

# 人に対して安全な多自由度／空気圧人工筋ロボットアームの開発

Development of Human-Safe, Multi-Degree-of-Freedom Robot Arm using Pneumatic Muscles

岡崎 安直  
Yasunao Okazaki

小松 真弓  
Mayumi Komatsu

津坂 優子  
Yuko Tsusaka

山本 正樹  
Masaki Yamamoto

## 要 旨

家事支援ロボットなど、将来、家庭内で働くロボットは人との接触が不可避であり、本質安全のため柔軟かつ軽量であることが不可欠である。こうした背景から、筆者らは空気圧人工筋をアクチュエータとして使用することで軽量柔軟な構造を実現した多自由度のロボットアームを開発した。また、関節トルクに関するマイナーループと拮抗（きっこう）する空気圧人工筋の内部圧力差に関するマイナーループを並列的に併用する制御系を構成することで、振動しやすい空気圧人工筋ロボットアームでも安定的な軌道追従制御や、力制御を実現した。さらに、ロボットを仮想的なバネ・マス・ダンパーとして動作させるインピーダンス制御に本制御系を展開し、人とロボットの協調作業を実現した。

## Abstract

Robotic systems intended for domestic housekeeping or elderly care tasks will have interaction with humans and therefore demand an intrinsically safe design. Conventional robotic systems are driven by heavy, high-power, high-stiffness electric motors, making them unsafe for human coexistence. To overcome this problem, we have developed a robotic arm system using pneumatic muscle actuators, which is intrinsically safe given its low weight and pliant structure. In this paper we present the design of the robot arm and associated control system, showing that the robot has positioning- and force-control accuracy sufficient for daily domestic tasks.

## 1. はじめに

家事支援ロボットや介助・介護ロボットなど、将来、家庭内で働くロボットは人との接触が不可避であり、本質安全のため柔軟かつ軽量であることが不可欠である。ところが、従来の電磁モータを利用するロボットは作業を正確にこなす反面、構造が重く硬くなり、人間にとっては危険な存在である。また、多彩で時々刻々変化する家庭内環境において、センサなどにより外環境を認識し安全に、かつ自律的に動作するロボットの実現にはまだ時間を要する。こうした背景から、筆者らは機構的に柔軟かつ軽量でありながら、適度な位置制御精度と力制御精度をもち、認識技術を使わずに人と協調することで支援タスクをこなすことができる、人に対して安全な軽量柔軟ロボットアームの開発に取り組んでいる<sup>1), 2), 3)</sup>。

人に対して安全なロボットアーム開発の主な課題は、以下であると考える。

- (1) 制御による衝突回避などが機能せず、たとえ衝突が発生しても、軽量柔軟であることから本質安全な機構の開発
- (2) 一般的に非線形特性になりやすく振動の発生しやすい柔軟構造に対して、安定的な位置・力制御を可能とする制御技術の開発

本論文では、機構の課題である(1)に対し、空気圧人工筋をアクチュエータとして使用することで軽量柔軟構造を実現した空気圧人工筋ロボットアームを開発したの

で機構、センサなどの構成について説明する。

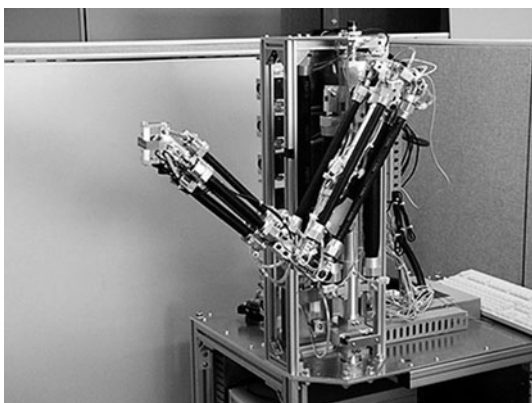
また、制御の課題である(2)に対しては、関節トルクに関するマイナーループと拮抗する空気圧人工筋の内部圧力差に関するマイナーループを並列的に併用する制御系を構成することで、振動しやすい空気圧人工筋ロボットアームでも安定的な軌道追従制御や、力制御を実現したので制御手法について説明するとともに、制御実験の結果を示す。

さらに、本制御系をベースに、ロボットを仮想的なバネ・マス・ダンパーとして動作させるインピーダンス制御に本制御系を展開し、人がかける力に応じてロボットを動作させることでパワーアシストなど人とロボットの協調作業を実現する技術<sup>4), 5), 6)</sup>を開発したので実作業への応用実験について報告する。

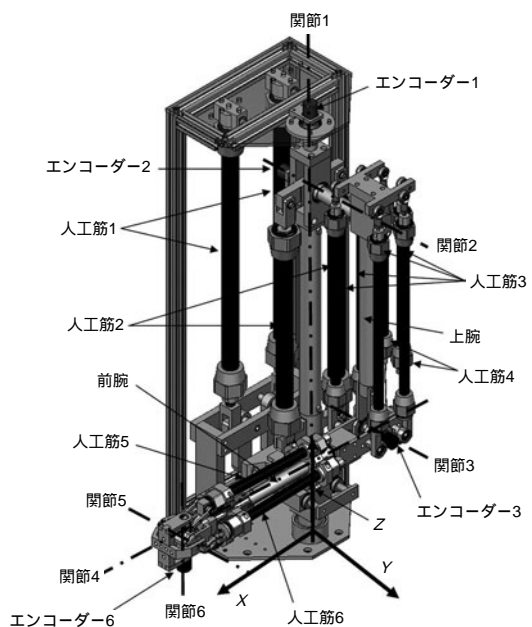
## 2. 空気圧人工筋ロボットアームの機構

第1図に開発した空気圧人工筋ロボットアームの写真を、第2図に概略図を示す。

基本構成は、腕の中央部に位置する骨材を挟んで相対するように配置された1組のマッキベン型の空気圧人工筋が1つの関節を拮抗駆動する内骨格拮抗駆動型であり、歯車やワイヤなどを使用しないリンク結合によるダイレクト駆動方式を中心に構成した<sup>7), 8)</sup>。空気圧人工筋を採用することで関節に柔軟性をもつ構造とすることができるとともに、軽量なロボットアーム（上腕350 mm+前腕



第1図 空気圧人工筋ロボットアーム  
Fig. 1 Lightweight pliant robot arm using pneumatic muscles



第2図 空気圧人工筋ロボットアーム概略図  
Fig. 2 Schematic diagram of lightweight pliant robot arm using pneumatic muscles

300 mmの腕部だけの質量：3.5 kg, Z方向の最大出力=73.5 N)とすることができ、慣性の面から衝突時に相手に与える衝撃が小さい点でも安全性が高い構造であると言える。  
開発した空気圧人工筋ロボットアームは6自由度で構成され、6つの関節を14本の空気圧人工筋で駆動（関節3のみ片側2本ずつの計4本で駆動）する構成となっている。センサ類は、関節角度  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$  を計測するエンコーダ、アームの手先にかかる外力  $F = [f_x, f_y, f_z, n_x, n_y, n_z]^T$  を計測する6軸力センサに加え、後述の非線形補償のため、空気圧人工筋の内部圧力  $P = [P_{1a}, P_{1b}, P_{2a}, P_{2b}, P_{3a}, P_{3b}, P_{4a}, P_{4b}, P_{5a}, P_{5b}, P_{6a}, P_{6b}]^T$  を計測する圧力センサ

を設けた。

関節を拮抗駆動する1組の空気圧人工筋への空気圧の配分は、5ポートの方向流量比例制御弁で調整する構成とした。以降の3章で述べる制御系により、6個の方向流量比例制御弁を協調して動作させ、14本の空気圧人工筋を制御し、ロボットアームの手先位置・姿勢  $r = [x, y, z, \dots, \dots]^T$  や手先の発生する力  $F$  を制御する。

### 3. 空気圧人工筋ロボットアームの制御系<sup>3)</sup>

#### 3.1 動的制御、位置と力のハイブリッド制御法およびインピーダンス制御法の導入

開発した空気圧人工筋ロボットアームは、空気圧人工筋の柔軟性を有効に発揮させるため歯車などを使用しないリンク結合によるダイレクト駆動方式とした。しかしながら、ダイレクト駆動方式はアームのダイナミクスの影響を受けやすい構造であるため、ダイナミクスを考慮する動的制御を導入することで制御性能向上を目指す。また、外環境との接触を伴うさまざまな作業や人との協調作業に対応するため、力制御手法である位置と力のハイブリッド制御法およびインピーダンス制御法を採用する。

位置制御のためのトルク指令値は、動的制御に基づき

$$\tau_r = M(q)J_r^{-1}[-\ddot{J}_r(q)\dot{q} + (I-S)(K_{rp}r_e + K_{rd}\dot{r}_e + K_{rff}\dot{r}_d)] + g(q) \quad (1)$$

という非線形状態フィードバック則で与える。ただし、 $M(q)$  はロボットアームの慣性を表す行列、 $g(q)$  はロボットアームにかかる重力を表す項、 $J_r$  はロボットアームの手先速度と関節速度の関係を表す行列であるヤコビ行列（手先姿勢の変化速度をロール・ピッチ・ヨー角の時間微分で表現）、 $K_{rp}$ 、 $K_{rd}$ 、 $K_{rff}$  は位置制御補償器のゲイン、 $S$  は位置・力制御方向選択行列、 $I$  は単位行列である。

また、力制御のためのトルク指令値は

$$\tau_f = -S J_v^T K_{ff} \int_0^t F_e dt' \quad (2)$$

とする。ただし、 $K_{ff}$  は力制御補償器のゲイン、 $J_v$  はヤコビ行列（手先姿勢の変化速度を角速度ベクトルで表現）である。

ロボットアームへの関節トルク指令値  $\tau_d$  としては位置と力のハイブリッド制御法に従い

$$\tau_d = \tau_r + \tau_f \quad (3)$$

とする。

また、インピーダンス制御を行う場合、

$$r_{dm} = r_d + \Delta r_d \quad (4)$$

で表される  $r_{dm}$  を位置制御系への新たな目標値とする。ただし、 $r_d$  は

$$M_{ld}\Delta\ddot{r}_d + D_{ld}\Delta\dot{r}_d + K_{ld}\Delta r_d = F + F_{ld} \dots\dots\dots (5)$$

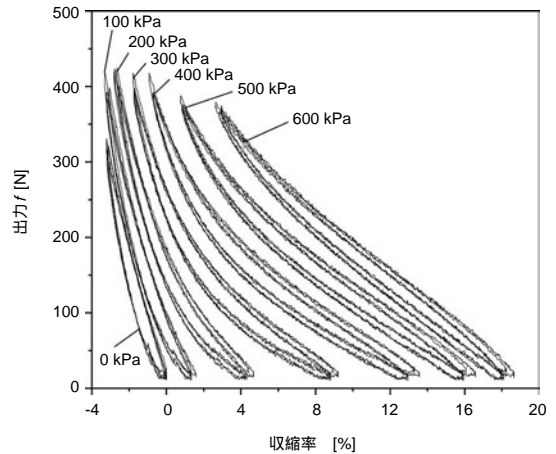
を満たす値であり、 $M_{ld}$ 、 $D_{ld}$ 、 $K_{ld}$  はインピーダンスパラメータの目標値、 $F_{ld}$  は力の目標値である。

3.2 空気圧人工筋モデルに基づくトルク制御系の開発

3.1節で説明した位置と力のハイブリッド制御系は(3)式で算出されるトルク指令値  $\tau_d$  を出力する構成であるため、空気圧人工筋により各関節に対し正確なトルクが発生されることが望ましい。そのために、空気圧人工筋のモデルに基づくトルク制御系をマイナーループ制御系として設けることにより、空気圧人工筋の非線形性を補償してトルク指令値  $\tau_d$  を正確に実現する制御系を構築することを考える。

空気圧人工筋のモデルの構築は、空気圧人工筋の特性の測定実験結果を基に行った。一例として、空気圧人工筋ロボットアームの第3関節の駆動に使用した内径10 mm、長さ279 mmの空気圧人工筋の特性測定結果を、第3図に示す。第3図のグラフが示すように、内部圧力を一定に保ち収縮率を変化させると収縮方向、伸張方向で経路が異なるヒステリシスが観測されるなど、非線形な特性が測定された。

以上の測定結果より、まず、出力  $f(P_i)$  と収縮率および圧力  $P_i$  ( $P_i = i \times 100\text{kPa}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 6$ ) の関係を、ヒステリシスの収縮方向時における出力と伸張方向時における出力との平均値を出力  $f(P_i)$  と考え、収縮率に関する以下の3次多項式で表現した。



第3図 空圧人工筋特性

Fig. 3 Force versus displacement of pneumatic muscle

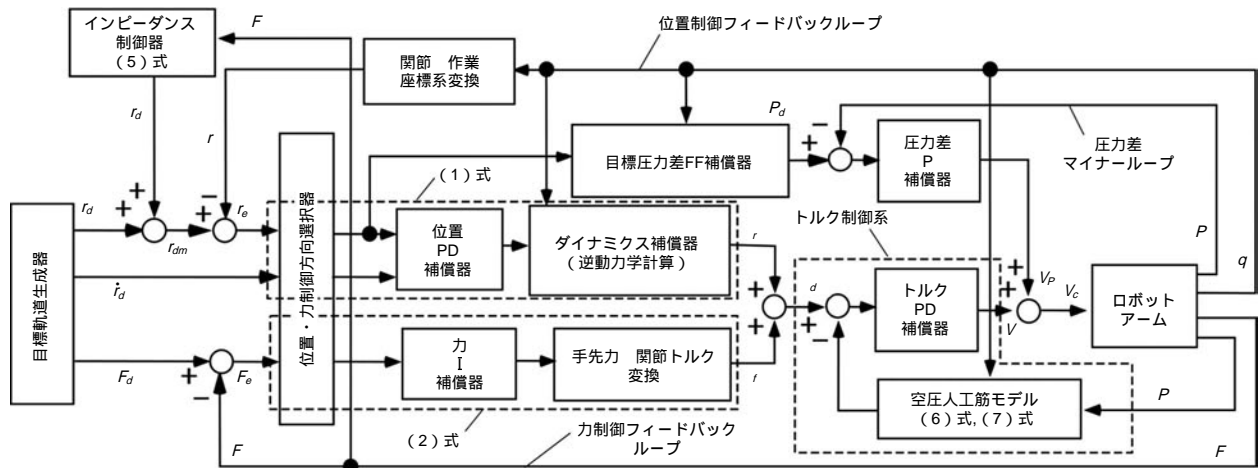
$$f(P_i, \epsilon) = a_0(P_i) + a_1(P_i)\epsilon + a_2(P_i)\epsilon^2 + a_3(P_i)\epsilon^3 \dots\dots\dots (6)$$

次に、直線補間を使い空気圧人工筋の出力を

$$f(P, \epsilon) = \frac{(P_{i+1} - P)f(P_i, \epsilon) + (P - P_i)f(P_{i+1}, \epsilon)}{P_{i+1} - P_i} \dots\dots\dots (7)$$

とした。ただし、 $P_i < P < P_{i+1}$  である。上記の(6)、(7)式によれば、圧力  $P$  と、関節角度  $q$  から幾何学的に計算される収縮率より空気圧人工筋の出力  $f(P, \epsilon)$  が算出できる。

空気圧人工筋ロボットアームを駆動するすべての空気圧人工筋の特性を測定し、各空気圧人工筋の特性を(6)、(7)式で表現し、トルク値に換算し全関節分をまとめ、関節駆動トルク算出のための空気圧人工筋モデル  $\tau(P, q)$  とする。この空気圧人工筋モデル  $\tau(P, q)$  とトルクPD補



第4図 制御系ブロック線図

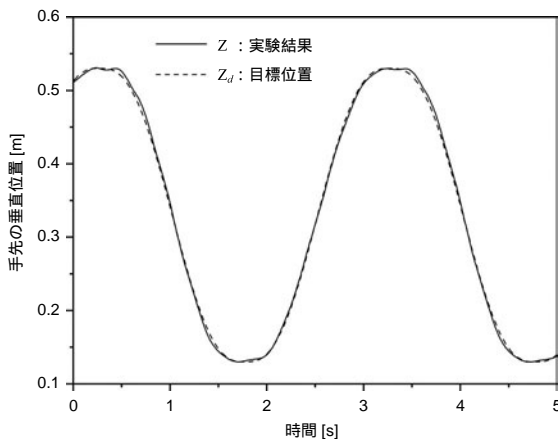
Fig. 4 Block diagram of control system

償器を設けることでトルク制御系を構成する。

以上設計した制御系のブロック線図を、第4図に示す。第4図の制御系ではトルクに関するマイナーループ制御系に加え、圧力差に関するマイナーループ制御系<sup>9), 10), 11)</sup>に定常特性改善のため目標圧力差フィードフォワード (FF) 制御系を組み合わせた制御系<sup>1)</sup>を併用し、それぞれの電圧指令値を加算した値を最終的な電圧指令値とする。

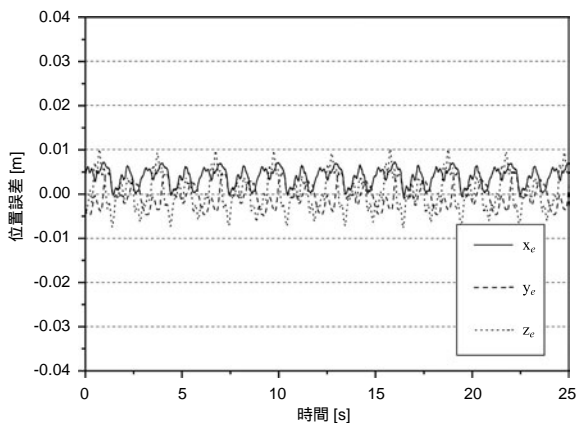
#### 4. 空気圧人工筋ロボットアームの位置制御実験

開発した制御系により空気圧人工筋ロボットアームを安定的に制御できるか検証するため、手先位置の制御実験を実施した。目標軌道は垂直0.4 mの距離を0.5 Hzの周期で手先を上下させる軌道追従制御である。軌道追従の制御結果を、第5図、第6図に示す。軌道追従の誤差は±0.01 m以内に納めることができおり、開発した制御系



第5図 軌道追従制御結果

Fig. 5 Trajectory tracking experiment with pneumatic muscle model



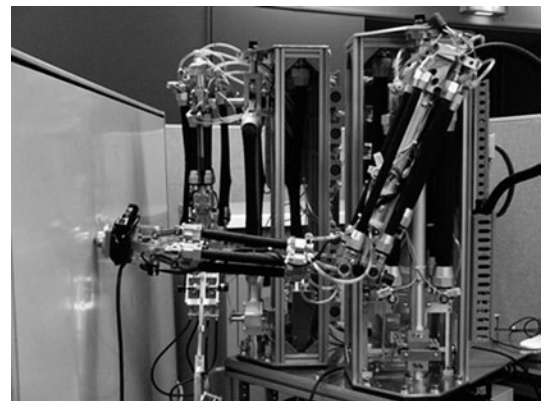
第6図 軌道追従誤差

Fig. 6 Trajectory tracking error with pneumatic muscle model

で空気圧人工筋の非線形性が補償され、振動無く安定的に動作できることが確認できた。

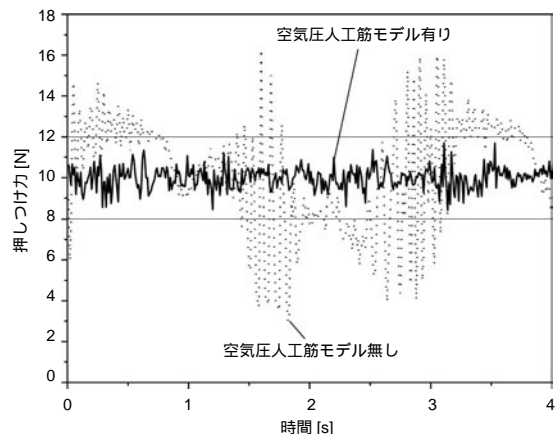
#### 5. 空気圧人工筋ロボットアームの力制御実験

次に、開発した制御系が力制御においても有効であるか検証するため位置と力のハイブリッド制御による力制御実験を実施した。目標動作は、第7図に示すように鉛直に立つ壁面に対しボールキャストを取り付けた手先を垂直に押しつけながら壁面に沿って0.2 mの距離を0.5 Hzの周期にて上下させる運動であり、壁面への目標押しつけ力  $F_{xd}$  を10 Nとした。第8図に壁面への押しつけ力の制御結果を示す。実線が開発した制御系による実験結果であり、点線はトルク制御系の代わりに圧力差マイナーループ制御系とすることで空気圧人工筋モデルを用いず、かつ位置制御系を分解速度制御とした制御系での結果である。空気圧人工筋モデルに基づくトルク制御系および目



第7図 力制御実験

Fig. 7 Force control experiment



第8図 力制御実験結果

Fig. 8 Results of force control experiment

標圧力差FF制御系 + 圧力差マイナーループ制御系を用いることにより力制御精度は  $10 \text{ N} \pm 2 \text{ N}$  に改善しており、力制御においても開発した制御系の有効性が確認できた。

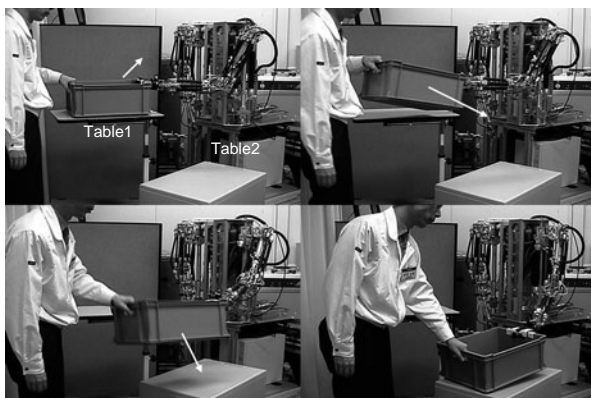
## 6. 空気圧人工筋ロボットアームのインピーダンス制御実験

さらに、開発した制御系がインピーダンス制御においても有効であるか検証し、実用的な作業への応用可能性を検討するため人とロボットによる物品（約3 kg）の協調搬送実験を行った。

作業内容は約0.2 mの高低差および約0.5 mの水平距離がある机（Table1, 2）の間での移動である。作業の様子を、第9図の連続写真に示す。

インピーダンス制御によれば、人がかける力に対してロボットアームが仮想的なパネ・マス・ダンパー系として動作するため人の動きに追従した動作が可能となる。

第9図の連続写真に示すように、トルク制御系や圧力差マイナーループ制御系による安定的な位置制御の効果により、空気圧駆動であっても安定的なインピーダンス制御が実現し、人がかける力に応じたロボットの動作が可能であることが確認できた。インピーダンス制御においても開発した制御系の有効性が検証でき、さらに実用的な作業への応用も十分可能であることが実証できたと考える。



第9図 協調搬送実験

Fig. 9 Coordinated task experiment

## 7. まとめ

空気圧人工筋を用いたロボットアームを開発し、機構、制御において以下を実現した。

- (1) 空気圧人工筋による柔軟性と人腕と同等サイズで質量3.5 kgの軽量性を特徴とする安全な機構を実現した。
- (2) 空気圧人工筋モデルに基づくトルク制御系および目

標圧力差FF制御系 + 圧力差マイナーループ制御系を設けることで空気圧駆動であっても軌道追従精度  $\pm 0.01 \text{ m}$  以下、力制御精度  $10 \text{ N} \pm 2 \text{ N}$  という適度な精度と安定的な動作が可能なる制御を実現した。

さらに、以上の機構、制御を実現したことにより、インピーダンス制御を使うことで人の動きに追従した動作が可能となり、人とロボットによる協調作業を実現できた。

第7図の力制御による動作は拭き掃除に、また第9図のインピーダンス制御による動作は協調搬送動作のようなパワーアシストとして展開可能であり、将来の家事支援作業への応用可能性についても確認できたと考える。

今後は、さまざまな外乱が働く現実の家庭環境においても安全に動作できるように、ロボスタ化を図るとともに、さまざまな家事支援、介護支援への応用、さらには工場で作業支援を行うロボットへの展開を検討する。具体的には、空気圧人工筋ロボットアームの軽量ハイパワーという特性を生かした、重量物ハンドリングのアシストを行うパワーアシストアームなどを検討していきたいと考える。

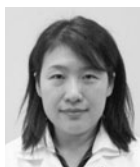
## 参考文献

- 1) 岡崎安直 他：内部圧力制御系による6自由度空気圧人工筋アームの位置決め精度の向上 第46回自動制御連合講演会予稿集 p.193 (2003).
- 2) 岡崎安直 他：空圧人工筋による人に対して安全な軽量柔軟ロボットアームの開発 第52回システム制御情報学会研究発表講演会予稿集 CD-ROM 4S1-5, p.339 (2008).
- 3) 岡崎安直 他：空圧人工筋による人に対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発 日本ロボット学会誌 28, No.3, p.62 (2010).
- 4) 鴻巣仁司 他：自動車組立作業支援装置スキルアシストの実用化 日本ロボット学会誌 22, No.4, p.508 (2004).
- 5) 加藤寛之 他：接触時の安定性を考慮したパワーアシスト装置のインピーダンス制御 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04 講演論文集 CD-ROM 1P1-H-36(1) (2004).
- 6) 積際徹 他：人間 - ロボット協調作業系において固有動特性を運動規範とする力学的相互作用の実現 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM 3E14 (2007).
- 7) 川嶋健嗣 他：繊維一体型空気圧ゴム人工筋を用いたロボットアームによる建設機械遠隔操縦 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM 1L17 (2003).
- 8) I. Boblan, et al. : A human-like robot hand and arm with fluidic muscles: Biologically inspired construction and functionality. Embodied Artificial Intelligence, p.160, Springer (2003).
- 9) 宮田慶一郎 他：空気圧ゴム人工筋の特性と制御 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '89 講演概要集 p.142 (1989).
- 10) 則次俊郎 他：ゴム人工筋の制御性能 日本機学会論文集 (C編) 60巻, 570号, p.557 (1994).
- 11) 則次俊郎 他：ゴム人工筋を用いたリハビリテーション支援ロボット 日本ロボット学会誌 13, No.1, p.141 (1995).

## 著者紹介



岡崎安直 Yasunao Okazaki  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.



小松真弓 Mayumi Komatsu  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.



津坂優子 Yuko Tsusaka  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.



山本正樹 Masaki Yamamoto  
先端技術研究所  
Advanced Technology Research Labs.  
工学博士