07.

(10) Arikawa K., Hirose, S., “Development of quadruped walking robot TITAN-VIII,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, (1996), pp. 208–214.