空気圧ラバーレス人工筋肉拮抗駆動システムの剛性を考慮した位置制御

齋藤 直樹^{*1}, 佐藤 俊之^{*1}

Position control in consideration of stiffness of antagonistic drive system using rubberless artificial muscle

Naoki SAITO^{*1} and Toshiyuki SATOH^{*1}^{*1} Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Akita Prefectural University
84-4 Aza Ebinokuchi, Tsuchiya, Yurihonjo-shi, Akita 015-0055, Japan

Received 30 September 2014

Abstract

This paper describes position control in consideration of tuning of passive compliance characteristic of the antagonistic drive system using rubberless artificial muscle. The rubberless artificial muscle is a pneumatic actuator similar to McKibben artificial muscle. The antagonistic drive system using pneumatic artificial muscle can control antagonistic position. In addition, it has a passive compliance characteristic vary with inner pressure. Therefore, this system has a possibility to control antagonistic position with adjusting passive compliance characteristic. In this paper, we confirm the rubberless artificial muscle has a variable stiffness characteristic experimentally. And we derive an equation model that shows the relation between passive stiffness characteristic and antagonistic force of this system. Next, we explain the contraction displacement linearization system (CDLS). This system decides the inner pressure based on the contraction displacement and contraction force. This system also performs linearization of the nonlinear characteristics of contraction displacement. We confirmed a possibility to realize the antagonistic position control with adjusting passive stiffness of the antagonistic drive system by using this system experimentally.

Key words : Passive stiffness, Rubberless artificial muscle, Pneumatic actuator, Antagonistic drivesystem, Position control

1. 緒 言

近年、人の動作をサポートするパワーアシストデバイス(Kobayashi, et al., 2004)や、人と共存するロボット(Tondu, et al., 2005)など、人とのインタラクションを考慮したメカトロニクスにおいて空気圧人工筋肉の適用が行われている。こうした技術では、人に対する安全性が重要であり、それに加えて人に違和感や不快感を与えないような正確な動作の実行が求められるが、空気圧人工筋肉は軽量であり、また空気の圧縮性による柔らかさもあるため、衝突に対して高い安全性を有しているといえる。また一方で、空気圧人工筋肉を人の筋骨格系と同様に拮抗駆動システムにすることで、位置の制御が実現できる(陳, 渡辺, 1996)(藤本他, 2007)だけでなく、システムの剛性も考慮できることから、人に違和感や不快感を与えないシステムの実現の可能性も有していると考えられる。

空気圧人工筋肉の拮抗駆動システムにおける剛性については様々な研究がなされている。はじめに、Hogan は生体筋肉の拮抗配置により、各筋力の差によって関節屈曲トルクを発揮し、各筋力の和によって関節インピーダンスを調節する機能がある事を示した(Hogan, 1984)。このモデルは双線形モデルとして人の手首関節でも同様の機能がある事が辻らによって示され(辻他, 1998)、義肢の制御へ応用されている(伊藤, 辻, 1985)。このように、筋肉の拮抗駆動システムには、単に関節トルクを出力させるだけでなく、関節インピーダンスの調節が機能として含まれていることが明らかになってきた。則次らは人工筋肉を用いた拮抗駆動システムが対象物に接触した場

合の接触力の調節として、コンプライアンス制御性能について報告している(則次他, 1994). 山下らは, コンプライアンス制御だけでなく, 双線形モデルに基づいて関節剛性の調節の可能性も示している(山下他, 1995). また, 中村らは, 剛性を目標値とし, システム内から推定する関節剛性をフィードバックして目標剛性にする事を提案している(Nakamura, et al., 2011). このように, いずれの手法も基本的には外力が加わった際に, 外力をフィードバックして力と変位の関係を調節するものである.

一方で, 双線形モデルで示された関節インピーダンスについてはその役割があまり明確でない(Hogan, 1984)(辻他, 1998)こともあり, あまり注目されていなかった. 外力に依存せずに関節インピーダンスを設定できるということは, このパラメータは外力に対するパッシブな特性と捉えることができる. つまり, フィードバック系で補償できないような外力の入力に対しての拮抗システムの柔らかさを示すものであり, 安全性や柔らかさが求められる機械システムの特性として重要であるといえる. しかし, 人工筋肉を用いた拮抗駆動システムで位置制御を行った際に, パッシブな特性として剛性を設定可能か, また, その時の剛性特性については調べられていない.

そこで本報告では, ラバーレス人工筋肉(齋藤他, 2012)の拮抗駆動システム(Saito, et al., 2013)を用いた, パッシブな剛性を考慮した拮抗位置制御について検討する. この中でははじめに, ラバーレス人工筋肉が等尺性収縮特性から可変剛性要素としてモデル化が可能であることを示す. 次に, 拮抗駆動モデル式の導出と, パッシブな剛性を実現するための制御システムを提案し, パッシブな剛性特性の調査と, これを含む拮抗位置制御の実現の可能性について実験を通して確認し, 本質的な安全性や柔らかさを持つ機械システムにおける提案手法の有用性を示唆する.

2. ラバーレス人工筋肉と拮抗駆動システム

2・1 ラバーレス人工筋肉

本研究で用いるラバーレス人工筋肉(RubberLess Artificial Muscle: RLAM)を図1に示す. ラバーレス人工筋肉は, McKibben 型ゴム人工筋肉と基本構造や駆動原理が同じであり, McKibben 型ゴム人工筋肉のゴムチューブを, 非伸縮素材のエアバッグに置き換えたものである.

図2は, ラバーレス人工筋肉の収縮力が一定のときの圧力と収縮量の関係を表している. この結果より, 大き

Fig. 1 Rubberless artificial muscle

Fig. 2 Relation between inner pressure and contraction displacement.

Fig. 3 Isometric contraction characteristic of RLAM.

Fig. 4 Relation between gradient of isometric contraction characteristic and pressure.

な収縮力が必要な場合、収縮変位は小さくなり、また、圧力と収縮変位の関係は非線形であることがわかる。人工筋肉の収縮変位の変化は、筋長が短くなるにつれて小さくなり、収縮変位に関するヒステリシスを有することもある。これらの特性が、ラバーレス人工筋肉のモデル化および制御を難しくしている。

一方、人工筋肉を拮抗駆動システムに用いる場合、拮抗駆動システムの位置と等価である人工筋肉の筋長に対して、条件に応じて様々な収縮力を発揮することが求められる。このことから、人工筋肉の拮抗駆動システムにおいては、各人工筋肉の等尺性収縮特性を出力特性としてみなすことが可能であると考えられる。図3はラバーレス人工筋肉の等尺性収縮特性である。図3より、圧力 P が一定の場合、収縮力 F は人工筋肉の最大収縮量からの伸び X と線形の関係を有しているとみなすと、次式で表すことができる。

$$F = KX \quad (1)$$

ここで、 K は剛性係数であり、図3の各圧力の結果の傾きを表している。この剛性係数 K は加える圧力によって変化する。図4はこの剛性係数と圧力の関係であり、線形関係であることから、RLAMは圧力により剛性を変えられる可変剛性アクチュエータと見なすことができる。ここで、剛性 K は定数 k を用いて kP とすることができるので、RLAMの特性は式(2)のように改めることができる。

$$F = kPX \quad (2)$$

このようにRLAMは、拮抗駆動システムに適用し、等尺性収縮特性を出力特性とすることで可変剛性要素とみなすことができ、拮抗駆動システムによる剛性制御の実現の可能性を有するアクチュエータであると言える。

Fig. 5 Experimental setup of the RLAM antagonistic drive system.

2・2 拮抗駆動システム

図5に、本研究で扱うRLAM拮抗駆動システムを示す。2本のRLAMを同一軸上に配置し、それぞれの片端をベースに固定し、もう一端を引っ張り型ロードセル（ロードセル#1）で接続する。ロードセル#1はスライドガイドを介して一軸方向に移動することができる。この各RLAMとロードセル#1が繋がれたところを拮抗点と呼ぶことにし、この拮抗点の位置はポジションセンサで、両側のRLAMが発揮する拮抗力をロードセル#1で計測する。拮抗点には外から加わる外力を計測するロードセル#2も取り付けられている。各RLAMの圧力は、電空レギュレータ(IVT2031:SMC)により調節する。また、計測と制御はPC上のMATLAB/Simulink®を通して行う。これにより、外力に対して決められた剛性を持つ位置の制御を行う。

3. 拮抗駆動システムの剛性モデル

拮抗駆動システムでは、拮抗位置の他に、拮抗力を調節することが可能である。拮抗位置と拮抗力を調節することは、拮抗位置に生じる外力に対する剛性を調節することに等しいといえる。ここでは、先に述べたように、RLAMを可変剛性モデルと見なした場合の、拮抗駆動システムの剛性モデルを導出する。そして、このモデルから、拮抗位置と拮抗力の調節の必要性についてまとめる。

図6は拮抗駆動システムのモデル図である。各RLAMの最大収縮量からの伸びが等しいところを中立位置 x_c とする。ここからの変位を x とする。また、この時発生している拮抗力を F_A とする。拮抗位置に外力 ΔF を加えることで、変位 Δx が発生する。

中立位置 x_c と変位 x を用いて各RLAMの状態を求めると、式(2)より次の式になる。

$$F_A = kP_1(x_c + x) \quad (3)$$

$$F_A = kP_2(x_c - x) \quad (4)$$

ここで、外力 ΔF を加えた時に各RLAMが発揮する力をそれぞれ Δf_1 , Δf_2 とすると、各RLAMの状態と、外力 ΔF とそれぞれのRLAMに生じる力 Δf_1 , Δf_2 の関係は以下となる。

$$F_A + \Delta f_1 = kP_1(x_c + x + \Delta x) \quad (5)$$

$$F_A + \Delta f_2 = kP_2(x_c - x - \Delta x) \quad (6)$$

$$\Delta F = \Delta f_1 - \Delta f_2 \quad (7)$$

Fig. 6 Antagonistic force and position of RLAM antagonistic drive system.

ここで外力 ΔF とそのときの変位 Δx の関係を考えると、式(5)および式(6)に関しては、外力によって変位 Δx が発生し、そのとき拮抗位置まわりに生じている力が Δf_1 と Δf_2 であることから、次のようになる。

$$\Delta f_1 = kP_1 \Delta x \quad (8)$$

$$\Delta f_2 = -kP_2 \Delta x \quad (9)$$

したがって、外力 ΔF と変位 Δx との関係は、式(7)を用いると次のようになる。

$$\Delta F = k(P_1 + P_2) \Delta x \quad (10)$$

よって、このシステムの剛性 K_{sys} は次式となる。

$$K_{sys} = k(P_1 + P_2) \quad (11)$$

ここで、式(3)と式(4)を式(11)に代入することで、システムの剛性 K_{sys} を実現するために必要な拮抗力 F_A と拮抗位置 x の関係式が、次のように求められる。

$$K_{sys} = \frac{2x_C}{(x_C + x)(x_C - x)} F_A \quad (12)$$

この結果より、システム剛性 K_{sys} は拮抗点の位置 x と力 F_A によって変化することが分かる。システム剛性 K_{sys} を目標どおりに実現するためには、拮抗点の位置 x と拮抗力 F_A を連続的に変化させる必要がある。

4. 拮抗点の制御

RLAM 拮抗駆動システムの剛性制御においては、各 RLAM の収縮変位と収縮力の両方のパラメータから内圧を決定することになる。このことを考慮し、RLAM の線形化を目的として、力学平衡モデルを用いる(Sato, et al., 2012)。しかしこの力学平衡モデルは精度が不十分であることから、このモデルだけで RLAM の完全な線形化は難しい。従って、このモデルをフィードフォワード項とし、収縮変位に関するモデル誤差をフィードバック項で補償することとした。この力学平衡モデルとフィードバック制御を併用した収縮変位に関する線形化システムを Contraction Displacement Linearization system (CDLS)と呼ぶことにする。これにより、モデルを用いない場合と比べて、収縮力を考慮した圧力を決定することができ、また、圧力と収縮変位が有する非線形特性の補償が期待できることから、収縮変位制御の応答特性の向上の可能性もあるといえる。

本研究で用いた力学平衡モデルは式(13)、(14)で表される(Sato, et al., 2012)。

Table 1 Test parameters of the mechanical equilibrium model

Natural Length L_0 [mm]	165
Mesh angle when relaxing θ_0 [deg]	20
Diameter when relaxing D_0 [mm]	21
Friction coefficient μ	0.038

Fig. 7 Calculation result of mechanical equilibrium model.

$$F_{am} = \frac{l_c^2}{n} \left\{ \frac{1}{4\pi n} (3\cos^2 \theta_c - 1) - (\mu \sin \theta_c \cos \theta_c) \right\} P \quad (13)$$

$$X_{am} = L_0 - l_c \cos \theta_c \quad (14)$$

F_{am} が収縮力、 P が圧力である。 l_c と n はそれぞれ、メッシュスリーブを構成する素線長さ、素線巻数である。また θ_c がスリーブのメッシュ角度であり、収縮量 X_{am} と直接関係があるパラメータである。各パラメータは実際のサイズを基に試行錯誤的に調整して決定し、表1に示すパラメータを用いる事にした。モデルの計算結果を図7に示す。図7ではRLAMへの負荷として $F_{am} = 50N$ を設定している。このため、収縮動作を行う前に、この負荷と釣り合うための圧力が必要である。モデル計算結果は内圧が約0.01MPaに到達するまで収縮動作を行わず、ここからさらに圧力を増加することで収縮変位量も増加する。この動作は実際のラバーレス人工筋肉でも見られる動作であり、このモデルはラバーレス人工筋肉の収縮変位が0mm付近の動作をよく表現している。また、ヒステリシスは表現されておらず、ヒステリシスループの中央を通るような計算結果が得られている。

本報告では、各RLAMにCDLSを適用して拮抗駆動システムの剛性調整と位置制御を行う。これを実現するために、拮抗システムの剛性と各RLAMが発揮する拮抗力 F_A との関係を表した式(12)を考慮して位置制御を行う。この式(12)は、各RLAMが持つ可変剛性要素の特性を考慮して導出した関係式である。従って、式(12)の関係を実現することは、その時の拮抗位置において、各RLAMの剛性を拮抗システムの剛性 K_{sys} が実現できるように調節しているということであり、パッシブに剛性 K_{sys} が実現できている状態である。従って、外力 ΔF とその時の変位である Δx が拮抗駆動システムから見えないうにすれば、外力に影響を受けず、パッシブな剛性が達成されることになる。

この挙動を実現するために、本研究では図8に示すブロック線図に基づいて剛性調整と位置制御を行い、パッシブな剛性が実現可能か、実験的に確認する。

5. 実験と考察

5・1 拮抗位置と拮抗力について

Fig. 8 Block diagram of passive stiffness realization with antagonistic position control.

式(12)では、各 RLAM の剛性を表現するパラメータとして拮抗力 F_A が含まれている。従って、パッシブな剛性を精度良く実現するためには、拮抗位置と拮抗力の精度が重要である。そこではじめに、前章で示した CDLS による拮抗位置と拮抗力の出力について確認する。

ここでは、図 8 に示す制御系にステップ関数状に目標拮抗位置 x_r を与え、外力 ΔF を与えずに、拮抗位置と拮抗力の定常応答を確認した。拮抗力 F_A が 10 N のときは、目標拮抗位置を -15 mm から +15 mm まで 5 mm 間隔で与えた。また、拮抗力が $F_A = 30$ N, 50 N, 80 N のときは、目標拮抗位置を ± 12 mm, ± 10 mm, ± 5 mm, 0 mm で与えた。ステップ応答が十分に一定値に収束した状態における拮抗位置および拮抗力の定常値を測定した。得られた結果を図 9 と図 10 にそれぞれ示す。

図 9 より、拮抗位置に関しては目標値どおりの結果となっているのに対し、図 10 の結果から、拮抗力は目標値を変えることで定性的に変化はみられるものの、定量的には異なる結果となった。特に F_A が 30 N の場合は比較的誤差が小さいものの、それ以外の場合は、 F_A が 30 N から離れるにつれて誤差が大きくなる傾向がみられる。また、全ての拮抗力の条件において、拮抗位置が 0 mm から ± 5 mm 付近までは比較的目標値に近い値が得られているものの、それ以上移動した場合は拮抗力が若干弱くなる傾向が見られた。

これは、図 7 で示した結果が $F_A = 30$ N の時の場合であり、ヒステリシスループの中央を通るような結果となっているが、 F_A が 50 N や 80 N などの場合はヒステリシスループの中央からはずれ、誤差が大きくなる傾向があるためと考えられる。また、拮抗位置が 0 mm から離れるに従って拮抗力の誤差が大きくなる原因は、ヒステリシスが原因であると考えられる。本実験システムでは初期動作として拮抗位置 0 mm で圧力を調節

Fig. 9 Steady state value of antagonistic position using CDLS.

Fig. 10 Steady state value of antagonistic force using CDLS.

し、そこから拮抗位置を動かしている。つまり、初期動作の段階ではどちらの RLAM も圧力を増加させ、釣り合ったところから動作が始まる。このことから、図 7 においてはヒステリシスループの下側に沿って指定圧力まで増加するため、いずれの RLAM も同じ圧力が入力されている。しかし、そこから拮抗位置を動かすことで、片側は増圧、もう一方は減圧となるため、ヒステリシスの影響により、拮抗力が異なってしまったものとする。

以上の事から、CDLS は拮抗位置に関して良好な性能を発揮しているが、拮抗力については、目標値を変えることで変化はみられるものの、十分な精度は得られないことがわかった。

5・2 剛性を考慮した拮抗位置制御

次に、剛性を考慮した拮抗位置の制御を行った。ここではパッシブな剛性が実現できているか、また、拮抗位置の変化による剛性特性の変化を実験的に確認した。実験方法としては、図 8 のシステムで拮抗位置を制御し、その後外力 ΔF を手動で与え、その時の外力 ΔF とそれによる拮抗位置からの変位 Δx を計測した。このとき、外力 ΔF とその時の変位 Δx とともに定常値を計測することとした。システムの剛性 K_{sys} は 5 kN/m と 10 kN/m の 2 種類で実験を行った。実験の結果を図 11 に示す。

この結果から、拮抗位置を変化させてもシステム剛性 5 kN/m、10 kN/m とともに、ほぼ設定した剛性が達成されていることがわかる。また、外力の値を大きくしても目標の剛性が達成されている。このことから、本手法では定常特性において目標剛性を達成できると考える。

次に、拮抗位置のステップ応答と剛性の関係を図 12 に、外力と剛性の関係を図 13 に示す。図 12 と図 13 は同一の実験で得られた結果であり、目標拮抗位置は +5 mm、目標剛性は 10 kN/m である。

Fig. 11 Experimental result of passive stiffness with antagonistic position control.

Fig.12 Step response of antagonistic position and stiffness.

Fig. 13 Experimental result of stiffness and outer force.

図 12 の結果から、定常誤差が小さく、位置制御は実現できているといえる。しかし、拮抗位置が目標値に収束するまで約 5 s ほどかかっており、即応性は十分とはいえない。この点については、動特性を含めた制御系の構築などにより改善が期待できる。

一方、図 13 からは、外力の印加に合わせて剛性が変化していることがわかる。外力を加えはじめたときとやめたときに急激に剛性値が上昇しており、それ以外では目標剛性付近で安定している傾向がみられる。剛性値が上昇している原因は、外力を加えはじめたりやめたりした瞬間に、外力による変位が 0 mm に近い値になり、計算上剛性値が大きくなったものと考えられる。実際の挙動をみてみると、図 12 からも外力を与えた瞬間において拮抗位置は滑らかに変化しており、外力に対してパッシブな剛性が実現できているものといえる。したがって、剛性制御に求められる柔らかさを備えた拮抗位置制御はできているといえる。

以上のことから、本報告で提案する方法は、パッシブな剛性を考慮した拮抗位置制御の実現に有効であるといえる。

6. まとめ

本研究では、ラバーレス人工筋肉拮抗駆動システムの剛性を考慮した位置制御の実現の可能性について、実験的に確認した。得られた結果を以下にまとめる。

1. ラバーレス人工筋肉は等尺性収縮特性の観点で可変剛性要素として見なすことが可能である。
2. ラバーレス人工筋肉を可変剛性要素として拮抗駆動システムを構成した場合の、システム剛性モデル式を示した。また、外力に影響を受けず、パッシブな剛性特性が得られる制御システムを提案した。
3. 提案したシステムは、拮抗位置を制御しつつ、定常特性としてパッシブな剛性の実現が可能であることを実験により確認した。

以上の結果から、本報告で提案する手法は、本質的な安全性や柔らかさが求められる機械システムの位置制御において有用であるといえる。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25350672 の助成を受けて行われたものである。

文 献

- 藤本真作, 小野敏郎, 逢坂一正, 趙子磊, 空気圧ゴム人工筋のモデリングと拮抗駆動型システムの制御系設計, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.730 (2007), pp.1777-1785.
- Hogan, N., Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.29, No.8 (1984), pp.681-690.
- 伊藤宏司, 辻敏夫, 筋骨格の双線形特性と義肢制御への応用, 電気学会論文誌, Vol. 105-C, No. 10 (1985), pp. 201-208.
- 陳相浩, 渡辺桂吾, PID およびファジィ制御器によるゴム人工筋ロボットマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 599 (1996), pp.2706-2713.
- Kobayashi, H., Shiiba, T. and Ishida, Y., Realization of all 7 motions for the upper limb by a muscle suit, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.5 (2004), pp. 504-512.
- Nakamura, T., Tanaka, D. and Maeda, H., Joint stiffness and position control of an artificial muscle manipulator for instantaneous loads using a mechanical equilibrium model, Advanced Robotics, Vol. 25 (2011), pp.387-406.
- 則次 俊郎, 安藤文典, 吉川智之, ゴム人工筋の制御性能, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 60, No. 570 (1994), pp. 557-562.
- 齋藤直樹, 佐藤隆智, 小笠原隆倫, 佐藤俊之, 空気圧ラバーレス人工筋の開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 43, No. 4 (2012), pp.102-108.
- Saito, N., Sato, T., Ogasawara, T., Takahashi, R. and Satoh, T., Mechanical equilibrium model of rubberless artificial muscle and application to position control of antagonistic drive system, Industrial Robot: An International journal, Vol. 40, No. 4 (2013), pp.347-354.
- Sato T., Saito, N., and Satoh, T., Joint angle control of a manipulator driven by rubberless artificial muscle using a static mechanical equilibrium model, Procedia Engineering, Vol.41 (2012), pp.671-677.
- Tondu, B., Ippolito, S. and Guiochet, J., A seven-degrees-of-freedom robot-arm driven by pneumatic artificial muscles for humanoid robots, The International Journal of Robotics Research, Vol. 24, No. 4 (2005), pp.257-274.
- 辻敏夫, 加藤荘志, 柴田智章, 金子真, 手首関節の等尺性筋収縮における伸張反射機構の動態と関節インピーダンスの変化, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.11 (1998), pp.1698-1705.
- 山下忠, 武内顕一, 奥野康, 相良慎一, 拮抗駆動関節による剛性とトルクの制御: 空気圧アクチュエータによる実験的検討, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5 (1995), pp.666-673.

References

- Fujimoto, S., Ono, T., Ohsaka, K. and Zhao, Z., Modeling of Artificial muscle actuator and control design for antagonistic drive system, Transactions of the JSME C, Vol.73, No.730 (2007), pp.1777-1785 (in Japanese).
- Hogan, N., Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.29, No.8 (1984), pp.681-690.
- Ito, K. and Tsuji, T., The bilinear characteristics of muscle-skeletomotor system and the application to prosthesis control, IEEE Transactions on Electrical and electronic Engineering, Vol. 105-C, No. 10 (1995), pp.201-208 (in Japanese).
- Jin, S. and Watanabe, K., Experiments on position and force hybrid control using PID and Fuzzy controllers for a robotic manipulator with artificial rubber muscles, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, series C, Vol. 62, No. 599 (1996), pp.2706-2713 (in Japanese).
- Kobayashi, H., Shiiba, T. and Ishida, Y., Realization of all 7 motions for the upper limb by a muscle suit, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.5 (2004), pp. 504-512.
- Nakamura, T., Tanaka, D. and Maeda, H., Joint stiffness and position control of an artificial muscle manipulator for

- instantaneous loads using a mechanical equilibrium model, *Advanced Robotics*, Vol. 25 (2011), pp.387-406.
- Noritsugu, T., Ando, F. and Yoshikawa, T., Control performance of rubber artificial muscle, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, series C*, Vol. 60, No. 570 (1994), pp. 557-562 (in Japanese).
- Saito, N., Sato, T., Ogasawara, T. and Satoh T., Development of pneumatic rubberless artificial muscle, *Transactions of the Japan Fluid Power System Society*, Vol. 43, No. 4 (2012), pp. 102-108 (in Japanese).
- Saito, N., Sato, T., Ogasawara, T., Takahashi, R. and Satoh, T., Mechanical equilibrium model of rubberless artificial muscle and application to position control of antagonistic drive system, *Industrial Robot: An International journal*, Vol. 40, No. 4 (2013), pp.347–354.
- Sato T., Saito, N. and Satoh, T., Joint angle control of a manipulator driven by rubberless artificial muscle using a static mechanical equilibrium model, *Procedia Engineering*, Vol.41 (2012), pp.671–677.
- Tondu, B., Ippolito, S. and Guiochet, J., A seven-degrees-of-freedom robot-arm driven by pneumatic artificial muscles for humanoid robots, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4 (2005), pp.257–274.
- Tsuji, T., Kato, T., Shibata, T. and Kaneko, M., The relations between the excitability of the stretch reflex system and changes in the wrist joint impedance during isometric muscle contraction in human, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 34, No. 11 (1998), pp. 1698-1705 (in Japanese).
- Yamashita, T., Takeuchi, K., Okuno, Y. and Sagara, S., Control of stiffness and torque by antagonistically driven joint: experimental study using air actuated mechanism, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 13, No. 5 (1995), pp. 666-673 (in Japanese).