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	ロボット駆動のための高強度化学繊維ワイヤ
著者	遠藤 玄
出典	強化プラスチックス, Vol. 63, No. 7, 318-322
発行日	2017, 7

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ロボット駆動のための高強度化学繊維ワイヤ

東京工業大学　工学院
准教授　遠藤　玄
gendo@mes.titech.ac.jp

1．　はじめに

現在産業用途で主流となっている据置型アームロボットは，各関節にモータを配置し，その回転出力を歯車などの減速機を用いて所望の関節トルク・速度に調節することによって駆動されている．高精度の運動制御や駆動部をユニット化ができるなどの多くのメリットがある一方，アームを大きく動かす場合には，重量物であるモータと減速機を，アームとともに振り回さなければならないため，手先出力に直接寄与しない無駄なエネルギーが必要となる．また長尺のアームになればなるほど，モータ質量によるモーメントが過大となり，これを支えるためにさらに大きなモータが必要になる，といった設計上の悪循環に陥る可能性が高く，長尺化には限界があった．

これに対し，ワイヤを用いた関節駆動系には以下の利点がある．

1）モータ・減速機などの駆動源を，関節と離れた場所に配置することが出来る．
2）プーリ径の設定により減速機を構成できる．
3）複数の関節を同時に駆動できる．
4）比較的安価に構成できる．
5）故障時の安全装置になり得る．

このような利点から，筆者らの研究チームでは，ワイヤ駆動を用いたロボットを開発してきた．図１に開発した四脚歩行ロボット TITAN-XIII　[1]　を示す．大きさ 220×550×345mm，質量 5.6kg の比較的小型の研究用プラットフォームであり，本体質量とほぼ同じ 5kg を積載して歩行することが出来る．図２に腿関節の駆動機構を示す．縦に配置されたモータの回転により入力プーリ軸に巻き付けられたワイヤを巻き取る／繰り出すことで，出力プーリを回転させて腿関節を駆動する．入力プーリと出力プーリの直径の比から回転速度を 8.5 分の 1 に減速，すなわちトルクを 8.5 倍に増加させている．また，図示していないが紙面奥側にも並列に同様の機構があり，膝関節を駆動している．このような構成とすることで，重量物であるモータを極力本体中央部に集中的に配置し，可動部である脚の

図１　四脚歩行ロボット TITAN-XIII [1]

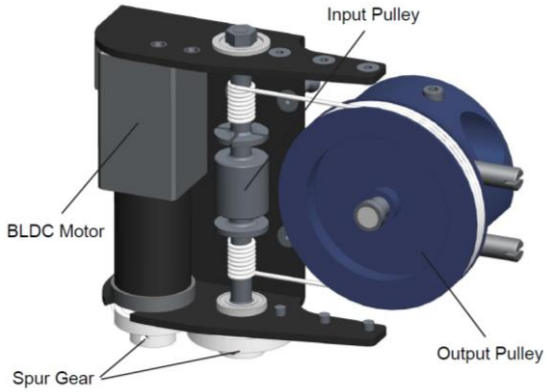

図２ ワイヤによる関節駆動機構

慣性モーメントを小さくすることで，軽快な脚運動を実現している．本ロボットの最大歩行速度は 1.38m/s であり，歩行のエネルギー効率では世界トップクラスの性能である．また，駆動にワイヤを用いることで脚に強い衝撃力がかかった場合でも，比較的安価なワイヤのみが破断するため，モータや減速機などの高額な部品を故障から守ることが出来る．

ところで従来，ロボットのワイヤ駆動系にはステンレスに代表される金属製ワイヤが用いられてきたが，近年，いわゆるスーパー繊維と呼ばれる高強度化学繊維が開発され，その引張強度はステンレスワイヤと同等か，それを凌ぐ値を記録している．さらに化学繊維は鉄のおよそ 1/5～1/8 程度の密度であることから，単位質量当たりの強度に換算すれば，遥かに金属製ワイヤを上回る物性値である．さらに，化学繊維ワイヤは単繊維が細く，しなやかであることから，高い屈曲性も有する．これらの特長から，従来の駆動機構では成し得なかった，小型・軽量・高耐荷重なロボット駆動系が構成できる可能性がある．

実際，上述の TITAN-XIII は高密度ポリエチレン繊維ワイヤを用いており，化学繊維ワイヤならではの軽

量性と，高屈曲性を活用した設計となっている．特に図２の駆動機構は入力プーリに急峻な曲げを伴うため，ステンレスワイヤでは実現できない設計である．

本特集では，ロボット駆動のための高強度化学繊維ワイヤについてロープ素材の概要を紹介するとともに，ロボット設計の立場から見た現状の課題と，これを解決する各種特性試験について述べる．

２．　高強度化学繊維と駆動系要素としての課題

ロボットの伝達駆動系として化学繊維ワイヤを考える場合，「如何に大きな力学的エネルギーを伝達できるか？」が最も重要である．力学的エネルギーは力と変位の積で表される．より大きなエネルギーを伝達するためには，大きな力を伝達するか，あるいは大きな変位を伝達する必要がある．大変位の伝達はプーリを用いて無限回転させることにより達成できるため，第一義的には，大きな力，すなわち 高い張力を伝達できることが必要である．また，大きな張力と変位を与えた場合，それがワイヤ内部に弾性ひずみエネルギーとして蓄えられてしまえば，有効な機械エネルギーとして取り出すことが出来ない．従って，ロボットの伝達駆動系の要素としては，高強度かつ高弾性率の特性を有することが望ましい．

このような特性を備える化学繊維を，一般にスーパー繊維と呼ぶ．明確な学術的定義はないが，引張強度が約 2GPa 以上，弾性率で約 50GPa 以上の繊維を指すようである[2]．表１に各種スーパー繊維とその用途を示す．従来の利用法は吊荷用のロープや釣り糸，漁網，あるいはレジャー用品などが多く，産業用に用いられるとしても機械的な駆動を継続的に伝達する要素として用いられてはいないことが分かる．またこれら化学繊維の分野においては，日本の研究開発力は世界的に見ても高水準であり，国内での入手性が非常に高く，日本で研究開発を行うメリットは大きい．

さて，これらスーパー繊維をロボット駆動系として用いる場合，表１に示したメーカより供給される原糸をワイヤメーカが製紐したものを利用することになる．ところが原糸についての物性は公開されているものの，ワイヤとして構成した場合の特性については，多くの場合明らかではなく，ほとんどは理想的な条件で直線的に引っ張ったときの破断強度のみが提供される．もちろん上記は重要な情報ではあるが，ロボット機構を設計する上で十分な情報ではない．例えば，小径のプーリを用いた場合に応力集中による強度低下は起こらないのだろうか？どのように端部を固定すれば最大張力を利用できるのだろうか？耐久性はどれくらいだろうか？これらに対して明確に回答することが出来なければ産業用途には応用できない．

これに対し，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 G3525:2013)，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)などがあり，最大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法令により明確に定められている．つまり機械設計のための指針が整備されている．

したがって，今後の化学繊維ワイヤを用いたロボット機構設計のためには，金属製のワイヤロープと同様，設計に必要な各種特性試験を行い，知見を積み重ね，指針を確立することが必須であろう．

３．　基礎的特性試験

本節では筆者らにより行われている，化学繊維ワ

表１　スーパー繊維と用途　([3]より一部改変)

繊維名	商品名	メーカ	用途
パラ系アラミド繊維	テクノーラ	帝人	タイヤコード、ベルト、防弾服防護服、航空機部材、コンクリート補強
	トワロン		
	ケブラー	東レ・デュポン	
超高分子量ポリエチレン繊維	イザナス（旧ダイニーマ）	東洋紡	ロープ、防護服、スポーツ・レジャー用品、釣り糸、漁網
ポリアリレート繊維	ベクトラン	クラレ	ロープ、漁網、スポーツ・レジャー用品、電気資材成型品
PBO繊維	ザイロン	東洋紡	防護材、ベルト、ロープ、セイルクロス、各種補強材、耐熱クッション材
炭素繊維	トレカ	東レ	スポーツ、レジャー用品、航空・宇宙部材、自動車材、風力発電ブレード
	テナックス	東邦テナックス	
	パイロフィル	三菱レイヨン	

表２　試験に用いたワイヤ

	高密度ポリエチレン	PBO		ステンレス
Model	DB-60	DY-20ZL		C-200
Tensile strength*1	2.14 kN	3.22 kN		3.50 kN
Diameter	2 mm	2 mm		2 mm
		Core part	Sleeve part	
Material	Dyneema® SK-60 UHPE*2	Zylon® AS PBO*3	Dyneema® SK-60 UHPE	SUS304
Structure	1760 dtex ×8 strand braid	10020 dtex	770 dtex ×16 strand braid	7 × 19 Right regular lay
Wire Diameter or Fineness	1.11 dtex	1.7 dtex	1.11 dtex	0.13 mm
Supplier	Fiber : Toyobo Rope : Hayami industry			Asahi intecc

イヤの基礎的特性試験を紹介する．ここでは特に，

（1） プーリによる曲げと強度の関係

（2） 端部固定法と固定力の関係

（3） 繰り返し曲げと強度の関係

について概要を紹介する．以降，試験に使うワイヤの直径は 2mm とし，ステンレスワイヤと比較しつつ議論する．ワイヤの仕様を表 2 に示す．PBO 繊維は中心部の PBO 繊維を，高密度ポリエチレン繊維のスリーブで包む構成となっている．実験条件などの詳細は文献[4][5]を参照されたい．

3．1　プーリによる曲げと強度の関係

化学繊維ワイヤはしなやかで曲げやすいことから，小径のプーリを用いることでコンパクトな機構を実現できる．では，急峻に曲げることによりワイヤの強度は低下しないのであろうか？プーリの直径を D，ワイヤの直径を d とする．またプーリの影響がない場合のワイヤ破断強度を 100 として，プーリ部分で破断した強度を強度効率と定義し百分率で表す．横軸に D/d，縦軸に強度効率をプロットした実験結果を図 3 に示す．グラフより，D/d が小さくなる，すなわち巻きかけるプーリの直径が小さくなると急激に強度効率が低下することが分かる．また金属製ワイヤ・化学繊維ワイヤとも同様の傾向であることが明らかになった．図中赤実線は実験式である．この結果から，しなやかに曲がる化学繊維ワイヤであっても，金属製ワイヤと同様に曲げにより強度低下が生じることが明らかになった．

3．2　端部固定法と固定力の関係

例えどんなにワイヤ自身の引張強度が高くても，端部でワイヤが固定部材から抜けたり，破断してしまえば，十分な張力を伝達することが出来ない．金属製ワイヤは摩擦係数も 0.2 程度あるため，単純なクランプで高い強度効率を実現できる．また様々な固定法が開発されており，固定法ごとの強度効率も明らかになっている．一方で化学繊維ワイヤの摩擦係数は 0.05 程度と低く，通常のクランプでは端部を固定することが難しい．そこで図 4 に示す様々な固定法について固定力を計測した．図 4 (a)(b)は金属ブロックによるクランプ，図 4 (c)は円柱に巻き付けた後にクランプするものである．図 4 (d)は結びにより輪を作りピンに引っ掛けるもので，ここでは代表的な二重 8 の字結びを示している．図 4 (e)(f)はメーカに依頼する特殊加工で，カシメと縫製である．クランプ数や縫製長さを指定することが出来る．強度効率の測定結果を表 3 に示す．表中グレーの条件は端部が滑りぬけた場合を示す．ステンレスワイヤでは単純なクランプ(a)(b)により 8 割以上の強度効率が得られるのに対し，化学繊維ワイヤでは 3 割以下の力で滑ってしまうことが分かる．また，特殊加工は加工部分が長いほど強度効率が高いことが分かる．ただし，この加工はメーカに依頼して行うため，全体のワイヤ長を臨機応変に変更することはできない．小型かつ調整可能な方法としては円柱クランプや二重 8 の字結びが優れる．

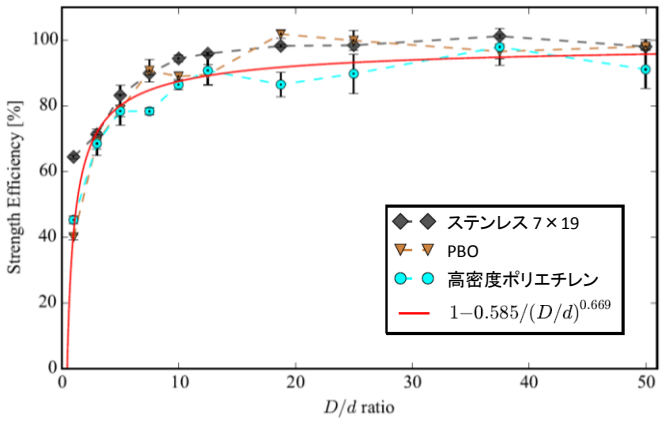

図 3　曲げ比率と強度効率の関係

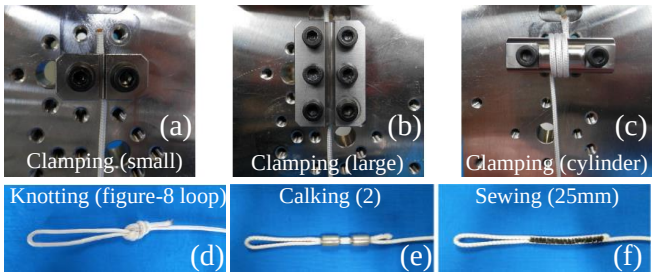

図 4　端部固定法

表 3　強度効率の測定結果

		高密度ポリエチレン	PBO	ステンレス
Diameter	[mm]	2	2	2
Tensile strength	[kN]	2.14	2.99	3.50
Clamping (small)	[%]	28.3	18.6	80.0
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	-

: Slipping　: Rope breaking

３．３　繰り返し曲げと強度の関係

ワイヤ駆動系ではプーリを用いて駆動を伝達することがほとんどである．この場合，プーリの回転によりワイヤに屈曲と伸展を繰り返す部位が生じ，その部位の疲労が引張強度を低下させる．金属製ワイヤロープについては，航空機用ワイヤロープ JIS G 3535:2012 において耐久性試験の規格が定められている．これに基づく試験装置の概要を図５に示す．図中左側のシリンダを揺動回転させることで，小径の試験プーリによりワイヤに曲げを繰り返し加え，その後，引張試験を行い，強度効率がどの程度低下するかを計測するものである．耐久試験用のプーリ直径を 24mm とし 7 万回の繰り返し曲げを化学繊維ワイヤと比較用のステンレスワイヤに対して実施した．その後，引張試験により得られた強度効率を図６に示す．ステンレスおよび高密度ポリエチレンではほとんど強度低下が見られないのに対し，PBO では著しい強度低下を示している．PBO は破断強度のみを見れば高い値を示すが，繰り返し曲げに対する耐久性は劣ることが明らかになった．　さらに耐久試験用のプーリ直径を 6mm とし，より急峻な曲げで実験を行ったところ，ステンレスは繰り返し曲げ試験中に破断してしまったが，高密度ポリエチレン, PBO では破断することなく，強度効率もそれぞれ 70%, 25%であった．したがって急峻な曲げについては化学繊維ワイヤの方がステンレスワイヤより耐久性に優れることが明らかとなった．

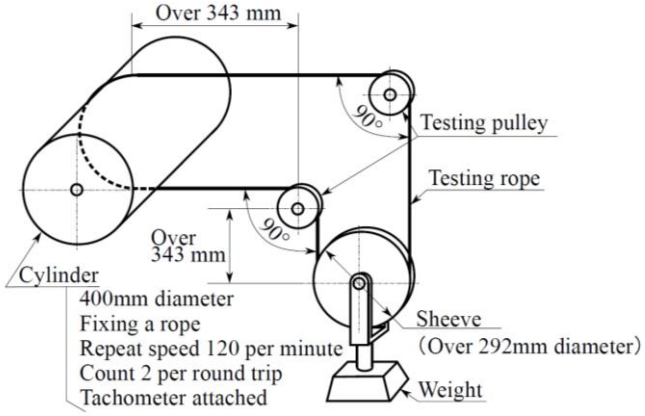

図５　繰り返し曲げ耐久性試験機

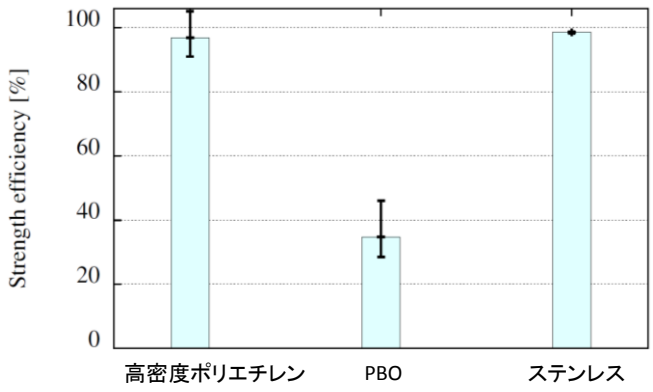

図６　繰り返し曲げによる強度効率の低下

４．　まとめ

本特集ではロボット駆動系として有望な化学繊維ワイヤの特長と，現状の課題について述べ，機構設計の指針を確立するための基礎的特性試験の概要を紹介した．紙面の都合上，一部の特性についてのみ言及したが，化学繊維ワイヤの耐衝撃性，粘弾塑性，クリープ伸び，捩じりに対する耐久性，耐候性，耐放射線性など，今後検討すべき点はまだまだ多い．化学繊維もパラ系アラミド繊維，ポリアリレート繊維についても評価を行う必要がある．今後も継続的に研究を進め，化学繊維ワイヤを用いた駆動系の設計論構築に寄与していきたい．

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費（25420214）の助成および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．

参考文献

[1] S. Kitano et al., 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

[2] 日本化学繊維協会，よくわかる化学せんい，スーパー繊維などの紹介，
http://www.jcfa.gr.jp/fiber/super/what.html

[3] 日本化学繊維協会，よくわかる化学せんい，スーパー繊維などの紹介，高性能・高機能繊維の概要
http://www.jcfa.gr.jp/fiber/super/summary.html

[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] 堀米，遠藤，鈴森，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，2A1-Q08, 2015