

空気圧バルーンを用いた腱駆動ロボットハンドの開発

永瀬 純也*・嵯峨 宣彦*

Development of a Tendon Driven Robot Hand Using a Pneumatic Balloon

Jun-ya Nagase*, Norihiko Saga*

The development of a robot which is gentle to people in nursing and welfare has been concerned about more and more toward the aged society. For a robot in often contact with people and requiring safety and flexibility in nursing and welfare, the development of a soft actuator that is compact and lightweight has been urged. In particular, robots, which are intended for use in the field of medical care and welfare, should be safe for the human environment as they often come into contact with people. The robot hands are required to have dexterity similar to human hands, and be able to perform complicated movements. Therefore, they differ from industrial robot hands in the weight, freedom of movement of joints, and flexibility.

Then, we have devised a tendon drive system using flexible silicone rubber material. Moreover we have developed a robot hand using tendon driven system, which is lightweight, flexibility and has the same degree of freedom as biological human hands. This study will report on driven mechanism and biomechanical characteristic of the flexible and lightweight tendon drive system. It will also report on the basic structure and driven mechanism of the robot hand that the tendon drive system is installed.

Key Words: Tendon driven System, Pneumatic balloon, Soft actuator, Biomechanical characteristic, Robot hand.

1. はじめに

近年の少子・高齢化の進展による労働力人口の減少や介護者の増加などの問題に対して、介護やリハビリテーション、および日常の作業支援等を目的としたロボットの活躍が期待されている。中にはすでに実用化されているものもいくつかあり¹⁾、ロボットハンドにおいては、筋電義手²⁾が実用され始めている。また、この少子・高齢化は今後も急激に進み、2021年には日本の総人口における高齢者の割合が30%にまで達する見込み³⁾であり、介護・福祉を目的としたロボットハンドの産業界における需要は今後さらにさまざまな用途に渡って伸びていくと予想される。

このような使用環境におけるロボットハンドにおいては、人間との協調作業や補助作業を伴うため、とりわけ安全性および人間との親和性が重視される。そのため、既存の産業用ロボットとは関節自由度や軽量、柔軟構造などの点で大きく異なる仕様となる。

これまでに報告されている人間の手と類似したロボットハ

ンド^{4),5)}には、指に取り付けられたワイヤやベルトを、手の甲や腕に内蔵されたDCモータや超音波モータなどのアクチュエータで動かす腱駆動システムや、指関節にアクチュエータを装着し関節自由度を大きくした、ダイレクトシステム⁶⁾等がある。しかしながら人間の手と比較して、前者はサイズが大きく動力伝達系の剛性が低い。また後者は重く複雑な構造などの問題がある。そのため、これらのロボットハンドは人間に対して十分な安全性および親和性があるとは言い難い。

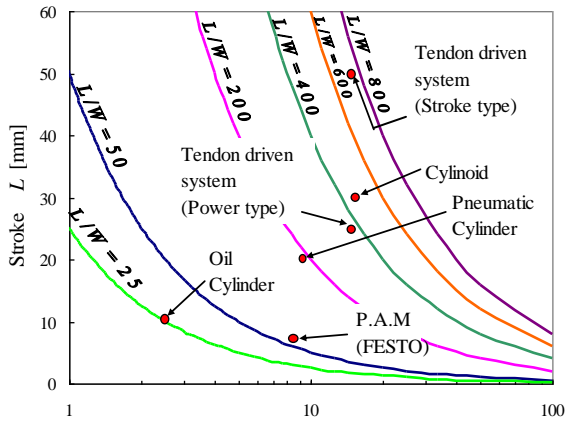
一方で、柔軟構造を実現したロボットハンドとして、シリコンラバーで構成されたロータリー・アクチュエータを関節部に用いたシステム⁷⁾や、指そのものをラバー材のチューブで構成したもの⁸⁾がある。これらは軽量で柔軟動作を行うため高い安全性・親和性を有するが、ハンドの機械的剛性が低く、関節自由度の点で人間の手と大きく異なっている。

こうした中で、われわれは軽量で人間の手をやわらかさと自由度を有するロボットハンドのためのアクチュエータとして、シリコンゴムで形成されたバルーンの膨張に着目し、これまでの空気圧人工筋^{9),10)}の長軸方向変位と異なる小型軽量の空気圧バルーン型腱駆動システムを開発した¹¹⁾。Fig. 1(a),(b)およびTable 1は、開発した2種類の腱駆動システムと、他の人工筋やモータ等の従来型アクチュエータについて、

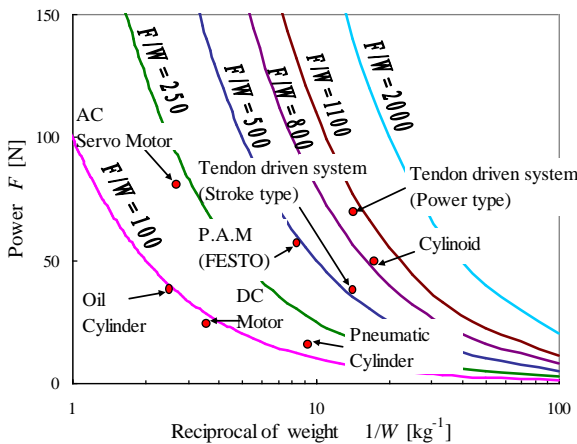
*関西学院大学 理工学部 人間システム工学科
兵庫県三田市 学園2-1

*Department of Human System Interaction, Kwansai Gakuin University, 2-1 Gakuen, Sanda, Hyogo.
(Received November 24, 2009)

TRIA 011/10/0911©2009 SICE



(a) Compared stroke-weight results



(b) Compared power-weight results

Fig. 1 Characteristics of a tendon-driven system and another actuator

ストローク対自重比および発生力対自重比を比較したグラフを示している。本腱駆動システムはストローク対自重比、発生力対自重比ともに、他のアクチュエータと比べて優れた特性を有していることがわかる。

そこで、本研究ではこの腱駆動システムを用いた、人間の手と同等の大きさ、重量および柔軟性を有するロボットハンドの開発を行った。本論文では、空気圧バルーン型腱駆動システムの生物学的特性について述べ、また、開発したロボットハンドの基本構成や駆動原理および設計手法について報告する。

2. 空気圧バルーン型腱駆動システム

2.1 基本構成と駆動原理

空気圧バルーン型腱駆動システム（以下、腱駆動システムと呼ぶ）の駆動原理および外観を Fig. 2 に示す。

腱駆動システムは空気圧駆動で、圧縮空気が送り込まれるバルーンと、その外周に沿って巻きつけられた帯状の腱から構成される。このバルーンは扁平の円形チューブで、バルーンの片側が塞がれており、もう片側は圧縮空気の給排気を行

Table 1 Characteristics of tendon-driven systems and another actuator

	Power [N]	Stroke [mm]	Mass [kg]	Power /Mass	Stroke /Mass	
Pneumatic Cylinder*1	17	20	0.106	157	385	
Oil Cylinder*2	34	10	0.43	80	24	
Cylinoid*3	49	30	0.06	817	500	
Tendon-driven system	Long-stroke type	27	80	0.062	430	1290
	High-powertype	76	40	0.062	1225	645
Pneumatic artificial muscle*4	59	7	0.115	511	61	
AC Servo motor*5	80		0.4	200		
DC Servo motor*6	23		0.275	83		

*1 CDA12×20, Koganei Corp.

*2 210N-1S20×10, Taiyo Tekko Co., Ltd

*3 CA-32, Camden Co., Ltd

*4 MAS-10, Festo AG & Co., KG

*5 AIP030-AA, Oriental Motor Co., Ltd

*6 3557K012CS, Faulhaber GmbH & Co., KG.

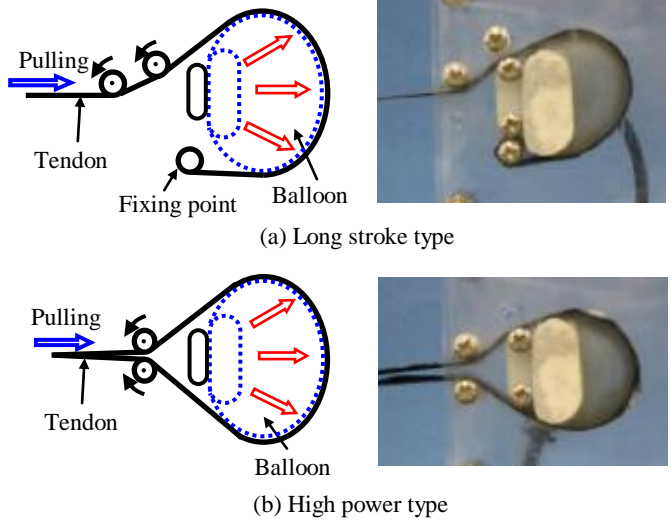


Fig. 2 Configurations of developed two types of tendon driven system

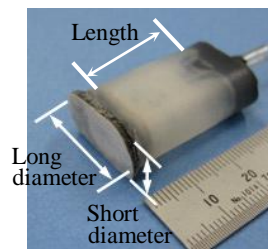


Fig. 3 Photograph of a balloon

Table 2 Specification of a balloon

Material	Silicone rubber	
Length	25mm	
	Long diameter	Short diameter
Outer diameter	21.0mm	9.0mm
Inner diameter	17.8mm	5.8mm

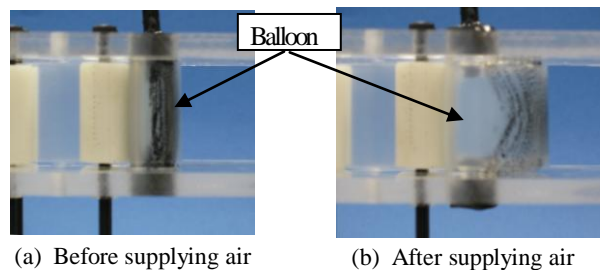


Fig. 4 Photograph of top view of the tendon driven system

うためのホースが取り付けられている。また、このバルーンの両端はアクリル板によって位置が固定されており、バル

ーン側面的一方にはバルーンの膨張方向変位を拘束するための壁を設けている。また腱の方向を変える箇所にはローラーを配置し出力効率のロスを抑えている。本研究で使用したバルーンの外觀および仕様をそれぞれ Fig. 3, Table 2 に示す。

駆動原理は、Fig. 2(a),(b)とも同じで、バルーンに圧縮空気を給気させることでバルーンが Fig. 4 に示すように円柱状に膨張し、その周囲に配置されている腱がその膨張とともに膨らみ、それによって腱が引張り力を発生することで腱駆動を実現している。なお Fig. 4 は、腱駆動システムを Fig. 2 の写真に対して上方から見たものであり、また、膨張形状がわかるように、バルーンの右半分を黒く塗り潰しさらに透明の腱を使用したものである。

Fig. 2(a), Fig. 2(b)は、腱の配置方法が異なっており、Fig. 2(a)では腱の片端が固定されているのに対して、Fig. 2(b)では腱は両端とも固定されておらずフリーの状態となっている。この構造の違いから、Fig. 2(a)のタイプは、Fig. 2(b)のものに対して理論的に2倍のストローク量を発生し、また、Fig. 2(b)のタイプは、Fig. 2(a)のものに対して理論的に2倍の力を発生する¹¹⁾。

2.2 基礎特性

本節では、2種類の腱駆動システムの発生力とストロークの特性について述べる。

本研究で用いた実験装置を Fig. 5 に示す。この実験装置は、腱の引っ張り方向に水平に移動する治具を用い、変位量はストッパーの位置調整により任意に制限することができる。治具の変位量は、インダクタンズ式変位計(DLT-100AS:KYOWA 製)により計測する。治具が設定変位量まで移動した後に発生する力は、ストッパーと治具間に設置したロードセル(LUR-A-200NSA1:KYOWA 製)により計測する。また、腱駆動システムに印加する圧力を電空レギュレータ(EVT500-0C4:CKD 製)で調整するが、このときの圧力値は電空レギュレータと腱駆動システムの間に取り付けた圧力計(PGM-10KC:KYOWA 製)により計測する。以上の変位、発生力、圧力それぞれのセンサ出力はシグナルコンディショナーを通して電圧値に変換され、AD ボードを介して PC に取り込まれる。

実験ではあらかじめ印加圧力と変位量を設定し、これらの条件を満たした時点での発生力を計測した。圧力は 0.10MPa から 0.20MPa までの範囲で 0.02MPa 刻みで変化させた 6 条件とし、変位量は、ストローク重視型は 0mm から 80mm までの範囲で 10mm 刻み、力重視型は 0mm から 40mm までの範囲で 5mm 刻みでそれぞれ変化させた 9 条件とした。また入力圧力は 0MPa を基準とし、目標圧力相当の指令電圧をステップ状に、電空レギュレータに与えた。

Fig. 6 に各印加圧力時の変位量に対する発生力を示す。ただしこれらの値は、ステップ応答における定常値を取得したものである。ストローク重視型では一定圧力の場合、変位量がおおよそ 30mm 付近で最も発生力が大きくなっている。また、変位量が 30mm を超えると発生力が減少する傾向があることもわかる。力重視型では一定圧力の場合、変位量がおおよそ 20mm 付近で最も発生力が大きくなっており、また変位量が 20mm を超えると発生力が減少する傾向があることがわかる。また、圧縮空気の供給によってバルーン内壁に発生する力に対する、腱駆動システムの発生力の割合を駆動効率と定義すると、それぞれの駆動効率は、力重視型は約 20%、ストローク重視型は約 10%であった。ただし、それぞれの値はストロークを 0mm に固定した際に入力圧力を 0.2MPa 掛けた時の発生力から計算した。それぞれの最大発生力は、ストローク重視型で変位量 30mm のときに約 26N となり、また力重視型では変位量 20mm のときに約 75N となり、力重視型とストローク重視型で発生力が 3:1 の関係を示し、前節で述べた理論比である 2:1 とは異なる結果となった。この理由について以下に考察する。力重視型は Fig. 2 (b) に見られるようにバルーンの膨張は上下対称となっている。これに対してストローク重視型では片側の腱が固定されているため、バルーンの外周接線方向に変位が発生し、Fig. 2(a) に見られるように膨張したバルーンが上方方向に変形している。バルーンは内圧により、バルーン壁面の法線方向へ力を発生するが、ストローク重視型にみられる外周接線方向への変形に対応する形状を保持する力が弱い。したがって、力重視型に比べ、ストローク重視型の発生力が理論値以上に小さくなったものと考えられる。

つぎに発生ストロークについて比較する。Fig. 7 に、バルーンの膨張の様子を撮影した写真を基に、画像処理から計測したおおよそのバルーン外周とそのときのそれぞれの変位量を示す。この結果から、ストローク重視型と力重視型では、バルーンの膨張がほぼ同じ状態で、変位量が 2:1 の関係になっていることがわかる。

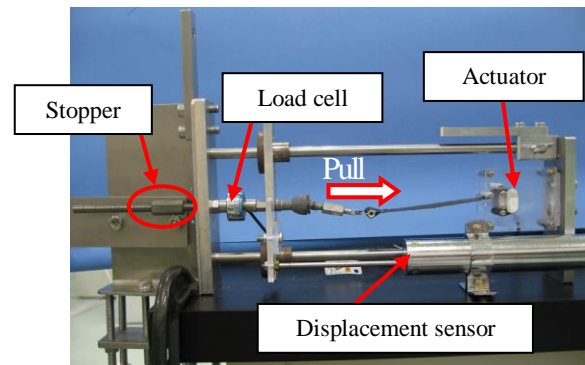


Fig. 5 Experimental setup

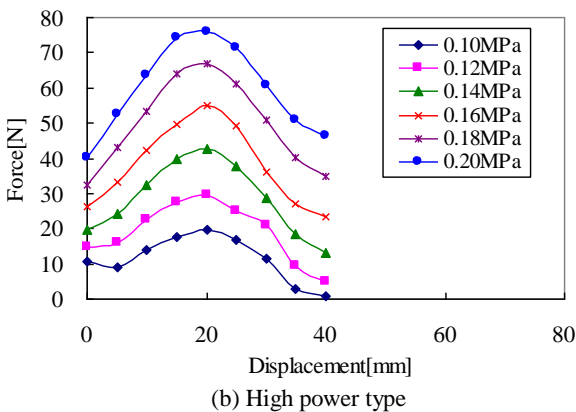
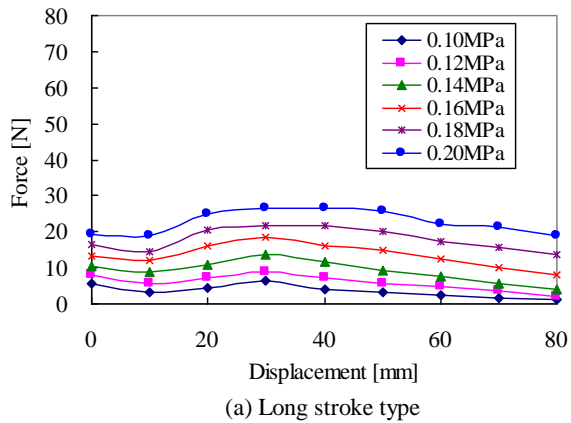


Fig. 6 Relations between displacement and force on each pressure

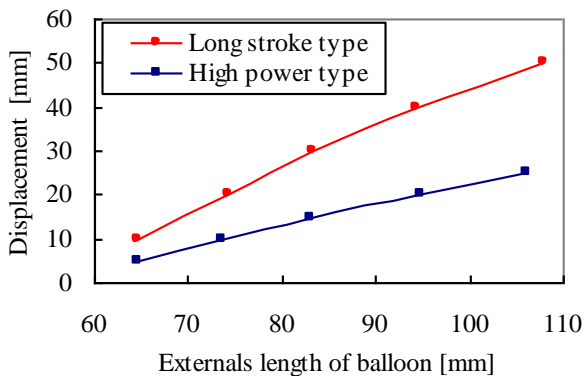


Fig. 7 Relation between the external length of the balloon and displacement of tendon-driven systems

2.3 生物学的特性

ロボットハンドを医療・介護分野などのヒトと共存する環境において使用する場合、安全性のみならずヒトとの親和性・協調性が要求される。特にヒトとの協調作業時、たとえば物の受け渡し時を考えると、ロボットハンドの動作が機械的な場合、それはヒトにとっては通常の日常生活で直面しない動きであり、そのためロボットハンドとの受け渡し動作がスムーズに行えず、最悪、対象物を落下させてしまう危険性も考えられる。そのため、このようなロボットハンドにおい

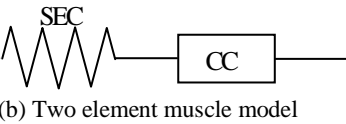
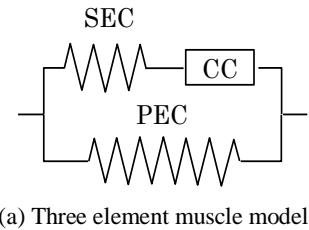


Fig. 8 The biomechanical muscle model experimentally established by Hill⁹⁾

て、そのようなヒトとの協調作業等を容易に行うためには、人間らしい把持特性を有することが望ましいと考える。そこで本節では、開発した腱駆動システムの、ヒトと共存する環境におけるロボットハンドのアクチュエータとしての有用性を見るために、人間の筋特性評価に用いられる等張性収縮特性を測定し生体筋との比較を行った。ここで、等張性収縮とは一般に負荷一定の条件下における筋の収縮を指し、ロボットハンドの指の曲げ応答に相当する。

生物学的な筋モデルとして、**Fig. 8(a)** に示す 3 要素モデル¹²⁾が用いられている。この筋モデルは、収縮要素(CC)、直列弾性要素(SEC)および並列弾性要素(PEC)からなっている。今回の実験では、アクチュエータのストロークを自然長以上に伸長しないよう制限したため、**Fig. 8(b)** に示す 2 要素モデルを考える。

このとき、筋の収縮力と負荷荷重の関係は、次式となる。

$$\left(\frac{F}{F_m} + C \right) \left(\frac{V}{V_m} + C \right) = C(C+1) \quad (1)$$

ここで F は筋の収縮力、 V は筋の収縮速度、 V_m は筋の最大収縮速度、 F_m は筋力の最大値、 C は筋肉の疲れや部位によらない固有の値である。

等張性収縮の評価実験として、ストローク重視型および力重視型の腱駆動システムに、自然長の状態でプーリを介して一定負荷をかけ、その際の圧力のステップ入力に対するストロークをレーザーセンサにより計測し、負荷とストローク速度の関係を調べた。ただし、ストロークは自然長以上に伸長しないようストッパーにより制限した。入力圧力は 0MPa から 0.025MPa ずつ増加させ、 0.25MPa までの範囲で行った。負荷は 0g から徐々に増加させていき、圧力を加えてもストロークが測定不能になるまでとした。

Fig. 9 に(1)式に基づいた負荷-ストローク速度曲線を示す。ただし各圧力において発生する力や加わる荷重が異なるため、それぞれ無次元化してグラフ化した。また、力重視型は

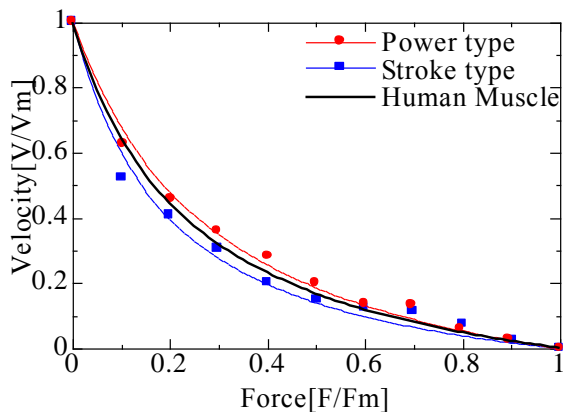


Fig. 9 Relation between force and velocity

0.175MPa, ストローク重視型は 0.15MPa のときの曲線であり、図中の太線はヒトの筋特性を表わしている。生体筋の特性として発生力と速度が双曲線の関係になるのが特徴であるが、Fig. 9 から、力重視型およびストローク重視型ともにその関係が、生体筋と同様の双曲線の関係になっていることが確認でき、また曲線形状もヒトの筋特性のものに近い。これは、これら2種類の腱駆動システムを、ロボットハンドのアクチュエータとして使用したときに、ヒトの等張性収縮特性を有する把持動作ができることを示唆していると考えられる。

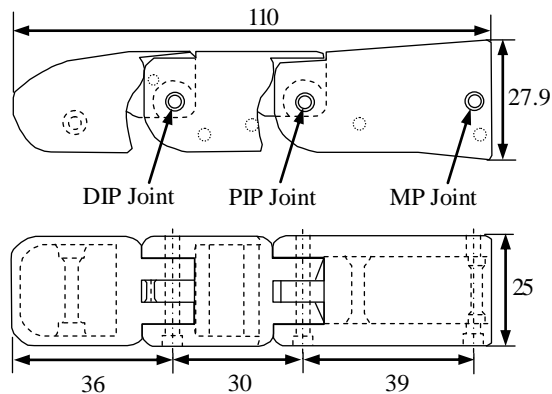
3. ロボットハンドの設計

本腱駆動システムを用いて、介護・福祉分野など人間と共存する環境下での活用を目的としたロボットハンドを設計・製作した。本章では試作したロボットハンドの基本構成、駆動原理および設計手法について述べる。

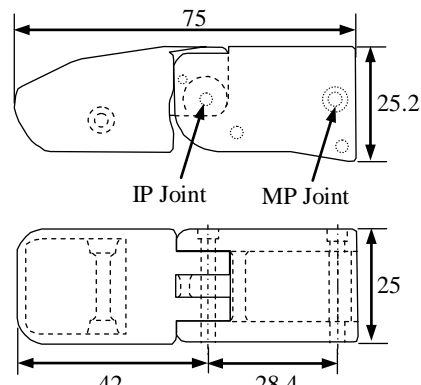
3.1 基本構成と駆動原理

開発したロボットハンドの構造とメカニズムをそれぞれ Fig. 10, Fig. 11 に示す。本ロボットハンドは主に人間と共存する環境において使用されることを目的としているため、ロボットハンドの大きさおよび各寸法は成人男性の手とほぼ同等サイズとしている。

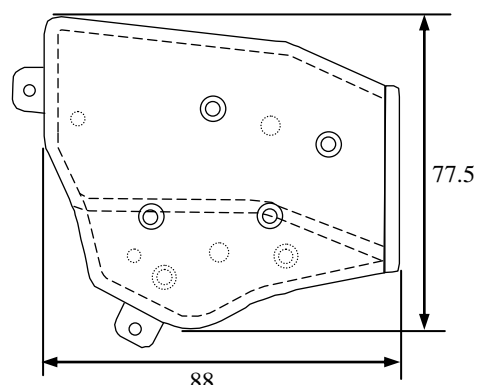
本ロボットハンドの駆動機構は主に腱駆動システムと弾性体から構成される。そのため本ロボットハンドの関節可動角度は腱駆動システムのストローク量によって決まる。そのストローク量はバルーンの膨張量によって決まるが、本ロボットハンドに内装されたバルーンの最大膨張時の外周は70mmであり、そのときの発生ストロークは Fig. 7 から、ストローク重視型で約15mmとなり、力重視型ではその半分の約7mmとなった。そのため力重視型を使用した場合、次節で述べるストローク重視型の関節可動角度よりも約半分の角度しか確保できず、ヒトの手と比べて非常に小さな関節可動角度となる。そのため、本ロボットハンドの腱駆動システム



(a) Finger



(b) Thumb



(c) Palm

Fig. 10 Structure of each parts of tendon driven robot hand

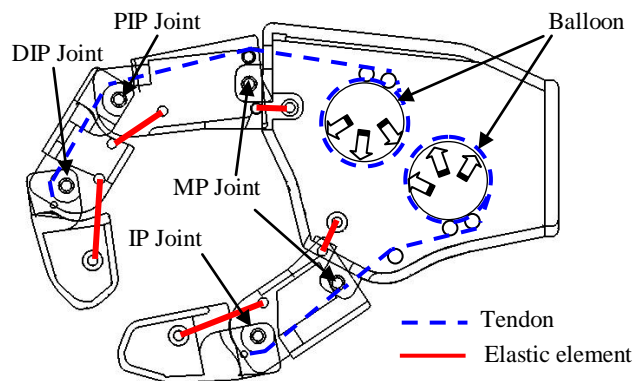


Fig. 11 Mechanism of a tendon driven robot hand

ムには比較的大きな関節可動角度を確保できるストローク重視型を使用した。

腱駆動システムのシリコンチューブは掌内部に、拇指用に1本とその他の指用に1本の計2本が内挿されている。本ロボットハンドの指は、拇指1本とその他の指3本の計4本で、それぞれの腱の片端はシリコンチューブの周囲を巻き付け、もう片端は各指の内部を通して DIP 関節に取り付けられている。また弾性体には引張バネを使用し、指の各関節間に取り付けられている。それぞれの指は、腱駆動システムによる発生力を利用して伸展し、弾性体による復元力により屈曲する。これはシステムが異常停止した場合にも把持力を確保でき、把持物の落下を防ぐことを目的としている。

3. 2 詳細設計

3. 2. 1 把持力の検討

本ロボットハンドは、介護・医療などの分野において人間と共存する環境下での使用を想定しており、そのため紙コップのような非常に柔らかいものも容易に把持できなければならない。したがって、そのためには対象物に対する指の接触面積を極力大きくして、指全体で均一な力で把持することが有効な方法であると考えられる。そこで、本ロボットハンドがそのような把持を行えるように、指の設計を以下に示すように行った。

まず、ロボットハンドの指を Fig. 12 に示すような片持梁で考える。指全体で均一な力で把持することを考えると、梁に作用する荷重は等分布となるため、このときのモーメント M は、

$$M = \frac{l^2 q}{2} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \quad (2)$$

となる。ただし q は単位長さ当たりの荷重値、 l は指全体の長さ、 x は指の根元からの距離を示している。ここでモーメント M はロボットハンドの指の関節トルクに相当するため、腱の張力を T 、関節のプリー半径を r とすると、指関節におけるモーメント M は以下で表わされる。

$$M = T r \quad (3)$$

腱とプリー間の摩擦、およびプリーの回転抵抗がそれぞれ無いと仮定した場合、腱の張力 T は指全体に一樣となるため、(2)式および(3)式より、

$$r \propto \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \quad (4)$$

となるように r を決めれば、指全体に等分布荷重が作用することになる。本研究では、(4)式を用いて拇指以外の指の各

関節のプリー半径を、DIP 関節は 3mm、PIP 関節は 5mm、MP 関節は 13mm にそれぞれ決定した。

また、ハンドの指に作用する単位長さ当たりの荷重は(2)式および(3)式より、

$$q = \frac{2Tr}{l^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2} \quad (5)$$

となる。張力 T は腱駆動システムの発生力であるため、 T の最大値は腱駆動システムの最大発生力によって決まる。腱駆動システムのストロークに対する発生力の関係を示した Fig. 6 より、腱駆動システムの発生力はストローク量によって異なることがわかる。試作したハンドに内装された腱駆動システムの最大膨張時のストロークは 15mm であり、そのとき最大発生力は Fig. 6(a)より、入力圧力 0.2MPa 時において約 22N であることがわかる。したがって、ハンドの指に作用する 1mm 当たりの荷重は(5)式を用いて計算すると 0.05N となり、一本の指全体に作用する荷重の合計は 5.4N となる。また各関節のトルクは(3)式を用いて、DIP 関節は 0.03Nm、PIP 関節は 0.11Nm、MP 関節は 0.29Nm となる。

以上について拇指も同様に設計を行った。ただし、単位長さ当たりの荷重は示指と同値となるように計算した。結果、プリーの半径については IP 関節を 2.5mm、MP 関節を 7mm になるように設計し、またそのときの 1mm 当たりの荷重は 0.05N であり、拇指全体に作用する荷重の合計は 3.8N となる。また関節トルクは、IP 関節は 0.05Nm、MP 関節は 0.13 Nm となる。

各関節間に配置された弾性体のバネ定数については、腱駆動システムの発生力で指を完全に伸展でき、かつ弾性体の復元力による把持力を極力大きく発生させるために、弾性体の復元力により屈曲方向に発生する最大関節トルクが、腱駆動システムにより伸展方向に働く最大関節トルクと等しくなるように設計した。したがって、本ロボットハンドの最大把持力は、前述した腱駆動システムの発生力により指に作用する最大荷重と同値となる。Table 3 に本ロボットハンドの各関節の把持力および関節トルクをそれぞれ示す。

3. 2. 2 関節可動角度の検討

本ロボットハンドの指は、プリーを介した腱駆動システム

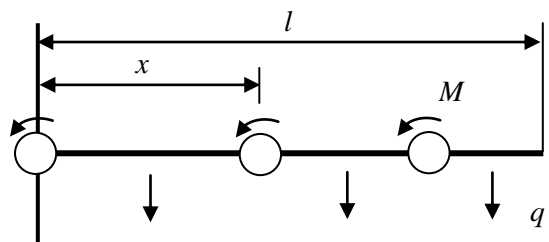


Fig. 12 Cantilever beam model for a finger

により駆動するため、指の関節可動角度は腱駆動システムの発生ストロークに依存する。したがって腱駆動システムの発生ストローク S と各関節のプーリの回転量 s_i 、およびプーリの回転量 s_i と各関節の角度変化量 θ_i との関係は以下で示される。

$$\sum_{i=1}^n s_i = S \quad (6)$$

$$\theta_i = 360 \times \frac{s_i}{2\pi r_i} \quad (7)$$

ここで、 r_i は各関節のプーリ径を示す。また、関節角度の最大値は腱駆動システムの最大ストローク量で決まり、そのストローク量はバルーンの最大膨張量によって決定される。本ロボットハンドのバルーンの搭載スペースにおける最大膨張時のストローク量は 15mm であることから、(6)式および(7)式を用いて、各指の関節可動角度を、拇指については IP 関節は 0~27°、MP 関節は 0~31°、また拇指以外については、DIP 関節は 0~72°、PIP 関節は 0~78°、MP 関節は 0~26° と決定した。Table 3 に、今回開発したロボットハンドの各関節の可動角度範囲を示す。

以上の設計を基に試作したロボットハンドの外観を Fig. 13(a)に示す。ロボットハンドの骨格は ABS 樹脂製としているため、ハンド全体の重さは 288g と軽量であり人間の手とほぼ同じ重さである。Fig. 13(b) に、水の入った紙コップを把持している様子を示す。本ロボットハンドは、柔軟な腱駆動システムにより駆動し、かつ対象物に対して均一な力で把持するため、紙コップのような柔らかい対象物でも容易に把持することが可能となる。

4. 結 言

本研究では、開発した腱駆動システムの生物学的特性の評価を行うとともに、ストローク重視型の腱駆動システムを用いて設計・試作したロボットハンドの、基本構成や駆動原理および設計手法について述べた。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 腱駆動システムの生体筋との比較において、腱駆動システムの特性は、筋の動的な特性である等張性収縮特性についてヒトの特性と同様の傾向が見られた。したがって本腱駆動システムを搭載したロボットハンドの指の屈曲動作においては、ヒトの等張性収縮特性を有する動作を行わせることができると考える。
- (2) 試作したロボットハンドは、人間の手と同等の形状・大きさ・重量であり、また対象物に対して柔軟な把持を行わせることが可能であることから、対人環境に対して高い安全性および親和性を有すると考える。

Table 3 Specification of each joint of a proposed tendon driven robot hand

Output force	Finger		5.4	N
	Thumb		3.8	
Output torque	Finger	DIP joint	0.03	Nm
		PIP joint	0.11	
		Mpjoint	0.29	
	Thumb	IP joint	0.05	
		MP joint	0.13	
Operating angle	Finger	DIP joint	0~72	deg.
		PIP joint	0~78	
		MP joint	0~26	
	Thumb	IP joint	0~27	
		MP joint	0~31	



(a) An initial state

(b) Grasping of a paper cup

Fig. 13 Prototype of a tendon-driven robot hand

[参考文献]

- 1) 山海嘉之：介護ロボットスーツ HAL (特集 生活を支える福祉用具--福祉用具の選び方,活用の視点), 地域リハビリテーション, 2-8, 679/684 (2007)
- 2) http://www.h-e-i.co.jp/Products/e_m_g/ph_sh_2.html
- 3) <http://www.ipss.go.jp/pp-newest/j/newest03/newest03.asp>
- 4) H. Liu P. Meusel J. Butterfass and G. Hirzinger : DLR's Multi sensory Articulated Hand Part I: Hard- and Software Architecture, Proc. IEEE Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 16-20, 2087/2093 (1998)
- 5) I. Yamano, K. Takemura and T. Maeno : Development of a Robot Finger for Five-fingered Hand using Ultrasonic Motors", Proc. the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada, 2648/2653 (2003)
- 6) H. Kawasaki, H. Shimomura and Y. Shimizu : Education-al-industrial complex development of an anthropomorphic robot hand 'Gifu hand', Advanced Robotics, 15-3, 357/363 (2001)
- 7) T. Norisugu, M. Kubota and S. Yoshimatsu : Development of Pneumatic Rotary Soft Actuator Made of Silicone Rubber, Journal of Robotics and Mechatronics, 13-1, 17/22 (2001)

- 8) T. Yanagisawa, S. Yagi, T. Ide and H. Miura : Application of Pneumatic Silicone Rubber Pipe Actuator to Robotics, Research reports of the Kogakuin University, **91**, 17/24 (2001)
- 9) G. K. Klute, JM Czernieki and B Hnnaford : McKibben Artificial Muscles : Pneumatic Actuators with Biomechanical Intelligence, Proc. IEEE/ASME 1999 Intl. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, 1/6 (1999)
- 10) T. Nakamura, N Saga and K Yaegashi : Development of a Pneumatic Artificial Muscle based on Biomechanical Characteristics, Proc. IEEE Intl. Conf. on Industrial Technology, 729/734 (2003)
- 11) 齋藤直樹, 嵯峨宣彦, 永瀬純也 : 空気圧バルーン型腱駆動システムの腱配置と出力特性変化に関する考察, 日本機械学会論文集(C編), **74-743**, 1804/1809 (2008)
- 12) A. V. Hill : The heat of shortening and the dynamic constants of muscle, Proc. of Royal Society of London, B.126, 136/195 (1938)

[著者紹介]

永瀬 純也



2004 年秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科卒業. 2006 年秋田県立大学システム科学技術研究科機械知能システム学専攻修了. 同年, 住友重機械工業(株)入社. 2010 年関西学院大学理工学部人間システム工学科契約助手. バイオロボティクスの研究に従事. 日本機械学会の会員.

嵯峨 宣彦 (正会員)



1986 年三菱電機(株)入社. 1996 年信州大学大学院工学系研究科博士後期課程生物機能工学専攻修了. 1999 年秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科助教授, 2009 年関西学院大学理工学部人間システム工学科教授. 現在, バイオロボティクス, 人間支援工学, スポーツ・ロボティクスの研究に従事. 博士(工学). 日本機械学会, 電気学会, 日本ロボット学会, フルードパワー学会, IEEE 等の会員.