

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：34316

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760246

研究課題名(和文) 空気圧式剛性可変フィンガを有するバルーン駆動型ロボットハンドの開発

研究課題名(英文) Development of balloon-driven robotic hand using pneumatic variable-stiffness finger

研究代表者

永瀬 純也 (Nagase, Junya)

龍谷大学・理工学部・助教

研究者番号：70582245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：人間と共存する環境におけるロボットハンドにおいては対人環境に対する安全性や親和性が要求される。また、日常生活の支援動作を行う場合は、それらに加えて、器用な操り動作や、柔軟な対象物の把持、および摩擦を利用した動作など、様々なタスクが求められる。そこで本研究では空気圧剛性可変フィンガを有する腱駆動ロボットハンドの開発を行った。本フィンガは、タスクに応じて空気圧を調整することにより表面剛性や摩擦係数を自在に変化可能であり、また、力制御に予測機能制御系を適用することにより、風船のような柔軟物においても、容易に力制御可能なことが実証された。

研究成果の概要(英文)：Robots that are designed for use in the fields of medical care and welfare must be safe for the human environment because they often come into contact with humans. Furthermore, robots must have dexterity that is similar to that of humans. Under these circumstances, 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. Moreover, we have devised a robot hand with pneumatic stiffness change finger that can be changed surface stiffness by changing input pressure. And, the stiffness-changeable finger is able to control the grasping force easily by predictive functional control.

研究分野：ソフトメカニクス

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：剛性可変 ロボットハンド 予測機能制御 ソフトメカニクス

1. 研究開始当初の背景

少子・高齢化の進展により、介護やリハビリテーション等を目的としたロボットの活躍が期待されている。このような環境におけるロボットハンドは人間との接触や協調作業を伴うため、特に安全性および人間との親和性が重視される。

また、ロボットハンドを、例えば人間の日常生活支援を行う目的で使用する場合、豆腐や卵などの食料品や人体など、非常に柔らかい物や脆い物を把持する必要がある。そこで、把持圧力を低減させるために、指を柔軟素材で構成して指の腹を極力柔らかくしたり、指そのものの剛性を低くしたりすることが有効であるが、その一方で柔らかさは、滑りにくい、動かし難いといったことが生じるため、物体を操るという点で不利となる。また、人々の日常生活においては柔軟物の把持だけではなく、窓やドアの開け閉めなど比較的剛性を要する動作も必要とされる。従って、ハンドには、このような相反する動作・仕様が要求されるが、これらを同時に満たすハンドは、これまでにほとんど見られない。

2. 研究の目的

本研究では、バルーン型腱駆動アクチュエータを用いたロボットハンドのフィンガの体節を、それぞれ剛性変化デバイスで構成することで、デバイスに印加する空気圧の大きさによって、指表面の柔らかさや剛性が変化可能なフィンガを開発することを目的とする。またそれにより、柔軟な対象物の把持動作から、硬さや剛性の要する動作までを実現可能にすることを目指す。

3. 研究の方法

(1) 剛性変化デバイス

剛性変化デバイスとは、図1に示すような構造で、主に中空円筒状のシリコンラバーと強化繊維およびジョイント部から構成されるデバイスである。本デバイスはシリコンラバーに網目状に内挿された強化繊維の角度を54.7deg.とすることで、空気圧をデバイスに印加した際に、シリコンラバーの膨張・伸縮を一切伴わずに剛性のみを変化させることが可能である。

ここで、収縮率が0となる時の繊維角度は54.7deg.と幾何学的に算出できるものの、その理論式は、ゴムチューブが無限長であったり、ゴムの弾性力が無視された条件下において成り立つものであるが、実際にはゴムは有限長さであり弾性力も存在する。そこで、それらの要素を考慮して剛性変化デバイスのFEM解析を行うことで繊維角度54.7deg.の妥当性を評価した。

本解析で使用した有限要素モデルを図2に示す。このモデルは外径がφ20mm、肉厚が1.5mm、および長さが50mmの剛性変化デバイスの1/4モデルである。繊維角度は40deg.、45deg.、50deg.、54.7deg.、60deg.、65deg.

and 70 deg.の7条件を用意した。各繊維角度に対する収縮率の解析結果を図3に示す。図3より、繊維角度が54.7deg.のときに収縮率は0.00となり、この角度を境に、繊維角度の減少に伴い収縮率は増加し、繊維角度の増加に伴い収縮率は減少する傾向が見られた。したがって剛性変化デバイスの繊維角度は54.7deg.と決定した。

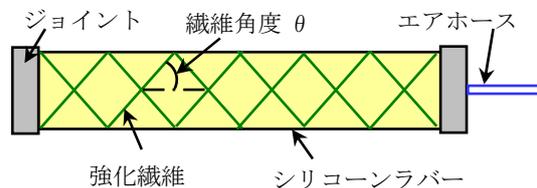


図1 剛性変化デバイスの構造

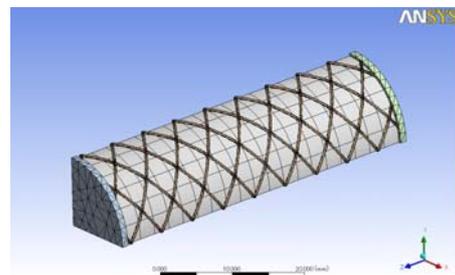


図2 有限要素法モデル

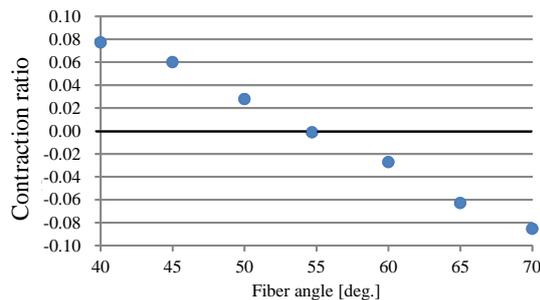


図3 解析結果

(2) 剛性可変フィンガ

剛性変化デバイスを用いて設計したフィンガの構造図を図4に示す。本フィンガの各体節は主に剛性変化デバイスで構成されている。本デバイスに供給する圧縮空気は、デバイスの内部に配置した空気圧チューブ内を通過して供給される。また、腱はデバイス内部を通過してDIP関節とMP関節にそれぞれ接続されており、各関節間には弾性体を取り付けられている。従って本フィンガは、バルーンアクチュエータにより発生した腱の引張り力によってフィンガを伸展させ、弾性体の復元力によってフィンガを屈曲させる駆動方式である。これはシステムが異常停止した場合でも把持力を確保でき、対象物の落下を防ぐことを目的としたフェールセーフ設計としているためである。また、本デバイス内部には、関節機構を取り付けているため、印加する空気圧力が小さく剛性が低い状態においても、比較的重量物を把持した際に、フィンガの各体節が重力方向に撓むことなく、

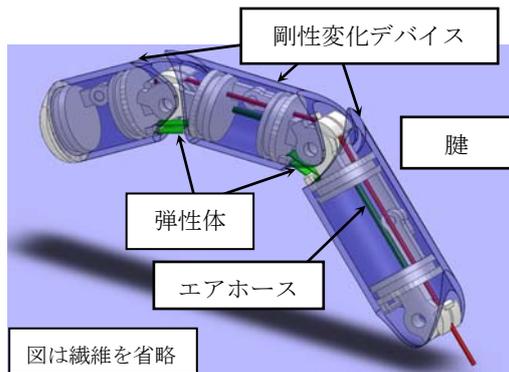


図4 剛性可変フィンガの構造

把持方向に対してのみフィンガが対象物の形状に沿って変形する構造となる。

また、試作したフィンガの写真を図5に示す。本フィンガの長さおよび太さは、ヒトの手の指とほぼ同等である。デバイス用のシリコンラバーの厚さは1.5mmであり、ラバー内部に強化繊維としてケブラー繊維を内挿している。関節間の弾性体には帯状の天然ゴムを使用し、また、直径1mmのシリコンチューブをデバイスの内側に配置しており、これを利用してデバイスに圧縮空気を供給する。フィンガの骨格はABS樹脂で構成され、フィンガ内部を通る直径0.3mmの金属製ワイヤの腱以外の部品はすべて非金属性であるため、フィンガ1本の質量は0.02kgと軽量である。

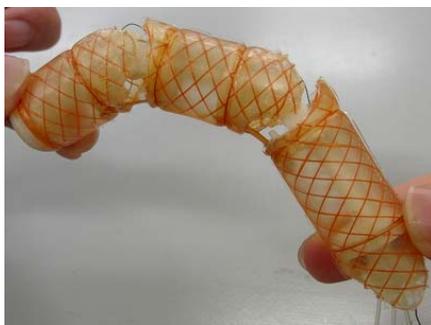


図5 試作した剛性可変フィンガ

(3) 剛性可変ハンド

図6に、剛性可変フィンガを用いたロボットハンドの構造図を示す。本ロボットハンドのフィンガの本数は計4本であり、関節数はフィンガ1本につき3関節を有する計12関節である。関節自由度はフィンガ1本につき2であり、計8自由度である。また本ロボットハンドの形状・大きさは、ヒトの手と同等としている。ロボットハンドの掌内部には計8本のアクチュエータが内挿されており、MP関節駆動用に1本ずつ、PIPおよびDIP関節用に一本ずつ使用され、それぞれ個別に制御可能である。図7に本ハンドにより4種類の物体をそれぞれ把握している様子を示す。本ハンドにより把持動作やつまみ動作、手掌支え動作等が可能である。また本ハンドフレームはABS樹脂で構成されており、総質量は0.27kgと成人男性の手より軽量である。

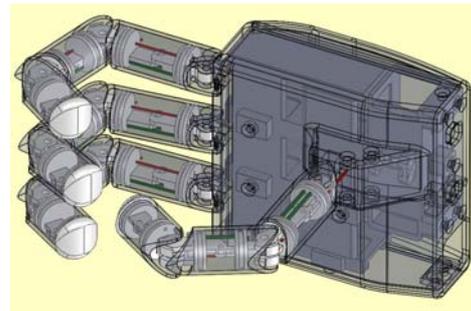


図6 剛性可変ハンドの構造図



図7 把握の様子

(4) 把持力制御系

本研究では開発した剛性可変フィンガの制御系に、制御則が比較的シンプルでかつロバスト性の高い、予測機能制御の適用を試みた。予測機能制御はモデル予測制御法の一つであり産業向けに開発されたものである。一般に、モデル予測制御はサンプル時間毎に非線形最適化問題を解く必要があり計算負荷が高いために、サンプル時間の長い化学プラントなどに適用されている。これに対して予測機能制御は、制御則が基本関数のみで構成されるため計算負荷が小さく、また調整パラメータが一つのみであるためチューニングが比較的容易である。また、内部モデルを有するため、モデル変動や外乱に対して高いロバスト性を有する。

制御系設計においては、まずフィンガの物理モデルを構築した。フィンガは剛体と仮定し、かつ指先の第一体節部が対象物と接触するとき既に他の2体節部が対象物と接触していると仮定すると、接触力 F_{cont} は第一体節の関節部に作用するトルクのみ依存するため、図8のような第一体節部のみのモデルを考える。このとき、接触力 F_{cont} は次式で表すことができる。

$$rF_1(t) - lF_{cont}(t) = 0 \quad (1)$$

$$\dot{F}_1(t) + \alpha F_1(t) = \beta p_1(t) \quad (2)$$

$$\dot{p}_1(t) + \gamma p_1(t) = \delta p_{in}(t) \quad (3)$$

ここで、 r はプーリ半径、 F_{cont} は対象物との接触力、 F_{act} はアクチュエータの発生力、 F_0 は $F_{cont}=0$ の時のアクチュエータ発生力、 p_{in} は電空レギュレータに対する指令圧力、 p_{out} は電空レギュレータからの出力圧力、 p_0 は $F_{cont}=0$ の時の印加圧力、 l はプーリ中心から対象物との接触位置までの距離である。また α および β はそれぞれ p_l に対する未知係数を、 γ および δ はそれぞれ p_{in} に対する未知係数をそれぞれ表している。本研究では、これらのモデルのパラメータ同定を、実機を用いた同定実験により行う。本研究で扱うプラントのモデルは式(1)～(3)より、次式のような2次遅れ系の伝達関数 $G(s)$ で表わされる。

$$G(s) = \frac{c}{s^2 + as + b} \quad (4)$$

剛性変化デバイスに対する印加圧力を 0.15MPa としたときの、バルーンアクチュエータへの印加圧力に対する接触力のステップ応答特性を測定し、その波形をカーブフィットすることにより、上式の伝達関数モデルの同定を行った。そして各印加圧力において同定したモデルパラメータの中央値を内部モデルのパラメータとして採用した。結果、 $a=10.8$ 、 $b=27.8$ 、 $c=222.2$ と同定した。また、本研究で扱う予測機能制御系においては離散系状態空間モデルが必要であるため、同定した式(4)の連続系伝達関数モデルを0次ホールドにより離散化後、状態空間モデルに変換した。

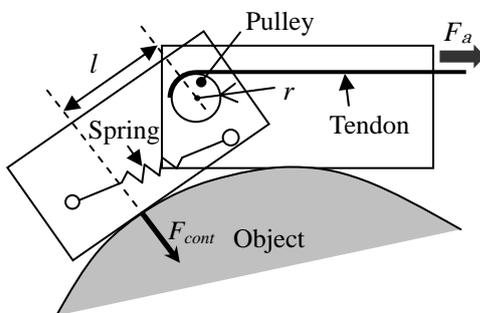


図8 物理モデル

4. 研究成果

(1) 剛性可変型ハンドの基礎特性

①剛性特性

フィンガの剛性特性を評価するために、剛性変化デバイスへの印加圧力に対する表面剛性を硬度計を用いて硬度を測定することにより評価した。また人間の手の指にも同様の測定をすることで、両者の比較および評価を行った。実験では、フィンガの各体節のデバイスに圧縮空気を0～0.15MPaまで0.01MPaずつ供給した際の、それぞれにおける硬度計による計測値を記録した。人間の手の指については、成人男性5名の示指の各関節を180度まで伸展させた状態で脱力したときの指の腹に硬度計を押し当てて硬度を計測した。

図9に、本ロボットハンドのフィンガと人間の手の指の、それぞれの各体節の硬度の測

定結果を示す。いずれの体節においても、印加圧力が本実験における最低圧力 0MPa 時では硬度 10 以下を示し、本実験における最大圧力である 0.15MPa 時では硬度 50 前後の値を示した。また、0MPa 時のフィンガの硬度と人間の手の指とを比較すると、指先体節部についてはフィンガの方が高い硬度を示したが、いずれの体節においても人間の手の伸展時の指に近い硬度を示した。以上の硬度測定の結果は、本フィンガの表面剛性は印加圧力によって変化し、また印加圧力が 0MPa 時にはヒトと同等の表面剛性を有することを示唆していると考えられる。

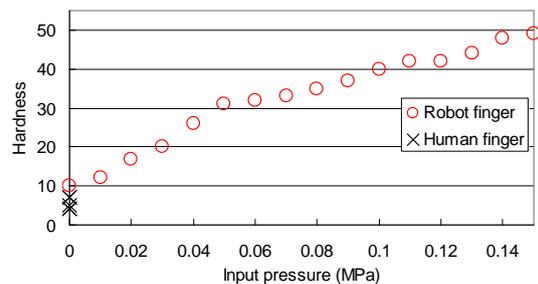


図9 剛性特性

②把持圧力分布特性

本フィンガの体節にあたる剛性変化デバイスを柔軟なシリコンラバーで構成することによる効果を調べるために、タクトイルセンサを用いて、本ロボットハンドによる物体把持時の把持圧力分布を計測した。さらに、人間の手についても同様の計測を行い、本ロボットハンドとの比較・評価を行った。

実験では、ロボットハンドおよび人間の手にタクトイルセンサを貼り付け、それぞれ、直径88mm、高さ115mm、質量0.1kgの円筒物を把持した際の把持圧力分布を計測した。またロボットハンドの場合については、デバイスへの空気圧を0MPa、0.15MPaのときの把持圧力をそれぞれ調べた。

図10にそれぞれの場合の把持圧力分布図を、図11にロボットハンドおよび人間の手の場合の接触面積、および接触力の総和を示す。まず、ロボットハンドによる把持の場合について、デバイスに対する印加圧力0MPaと0.15MPaについて比較すると、接触力の総和については、0MPa時は10.1N、0.15MPa時は9.0Nとあまり差が見られないのに対して、接触面積については0MPa時は684mm²、0.15MPa時は302mm²と、0MPa時の接触面積は0.15MPa時のものに対して2倍以上であることがわかる。これは、フィンガを柔軟なシリコンラバーで構成することで、剛体の場合と比べて、本フィンガにより最低でも2倍以上の接触面積が得られることを示唆している。また、図10の分布図を見ると、0.15MPa時においては、把持圧が0.5MPa以上の箇所が所々見受けられるが、0MPa時には、拇指の根元部に局所的に高い把持圧が見られる以外は、ほとんどの接触面において0.3MPa以下であることが確認できた。また、

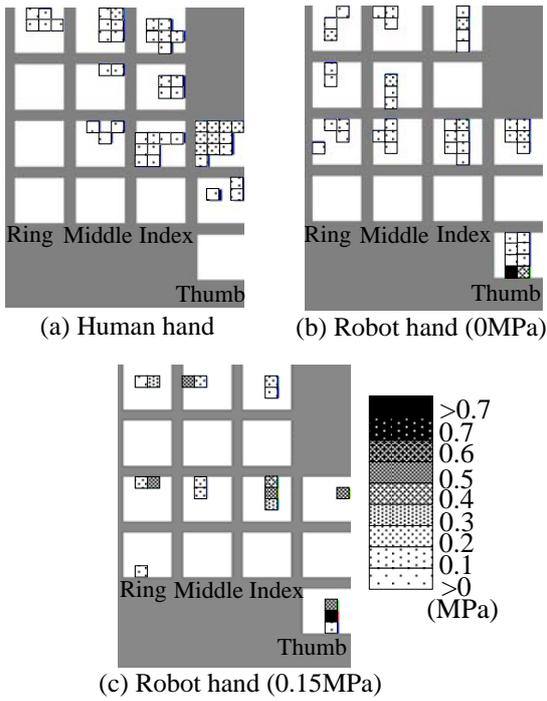


図 10 把持圧力分布

本ロボットハンドの場合と、人間の手の場合とを比較すると、人間の手の場合の接触面積 721mm^2 に対して、0MPa 時のロボットハンドの場合の接触面積は 684mm^2 で、本実験では人間の手の場合に近い接触面積を確認できた。

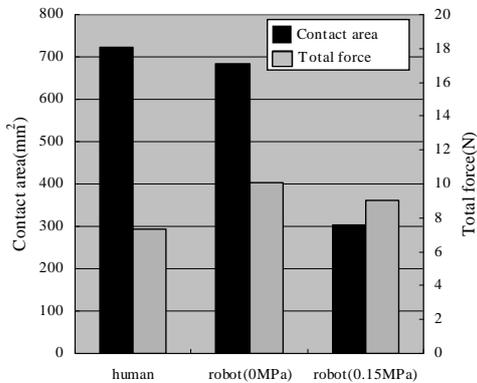


図 11 接触面積と接触力

③ 摩擦特性

本フィンガがデバイスの剛性変化によって、実際に摩擦係数が変化するかどうか、およびその変化の範囲を調査するために、各体節の静止摩擦係数を実験により調べた。実験では、水平の台に置いたデバイスに、紙で覆われた 0.2kg の重りを乗せた状態で、デバイスを徐々に傾けていった際にすべりが生じた時の、デバイスの傾き角度から静止摩擦係数を求めた。なお実験は、デバイスに空気圧を $0\sim 0.16\text{MPa}$ まで 0.02MPa 刻みで供給した時のそれぞれについて 3 回ずつ行った。

図 12 に実験結果を示す。結果、いずれの体節においても空気圧の印加により摩擦係数が変化しており、空気圧が低いほど摩擦係

数が高くなる傾向を示した。これは主には、空気圧の低下によりデバイスが弾性変形しやすくなり接触面積が増加したことによるものとする。また、摩擦係数の範囲については、長谷川らが提案したページめくり動作が可能な、シリコンラバーで被覆したフィンガの摩擦係数範囲の約 $0.6\sim 1.1$ と同様の結果を示した。以上により本フィンガは接触点や接触力を変化させることなく摩擦係数のみを調整可能なことを実験的に確認できた。

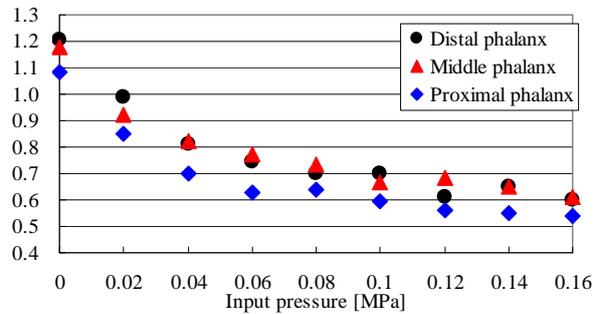


図 12 摩擦特性

(2) 剛性可変型ハンドの制御特性

次に剛性可変ハンドの力制御特性を実験により調査した。目標値はステップ状に 0.5N , 1N , 1.5N をそれぞれ与えた。また、剛性変化デバイスに対する印加圧力は、最小圧力の 0MPa と最大圧力の 0.15MPa の 2 種類とした。

図 13 および図 14 に、剛性変化デバイスへの印加圧力を 0.15MPa および 0MPa とした時の、力制御実験の結果をそれぞれ示す。図 13 から、デバイスへの印加圧力 0.15MPa 時におけるオーバーシュート量は目標値に対して 10% 以下であり、また整定時間についても同様に比較的良好な制御特性を示した。また定常特性についても、制御量が目標値に収束するとそのまま安定して目標値を保ち続けた。

次に図 14 の、デバイスへの印加圧力 0MPa 時における実験結果について述べる。剛性変化デバイスは、デバイスに対する印加圧力を変化させると表面剛性が変化する。硬度で比較すると、0MPa 時は 0.15MPa 時の 5 分の 1 程度の硬度であるため、力制御においてモデル変動による制御特性への影響が懸念される。しかしながら、図 14 の実験結果を見てみると、オーバーシュート量および整定時間も 0.15MPa 時と比べて制御特性の低下は見られず、表面剛性の変化による制御特性への影響はほとんど見られないことを確認できた。

本フィンガを日常生活支援のためのロボットハンドでの使用を想定した場合、持ち替え動作などの操り動作が考えられる。そこで、先ほどの実験条件に対して、操り動作を想定して目標値をステップ入力から sine 波に変更したときの制御特性を実験により調べた。図 15 に sine 波を目標値として与えたときの結果を示す。実験の結果、制御量は目標値の立ち上がり時に若干の遅れが見受けられたが、全体的に比較的良好な追従性能を示した。

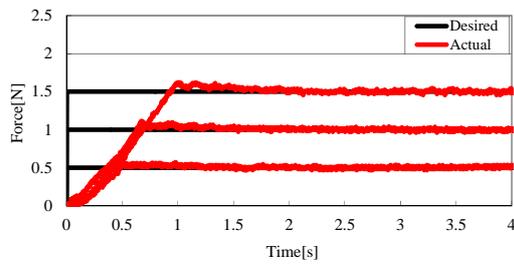


図 13 制御特性 (0.15MPa)

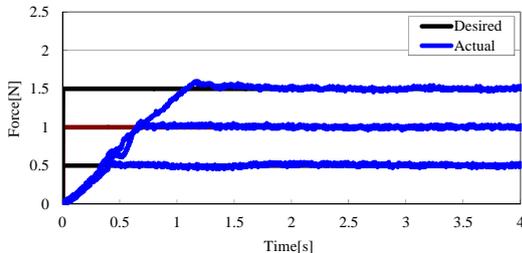


図 14 制御特性 (0MPa)

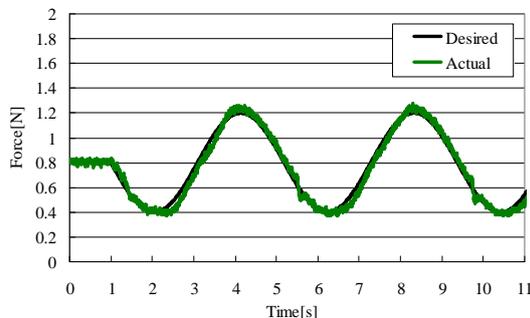


図 15 サイン波入力に対する制御特性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

① Jun-ya Nagase, Toshiyuki Satoh, Norihiko Saga and Koichi Suzumori, "Predictive Functional Control of Tendon-driven Actuator using Pneumatic Balloon", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol. 7, No. 4, pp. 752-762, 2013.

② Jun-ya Nagase, Toshiyuki Satoh, Norihiko Saga and Koichi Suzumori, "Predictive Functional Control with Disturbance Observer for Tendon-driven Balloon Actuator", International Journal of Computer, Information Science and Engineering, 査読有, Vol. 7, No. 12, pp. 627-632, 2013.

③ 永瀬 純也, 佐藤 俊之, 脇元 修一, 嵯峨 宣彦, 鈴森 康一, "柔軟ゴムデバイスを用いた空気圧剛性可変フィンガの予測機能制御", 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 48, No. 8, pp. 470-478, 2012.

④ 永瀬 純也, 佐藤 俊之, 嵯峨 宣彦, 鈴森 康一, "空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータのモデル予測制御", 日本フルードパワーシステム学会論文集, 査読有, Vol. 43,

No. 2, pp. 30-38, 2012.

⑤ Jun-ya NAGASE, Norihiko SAGA, Toshiyuki SATOH, Koichi SUZUMORI, "Development and Control of a Multi-Fingered Robotic Hand Using a Pneumatic Tendon-driven Actuator", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, Vol. 23, No. 3, pp. 339-346, 2012.

⑥ 永瀬純也, 脇元修一, 嵯峨宣彦, 鈴森康一, "空気圧剛性可変フィンガを有するバルーン型腱駆動ロボットハンドの開発", 設計工学, 査読有, Vol. 46, No. 9, pp. 41-47, 2011.

⑦ Jun-ya Nagase, Shuichi Wakimoto, Toshiyuki Satoh, Norihiko Saga, Koichi Suzumori, "Design of variable-stiffness robotic hand using pneumatic soft rubber actuators", Smart Materials and Structures, 査読有, Vol. 20, No. 10, 105015 (pp. 1-9), doi:10.1088/0964-1726/20/10/105015, 2011

[学会発表] (計4件)

① Jun-ya Nagase, Kazuki Hamada, Toshiyuki Satoh, Norihiko Saga and Koichi Suzumori, "Comparison between PFC and PID Control System for Tendon-driven Balloon Actuator", Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013), 2013年11月13日, Vienna (Austria).

② Jun-ya Nagase, Toshiyuki Satoh, Norihiko Saga, Koichi Suzumori, "Predictive Functional Control System for Stroke Control of a Pneumatic Tendon-driven Balloon Actuator", Proc. of The 19th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (Romansy 2012), 2012年6月13日, Paris (France).

③ Jun-ya Nagase, Toshiyuki Satoh, Shuichi Wakimoto, Norihiko Saga, Koichi Suzumori, "Predictive functional control of a finger using a pneumatic tendon-driven actuator", Proc. of International Bionic Engineering Conference (BION2011), 2011年9月18日, Boston (USA).

④ 永瀬 純也, 佐藤 俊之, 嵯峨 宣彦, 鈴森 康一, "空気圧バルーンを用いた腱駆動フィンガの予測機能制御", 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2011年12月25日, 京都府京都市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永瀬 純也 (NAGASE, Jun-ya)

龍谷大学・理工学部・助教

研究者番号: 70582245