Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00233

Received date : 18 July, 2021

Accepted date : 12 November, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 24 November, 2021

湾曲型空気圧ゴム人工筋肉を用いた正二十面体型自歪ロボットの開発と駆動実験

石栗 尚弥^{*1}, 田中 厘来^{*1}, 戸森 央貴^{*2}

Development of self-deformation-robot with regular icosahedron structure using bending-type-pneumatic-artificial-muscle and drive experiment

Naoya ISHIGURI^{*1}, Riku TANAKA^{*1} and Hiroki TOMORI^{*2}

^{*1,*2} Department of Mechanical Systems Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University
4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata 992-0038, Japan

Abstract

Robots are becoming more familiar to humans, and soft robot that light and flexible and safety are attracting attention. We designed self-deformation-robot(SDR) for exploration and watching using bending-type-pneumatic-artificial-muscle (BPAM) which capable bending. This robot has a frame composed of BPAM and can move by deforming itself. Since the whole body of this robot consists of actuators, it can move from any posture. Furthermore, it has excellent shock absorption and can act in unknown environments without advanced sensing. First, we developed a robot with a regular icosahedron structure to solve the problems of the conventional regular hexahedron structure. Next, we installed a system on the robot and built a control method so that the robot could move wirelessly. After that, we conducted a running experiment of the robot and investigated whether it could move with the system installed. As a result, we achieved to drive the robot with developed system and controller. However, due to the strength problem of the connection part of BPAM, the output of BPAM cannot be maximized. In addition, the center of gravity of the robot shifted by the mass of the installed system, which making it hard to move. These will be resolved in the future.

Keywords : Soft robot, Artificial muscle, Pneumatic, Regular icosahedron, Flame structure

1. 緒 言

現在ロボットは様々な場所で用いられている。従来のロボットは工場のような人から離れた場所で用いられることが主流であったため、速度、精度、出力が重視されていた。しかし、近年ロボットは人の身近で用いられる機会が増えており、人に対する安全性や不確定要素にも適応できる能力が求められてきている。従来のロボットは接触を避けることで安全を確保していたが（センサと高速な演算で回避する方法もあるが、計算コストが高くなる(Hayakawa et al.,2005)）、人の身近でロボットを用いる上では人との接触は必ず起こりうる問題である。そのためロボットには人との接触時にも高い安全性が求められている。また人の身近では常に環境が変化しており、それらの環境に適応する必要がある。

そこで、これらの問題を解決してくれるものとして注目されているものがソフトアクチュエータである。ソフトアクチュエータは従来のアクチュエータと比べて軽量で柔軟なアクチュエータである(鈴森, 2019)。軽量であるため速度を維持しつつ運動エネルギーを小さくすることができ、柔軟であるため人との接触時に衝撃を吸収してくれて人に対しての安全性は高い。そのほかにも、高いバックドライバビリティを活かした環境適応能力を有しており、精緻な路面形状センシングやフィードバックを行うことなく周辺環境に応じた出力を提供することが期待できる(鈴森, 2013)(田熊, 2019)。そのため従来のロボットで用いられてきた電磁モーターやシリンダーなど

No.21-00233 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00233]

^{*1} 学生員, 山形大学 大学院 理工学研究科 機械システム工学専攻 (〒992-0038 山形県米沢市城南 4-3-16)

^{*2} 正員, 山形大学 大学院 理工学研究科 機械システム工学専攻

E-mail of corresponding author: tnf50170@st.yamagata-u.ac.jp

のアクチュエータを用いるよりもよりシンプルかつ安価でソフトな動きを実現することが可能である(櫻井, 2019). そのような点からソフトアクチュエータが期待されている.

ソフトアクチュエータには McKibben 型人工筋肉(Nozaki and Noritsugu,2014)(Nakanishi et al.,2016)や形状記憶合金(石川, 田中, 2005)(Shaoze et al.,2012), 高分子アクチュエータ(Asaka,2016)(杉野, 2015)などがある. しかしソフトアクチュエータを用いたロボットであっても剛性の高い部品を用いることが多々ある. 例えば McKibben 型人工筋肉の収縮をプーリやリンク機構を用いて回転方向に変換しているようなものがある(Ling et al.,2019)(松村他, 2017). これは, ロボット自体の剛性が高くなるだけでなく, 人工筋肉の収縮方向にしか柔軟性を示さないためソフトアクチュエータの利点が失われてしまうのではないかと考えた. そこで著者らは剛性の高い機構を用いることなく湾曲運動を可能にする湾曲型空気圧ゴム人工筋肉 (BPAM) に着目した. BPAM はゴムチューブに繊維強化を施したものであり, 空気圧を印加すると湾曲することが可能なアクチュエータである. これまでに見守りや探査を目的として正六面体構造の自歪走行ロボット(SDR)(Tomori et al.,2019)を開発した. 本ロボットはワイヤフレームモデル状の構造を有しており, フレーム部が BPAM で構成されている. 適切な BPAM を湾曲させることでロボット自身の形状が変化し, 転がるように移動することができる. 主要構造が BPAM で構成されているため本質的に柔軟であり, 全方向からの衝撃や接触に対して柔軟性を示すことができる. さらにロボット全体が駆動機構となっており, 転倒の概念がなく, どのような姿勢からでも運動を行うことができる.

本論文では, 従来の正六面体構造のロボットの問題点であった BPAM を大変形しなければ転がることができない, ロボットの進行方向の指定の条件がシビアであるということを解決するためロボットに用いる新たなフレーム部の構造を提案する. そして, ロボットの無線化を目指し搭載システムの設計を行い, その状態でロボットの走行が可能か走行実験を行った.

2. 湾曲型空気圧ゴム人工筋肉の概要

湾曲型空気圧ゴム人工筋肉 (BPAM) はゴムチューブと繊維素材からなるラバチュエータの一種である. BPAM の特徴は, 軽量, 柔軟であり, 湾曲運動を特別な機構なしに実現できることである (図 1 参照). BPAM の構造はゴムチューブにアラミド繊維を密に巻き付け, さらに軸方向の一部をアラミド繊維で拘束している. ここで, BPAM の駆動原理を説明する. まず, ゴムチューブに繊維拘束を施さない状態で空気圧を印加すると図 2(1)のように全方向に膨張する. 次にゴムチューブにアラミド繊維を巻き付け径方向の膨らみを拘束すると, 空気圧を印加した際に図 2(2)のように軸方向に伸長する. そこに軸方向の一部をアラミド繊維で拘束すると, 空気圧を印加した際に拘束部のみ伸長することができず BPAM の長さに差が生じてしまう. その差によって BPAM は図 2(3)のように湾曲することが可能である.

Fig. 1 BPAM bending.

Fig. 2 How to bend BPAM.

3. フレーム構造の検討

本研究ではロボットのフレーム部をソフトアクチュエータである BPAM で構成している。BPAM はプーリなどの剛体部品を用いることなく曲げの変形をすることができる。このようにすることでロボット自身が柔軟性を獲得するだけでなく、BPAM を駆動させることでロボット自体が変形し、動くことができるロボットを目指した。本章では従来の正六面体構造のロボットの問題点を解決するため新たに正二十面体構造のロボットを試作し検討を行った。

3・1 従来の正六面体構造

従来の正六面体構造を図 3 に示す。1 辺の長さは 200 mm、重さは約 0.7 kg である。本構造は計 12 本の BPAM を外側に湾曲するようにして配置しており、BPAM に空気圧を印加（この時の空気圧は 0.3 MPa）すると図 4 のように変形する。変形によって重心が傾き前後左右（図 5 参照）の 4 方向に転がることが可能である。しかし、本ロボットの形状が二面角 90 deg の正六面体であることから、転がるために大変形を要し、図 4 の赤丸で囲ったように空気圧を加えていない BPAM が過剰に折れ曲がることで故障に繋がってしまった。また、本ロボットの転がる条件がシビアであり、BPAM のわずかな特性変化や駆動タイミングに左右されていた。

Fig. 3 Regular hexahedron SDR.

Fig. 4 Deforming during running of regular hexahedron SDR.

Fig. 5 Running direction of regular hexahedron SDR (bottom view).

3・2 正二十面体構造

正六面体構造の時の問題点を解決するために図 6 のような正二十面体構造のフレームを試作した。1 辺の長さは 185 mm、重さは約 2.0 kg である。本構造は計 30 本の BPAM を立方体構造の時と同様に BPAM を外側に湾曲するように配置している。正二十面体構造は正多面体の中で最も二面角の角度が大きく（正二十面体の二面角は

138 deg), ロボットを転がす際に正六面体構造の時よりも大きな変形を必要としないため, BPAM にかかる負荷も小さくなると考えられる. 実際に動作確認を行ったところ, 床面に接した 3 本の BPAM それぞれの法線方向の 3 方向 (図 7 参照) に転がるのが可能であった. 走行方法はロボットを地面に置いた際に地面と接する 3 本の BPAM のうち 2 本を駆動させることで, 駆動していない残りの 1 本の BPAM を回転軸として転がることのできる (図 7 の時人工筋肉 B, C に空気圧を加えることで人工筋肉 A を回転軸として青矢印 1 の方向に転がることのできる). 走行時の様子を図 8 に示す. 従来の正六面体構造に比べ移動プロセスが簡略化され, 球体に近づいたことで移動条件が大幅に緩和された.

今回フレーム構造以外に BPAM の改良も行った. 正六面体構造の時の BPAM は天然ラテックスゴム液から dip 成形により作成したゴムチューブに繊維拘束を施していたが, 今回は市販のゴムチューブに繊維拘束を施した. 市販のゴムチューブは加硫が施されており, 天然ラテックスゴムよりもより恒久的にゴム弾性を示すことが可能である(鞠谷, 1983). そのため改良された BPAM では耐久性, 耐圧性, 信頼性が向上した. この時, ロボットに用いた BPAM の寸法は内径 15 mm, 外径 21 mm, 肉厚 3 mm, 長さ 92 mm である. この BPAM をロボットに使用した際の応答速度は底面に位置するときは約 2.4 秒, それ以外に位置するときは 1.9 秒であった. また, 個体差による応答速度の誤差は 1 秒以内であり, ロボットの走行の成否や進行方向に影響を及ぼすようなことはなかった.

Fig. 6 Regular icosahedron SDR.

Fig. 7 Running direction of regular icosahedron SDR.

Fig. 8 Deforming during running of regular icosahedron SDR.

4. システムの搭載

本ロボットは試作段階では図9のように大型のコンプレッサとタンクを用いて空気圧を供給し、手動の弁で駆動するBPAMを指定していた。そこで本章ではこれらのシステムをロボットに内蔵することでロボットの無線化を目指した。

また、本ロボットが走行するためには、どの面が床に接しているかを把握し、目標の移動方向を基にその面を構成するBPAMの中から駆動するBPAMを決定する必要がある。本ロボットには姿勢を把握するために9軸センサを搭載しているが、坂のような角度のある面では必ずしもロボットの底面が床に接しているとは限らない。そこで、地面に接しているBPAMを認識するためにタッチセンサを開発し搭載した。

本ロボットに内蔵するものは、Arduino NANO 33 IoT, Arduino MEGA, 9軸センサ, タッチセンサ, 電磁弁, ポンプ, バッテリー, ポンプ制御のためのエレクトロニック・スピード・コントローラー(ESC)である。本ロボットにシステムを内蔵する際にロボット自身の柔軟性を損なわないようにしたい。そこでシステムをひとつの筐体(コアパーツ)に集約し、ロボットの中心部に配置した。ロボットとコアパーツの接続にはシリコンチューブを使用し、各頂点部の内側から延びているチューブに支えられている(図10)。シリコンチューブで接続することでコアパーツを保持するだけでなく、ロボットの柔軟性や変形を妨げることなく内蔵できると考える。

Fig. 9 Driving environment.

Fig. 10 Mounting method.

4・1 制御系

本ロボットを動かすためのマイコンとして Arduino MEGA と Arduino NANO 33 IoT を使用した。Arduino MEGA はそれぞれのセンサを読み取りロボットに指令を送る役割を果たしている。Arduino NANO 33 IoT は PC との Wi-Fi 通信が可能であり、PC からの指令を読み取り、シリアル通信で Arduino MEGA に指令を送っている。Arduino MEGA はシールドによって拡張しており、シールドには9軸センサが搭載されている。

本ロボットの制御ループは14msであり、その中で9軸センサやタッチセンサから得られる値を更新している。また、Wi-Fiの通信速度は平均68msであり、Wi-Fiから信号を受信してから演算を経てロボットが動き始めるまでの時間は338msであった。

Fig. 11 Wireless driving environment.

4・2 タッチセンサ

本ロボットは、床に接している3本のBPAMのうち2本を駆動させることで走行することが可能である。そこで、どのBPAMが床面に接しているのかを把握するためにロボットの頂点部にそれぞれ取りつけるタッチセンサを開発した。

開発したセンサは図12であり、力が加わるとシリコンゴムが変形し導電ゴムが2つの電極に触れ電極A→導電ゴム→電極Bのように通電する。導電ゴムは外力が強くなるほど抵抗値が小さくなり通電量が大きくなる。この際Arduinoでセンサに流れる電圧を読み取ることで底に接しているBPAMを把握することが可能となる。

4・2・2 タッチセンサ実験

タッチセンサの性能を調査するために実験を行った。本実験は図13のようにセンサを配置し、押し込み試験機(MCT-2150)を用いて接触角度 $\theta=0\text{ deg}$, 25 deg , 31.7 deg (31.7 deg はロボットに取り付けた際のセンサと地面の接触角度)での時でそれぞれ0N~60Nの負荷を10Nごとにかけ、その時のデジタル値の値をArduino MEGAで読みとった。これを4回行い、平均値を計算する。その後センサを取り換え、合計3つのセンサで実験を行った。

4・2・3 実験結果

実験の結果図14, 15のような結果が得られた。結果より負荷とデジタル値には正の相関があり、大きな負荷がかかるほど高いデジタル値を示すことが分かる。無負荷時にはデジタル値が0になるため、接触しているタッチセンサを識別することは容易である。図15のセンサ別に得られた値を見てみると、それぞれのセンサで得られた値にはばらつきがみられた。これはセンサを手づくりで作成したために個体差が生じてしまったと考える。ロボットに搭載する際には個別にセンサの閾値を設定して用いることで個体差による影響を無くした。

Fig. 12 Touch sensor structure.

Fig. 13 Experiment environment.

Fig. 14 Test result of sensor A.

Fig. 15 Compare each sensor. The values of each sensor are shown in circle, triangle, and cross plots.

4・3 空気圧制御系

本ロボットは空気圧を供給するために小型ポンプ（Zメカニズム技研製）を使用した。小型ポンプを図16、その諸元を表1に示す。また、ポンプを動かすためのバッテリーとして4セル(14.8 V)、6000 mAhのリポバッテリーを使用した。ポンプに流れる電流は6.0 Aであり、ロボットは連続で1時間動かすことが可能である。

駆動するBPAMを指定するために電磁弁にコガネイ社製のプチバルブ B005EI-J32-PSを使用した。電磁弁を図17、その諸元を表2に示す。

Fig. 16 Small pump.

Fig. 17 Solenoid valve.

Table 1 Pump specifications.

Size	85.4×74×40 [mm]
Discharge pressure	0.8 [MPa]
Weight	430 [g]

Table 2 Solenoid valve specifications.

Size	40×15×5.9 [mm]
Pressure range	0~0.7 [MPa]
Weight	4.5 [g]
Response speed	6 [ms]

5. 制御方法

図 18 に本ロボットの座標系を示す．ここで，座標系 G はグローバル座標系でありロボットの姿勢によらず， Y 軸が北を向いて固定されている．一方座標系 O はロボットのローカル座標系であり，ロボットの移動によって姿勢を変える．本ロボットの各頂点はローカル座標系 O で位置ベクトル ${}^O P_i$ ($i=1\dots 12$) と表される．次に 9 軸センサから本ロボットの姿勢（ロール，ピッチ，ヨー）を計算し，回転行列 ${}^G R_O$ を式(1)のように求める．さらに ${}^O P_i$ と ${}^G R_O$ からグローバル座標 G における各頂点の位置ベクトル ${}^G P_i$ を式(2)のように算出する．

$${}^G R_O = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^G P_i = {}^G R_O {}^O P_i \quad (2)$$

続いてタッチセンサから地面と接触している頂点を検出し，対応する位置ベクトル ${}^G P_i$ で作られた正三角形を考える．ここで正三角形の幾何学的中心から各辺の中点へ伸びたベクトルをそれぞれ A, B, C とする．さらにグローバル座標系 G 上でロボットの目標移動方向をベクトル D で指示し，ベクトル D とベクトル A, B, C とのなす角を求める．そしてなす角の大きい 2 本のベクトルを選択し，対応する BPAM を駆動させることでベクトル D に最も近い方向に転がることができる．（図 19 参照）

Fig. 18 Coordinate system of SDR.

Fig. 19 BPAM on the bottom.

6. システム搭載後の走行実験

6.1 実験方法

本実験では 4 章で述べた搭載方法でシステムを搭載し，ロボットを走行させることが可能か実験を行った．実験では図 20 に示す経路を走行させ，走行時の課題を調査した．ただし，事前に動作確認を行ったところ，すべてのシステムを搭載した状態で動かそうとすると 0.6 MPa 以上の空気圧が必要であり，図 21 のように BPAM 端部の部品が外れてしまった．ロボットはすべてのシステムを搭載した状態で 4.7 kg あったため，搭載物の中で高重量化の原因となっていたポンプとそのバッテリー(計 1.2 kg)をコア部から外し外部接続とした．

Fig. 20 Running course.

Fig. 21 Destruction of BPAM.

6.2 実験結果

実験の結果合計 23 回転がることによってコースを走破することができた。図 22 は走行している様子であり、空気圧は 0.5 MPa で走行させた。実験中、センサが正常に働き転がることができた回数は 9 回、センサは正常に働いたがロボットが転がりきらず補助を要した回数は 13 回、タッチセンサが反応せず転がらなかった回数は 1 回であった。ロボットが正常に動いた際に 1 回転がり終えるまでの時間は平均 7.2 秒であった。

ロボットが転がりきらなかった原因としては、BPAM の出力制限が挙げられる。ゴムチューブの耐圧性は改善されていたものの、BPAM 端部の接続の強度から、印加圧力に制限を掛ける必要があった。そのため BPAM の出力を十分に活かすことができず、ロボットを転がすまで重心を傾けることができなかったと考える。この点については、より高い空気圧印加に耐えられるよう、ゴムチューブと端部部品の接続の強化が課題である。また、ロボットを軽量化することで必要空気圧が減少したことから、ロボットの軽量化も改善につながると考えられる。さらに、今回の実験で姿勢によって転がりやすさに差があることが判明した。これは、ロボットの搭載物の配置によりロボットの重心が偏ったためであると考えられる。そのため、今後ロボットの搭載物の配置をより考慮して設計する必要がある。

一方でロボットを走行させるプロセスには問題が見られず、今回提案した制御手法は有効であると考えている。しかしタッチセンサが認識せず、ロボットを動かさないときがあった。今回の実験ではロボットの外部にポンプを配置していたため、空気チューブを引きずる形でロボットを走行させていた。そのため、ロボットがチューブを踏んでしまいタッチセンサの反応が悪くなったと考える。しかしながら本ロボットは小さな段差程度は乗り越えることを想定しているため、タッチセンサの原理や構造を見直す必要がある。

Fig. 22 Driving result.

7. 結言

本稿ではロボットのフレーム構造の提案を行い、正二十面体構造のロボットを開発した。また、ロボットを無線化するために走行させるためのシステムを搭載し、ロボットの制御を構築した。その後、ロボットの走行試験を行い、ロボットの走行性能を調べた。

その結果、今回開発したロボットは BPAM の接続部の強度不足やロボットの重心のずれによりロボットが走行できないときがあったため、ロボット自身の軽量化、より高い出力を出すために BAPM の接続部の改良、搭載物の配置の見直しによって改良する。

また、ロボットを走行させるための制御に問題はなかったため、今回構築した制御方法は本ロボットにおいて有用であると考えられる。しかし、タッチセンサは小さな段差によって反応できなくなってしまうことがあったため今後見直しの必要がある。

謝辞

本研究は JST の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) (グラント番号 JPMJOP1614) の支援を受けたものです。

小型ポンプの使用にあたり Z メカニズム技研株式会社様より提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- Asaka, K., Develop of human-friendly polymeric actuators based on nano-carbon electrodes-Toward the practical realization of artificial muscle-, *Synthesiology*, Vol.9, No.3 (2016), p.117-123.
- Hayakawa, Y., Ueda, N., Hirota, S. and Shunmugham, R.P., Soft mechanism by using a sponge-core-soft-rubber actuator for welfare machines, *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, Vol.2005, No.6 (2005), p191-195.
- 石川俊也, 田中毅, 人工筋肉を目指した形状記憶合金アクチュエータ (巻フィルムチューブ方式の提案), *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.71, No.71 (2005), pp.944-950.
- 糊谷信三, ゴムの架橋とは, *日本ゴム協会*, Vol.56, No.11 (1983), pp.666-677.
- Ling, Z. and Xin, L., Trajectory tracking control for double-joint manipulator systems driven by pneumatic artificial muscles based on anon linear extended state observer, *Mechanism System and Signal Processing*, Vol.122, No.1 (2019), pp.307-320.
- 松村慶紀, 所晃史, 小林宏, マッスルスーツの開発と評価 (表面筋電図を用いた補助動作の評価), *日本機械学会論文集*, Vol.83, No.847 (2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00078.
- Nakanishi, D., Sugimoto, Y., Honda, H. and Osuka, K., Measurement experiments and analysis for modeling of mckibben pneumatic actuator, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.28, No.6 (2016), p.830-836.
- Nozaki, T. and Noristugu, T., Motion analysis of mckibben type pneumatic rubber artificial muscle with finite element method, *International Journal of Automation Technology*, Vol.8, No.2 (2014), p.147-158.
- 櫻井良, ソフトロボット学への産業界からの期待, *日本機械学会誌*, Vol.122, No.1205 (2019), p10-11
- Shaoze, Y., Tianfu, Y., Xiajie, L. and Rencheng, W., Tactile feedback control for a gripper driven by SMA springs, *AIP Advance*, 2, 032134 (2012).
- 杉野卓司, ナノカーボン高分子アクチュエータの研究と応用へのチャレンジ, *計測と制御*, Vol.54, No.1 (2015), p.66-68.
- 鈴森康一, ロボットのアクチュエータのバックドライバビリティ, *日本ロボット学会誌*, Vol.31, No.6 (2013), pp548-551.
- 鈴森康一, アクチュエータ技術から見たソフトロボティクス, *日本ロボット学会誌*, Vol.37, No.1 (2019), p.26-29.
- 田熊隆史, 空気圧人工筋により駆動する柔軟な脚ロボット, *日本ロボット学会誌*, Vol.37, No.2 (2019), pp144-149.
- Tomori, H., Hiyoshi, K., Kimura, S., Ishiguri, N. and Iwata, T., A self-deformation robot design incorporation bending-type pneumatic artificial muscle, *Technologies*, Vol.7, No.3 (2019), 51.

References

- Asaka, K., Develop of human-frendly polymeric actuators based on nano-carbon electrodes -Toward the practical realization of artificial muscle-, *Synthesiology*, Vol.9, No.3 (2016), p.117-123.
- Hayakawa, Y., Ueda, N., Hirota, S. and Shunmugham, R.P., Soft mechanism by using a sponge-core-soft-rubber actuator

- for welfare machines, Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, Vol.2005, No.6 (2005), p191-195.
- Ishikawa, S. and Tanaka, K., Shape memory alloy actuator for artificial muscle (proposition of polled film tube method), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.71, No.71 (2005), pp.944-950 (in Japanese).
- Kouziya, K., Gomunokakyoutoha, Journal of the society of rubber science and technology, Vol.56, No.11 (1983), pp.666-677 (in Japanese).
- Ling, Z. and Xin, L., Trajectory tracking control for double-joint manipulatorsystems driven by pneumatic artificial muscles based on anon linear extended state observer, Mechanism System and Signal Processing, Vol.122, No.1 (2019), pp.307-320.
- Matsumura, Y., Tokoro, K. and Kobayashi, H., Development and assessment of muscle suit (evaluation of the auxiliary operation using the surface EMG), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.83, No.847 (2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00078.
- Nakanishi, D., Sugimoto, Y., Honda, H and Osuka, K., Measurement experiments and analysis for modeling of mckibben pneumatic actuator, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28, No.6 (2016), p.830-836.
- Nozaki, T. and Noristugu, T., Motion analysis of mckibben type pneumatic rubber artificial muscle with finite element method, International Journal of Automation Technology, Vol.8, No.2 (2014), p.147-158.
- Sakurai, R., Sohutorobottogakuhenosangyoukaikaranokitai, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.122, No.1205 (2019), p10-11 (in Japanese).
- Shaoze, Y., Tianfu, Y., Xiajie, L. and Rencheng, W., Tactile feedback control for a gripper driven by SMA springs, AIP Advance, 2, 032134 (2012).
- Sugino, T., Nanoka-bonkoubunsiakutyue-tanokenkyuutoouuyouhenotyarenzi, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.54, No.1 (2015), p.66-68 (in Japanese).
- Suzumori, K., Backdrivability of robots and actuator, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.31, No.6 (2013), pp548-551 (in Japanese).
- Suzumori, K., Akutyue-tagizyutukaramitasohutorobothikusu, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.37, No.1 (2019), p.26-29 (in Japanese).
- Takuma, T., Legged Robot driven by soft pneumatic actuator, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.37, No.2 (2019), pp144-149 (in Japanese).
- Tomori, H., Hiyoshi, K., Kimura, S., Ishiguri, N. and Iwata, T., A self-deformation robot design incorporation bending-type pneumatic artificial muscle, Technologies, Vol.7, No.3 (2019), 51.