

# 冗長性を考慮した7自由度人工筋肉マニピュレータの開発および制御

## Development and Control of 7-DOF Artificial Muscle Manipulator Considering Redundancy

精密工学専攻 21号 加茂大地  
Daichi Kamo

### 1. 諸言

近年、人間の生活の中へのロボットの進出が増えてきている。このような人間の近くで作業するロボットやデバイスは、人体と同様の柔軟性やしなやかさを有し、安全性と親和性の高い性質を持つことが望まれている。これらの要求を満たすために、本研究ではロボットのアクチュエータとして人工筋肉に着目した。

本研究では、これまでに軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉<sup>(1)</sup>をアクチュエータとして採用し、6-DOF マニピュレータ<sup>(2)</sup>を開発した。しかし、このマニピュレータには、人間の腕と比べて手首関節の自由度が少ないため、エンドエフェクタの細かい動作を実現することが難しいという問題点があった。昨年度までに、この問題点を改善する為、関節に新機構を導入した7-DOF マニピュレータ<sup>(3)</sup>の設計開発を行ったが、制御システムの構築や、上記問題解決のための冗長性利用手法の検討などは行われていなかった。

そこで本論文では、マニピュレータの制御システムの構築を行い、開発したマニピュレータの性能を検討した。また、人工筋肉マニピュレータの冗長性を活かした制御法の提案を行い、上記の問題点の解決を試みる。さらに、ヤコビ行列を導出し、本マニピュレータの手先剛性特性を検討する。

### 2. 軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉

本研究室では、一般的に使用されている空気圧ゴム人工筋肉である McKibben 型人工筋肉より、収縮率、収縮力で共に優れる、軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉<sup>(1)</sup>を開発した。図1に軸方向繊維強化型ゴム人工筋肉の概要を示す。

本人工筋肉は、ゴムの層で炭素繊維の層を挟み込む構造をしている。なお、ゴムの種類は、耐久性が高く、伸び率の良い天然ラテックスゴムを使用している。炭素繊維は軸方向のみに配置されている。これにより、空気圧を印加した際の軸方向への膨張は拘束される。すなわち、半径方向には膨張し、軸方向には収縮するといった動きになる。

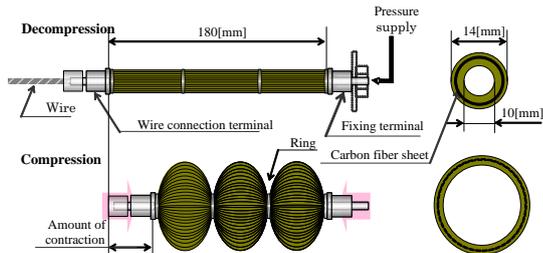


Fig. 1 Straight-fiber-type pneumatic artificial muscle

### 3. 7-DOF マニピュレータ

#### 3.1 7-DOF マニピュレータの構造

本研究で開発した7-DOF マニピュレータ<sup>(3)</sup>の外観および構造を図2に示す。

本マニピュレータは、人間との協調作業時の不具合の解消や、より少ない動きで目標動作を実現できるように肩部(3自由度)、肘部(1自由度)、手首部(3自由度)からなる7自由度に設定し、人間の腕と同様な関節配置を実現した。関節の機構としては、図3に示される差動歯車機構<sup>(4)</sup>を第2, 3関節および第4, 5関節に、図4に示されるプーリーインプリー機構<sup>(5)</sup>を第6, 7関節にそれぞれ開発し、採用した。そして、出力/重量比の高いゴム人工筋肉をアクチュエータとして使用することで、マニピュレータの多自由度化に伴う重量の増加を抑えている。また、アームリンクを覆うように人工筋肉を配置する内骨格構造とすることで、人間とマニピュレータが接触した際の安全性を高めた。

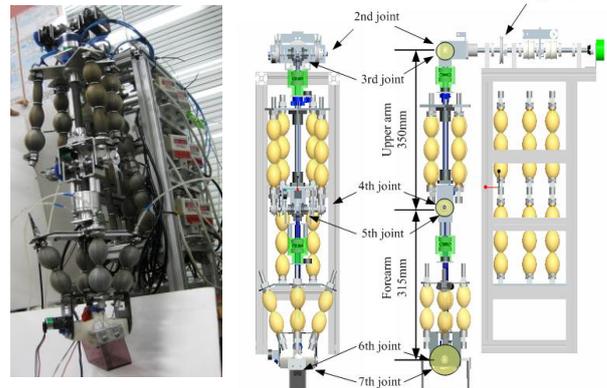


Fig. 2 7-DOF artificial muscle manipulator



Fig. 3 Differential gear mechanism



Fig. 4 Pulley in pulley mechanism

### 3.2 実験システム

本実験装置を図5に示す。比例電磁弁の1次側にはコンプレッサが接続され、圧縮空気が供給されている。各比例電磁弁の出力側には人工筋肉を接続し、入力信号に基づく圧力が供給されマニピュレータを駆動させる。マニピュレータの各関節の回転軸にはポテンショメータが接続され、角度の計測や制御系へのフィードバック信号に利用される。

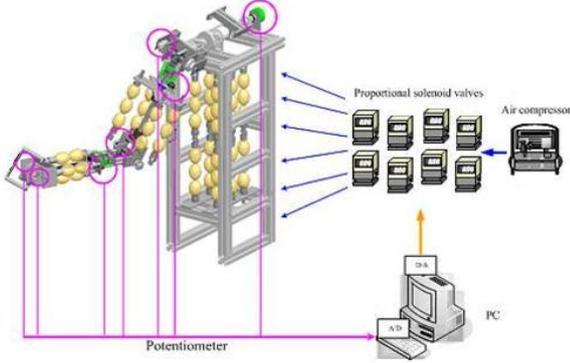


Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

### 4. 7-DOF マニピュレータ制御システム

図6に7-DOF マニピュレータ全体の制御システムの概略図を示す。まずエンドエフェクタの目標位置・姿勢を操作者が任意に与える。与えられた目標値を逆運動学計算により、各関節の目標角度に変換する。ここで逆運動学演算は、次章で提案する手法を採用している。求めた目標角度 $\theta_{di}$ と目標関節剛性 $K_{jdi}$ 、各関節にかかる負荷トルク $\tau_i$ 、各関節角度 $\theta_i$ を関節制御システムに入力する。関節制御システムにより、圧力の目標指令が算出され、マニピュレータの人工筋肉に圧力が印加される。そして印加された圧力によりマニピュレータは目標角度に従い駆動する。

本システムは、関節角度センサのフィードバック値を利用し、関節角度のPI制御および、逆動力学計算によるリアルタイムでの負荷トルクの算出を行い、トルクフィードバック制御へ利用する。この時、逆動力学計算には、計算負荷の低減のため、ニュートン-オイラー法を採用している。

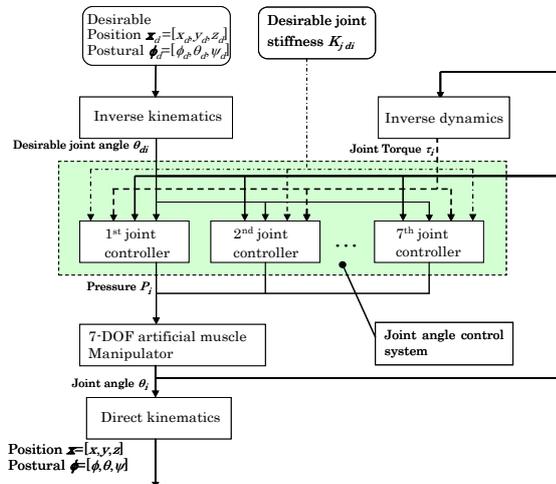


Fig. 6 Schematic diagram of control system of 7-DOF manipulator

### 5. 手先の関節を優先した逆運動学計算手法

#### 5.1 逆運動学計算

逆運動学とは、手先の位置・姿勢が与えられた場合に、それらを満足する関節角度を求める計算である。しかし、冗長マニピュレータの場合、手先の位置・姿勢が拘束されても関節角度が一意に定まらない。そこで、本研究では清水らの手法<sup>(6)</sup>を参考にし、逆運動学計算を行う。この手法は、アームアングルというパラメータを導入して第4関節の位置を拘束することで、逆運動学を可解にするものである。アームアングルとは、肩・肘・手首の三点を通る平面と参照面の成す角度を表す。また、参照面とは第2関節と第4関節の軸方向が一致するとき、肩・肘・手首により形成される面のことを指す。本手法を本マニピュレータに適用すると式(1)-(3)のように各関節角度が求まる。ここで $x_{sw}$ は肩から肘までのベクトル、 $a, b, c$ は回転行列から求まる係数である。また、 $i$ は第2,6関節、 $j$ は第1,3,5,7関節に対応する。

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{x_{sw}^2 - (L2+L3)^2 - (L4+L5)^2}{2 * (L2+L3) * (L4+L5)}\right) \quad (1)$$

$$\theta_i = \arcsin(a_i \sin q + b_i \cos q + c_i) \quad (2)$$

$$\theta_j = \arctan \frac{a_n \sin q + b_n \cos q + c_n}{a_m \sin q + b_m \cos q + c_m} \quad (3)$$

#### 5.2 アームアングル選択手法の提案

清水らの手法<sup>(6)</sup>では、逆運動学計算をマニピュレータの稼働範囲内に収めることは出来ても、実用的な冗長性利用の拘束にはなっていない。そこで、冗長性を利用して、人工筋肉マニピュレータの特徴をより活かせるアームアングル選択手法を提案する。冗長性利用の方針として(1)人間との親和性の高いロボットとして省スペース内でのコンパクトな動きで作業を行い、人間に対する安全性をより高めること、(2)空気圧駆動のデメリットである振動の低減・制御性の向上、という2つの要求を満たしたいと考えた。そこで、第1-2関節(肩)よりも第3-7関節を優先的に駆動し、マニピュレータの動きをコンパクト化しようと考えた。さらに関節変位の少なくなった第1-2関節は、関節剛性を高めることで、振動抑制に利用できると考える。具体的には、逆運動学計算に腕の位置エネルギーが最も低いアームアングルを選択する拘束を導入することで、第1-2関節の関節変位を少なくする。

肘(第4関節)の位置エネルギーが最小の時、腕の位置エネルギーも最小である。アームアングルを用いて第4関節の $x$ 座標を表すと、

$$x_4 = l_{se} (a_{s11} \sin q + b_{s11} \cos q + c_{s11}) \quad (4)$$

これを微分して

$$\frac{dx_4}{dq} = l_{se} (a_{s11} \cos q - b_{s11} \sin q) \quad (5)$$

よって式(5)を零とするアームアングル

$$q = \tan^{-1} \frac{a_{s11}}{b_{s11}} \quad (6)$$

で式(4)は極大または極小値を取る。ここで $x$ 座標は鉛直下向きを正としているため、極大値を取る方が、腕の位置エネルギーを最小にする

## 6. 軌道追従実験

冗長性および冗長性利用手法の有効性を確かめる為、マンピュレータのエンドエフェクタに軌道を追従させる実験を行った。実験では同じ軌道上の40個のプロット点を、提案手法(以下、7-DOF手法)および文献<sup>(7)</sup>で提案されている6-DOFマンピュレータの逆運動学手法(以下、6-DOF手法)を用いて、それぞれ計算し、計算結果の角度値を2secごとにマンピュレータに与え、PTP制御により軌道を描かせた。なお、この軌道は6自由度では、すべての関節を使わなければ、実現できないものを任意に設定し、反時計回りで描かせた。初めに比較の為、両手法の各関節剛性の値はどちらも同じ値を設定し、実験を行った。その後7-DOF手法において第1-3関節の関節剛性を高め、同軌道を描かせた。各関節角度の応答および、その応答から順運動学計算により計算したエンドエフェクタの実際に描く軌道について比較検討を行う。図7, 9, 11にそれぞれ目標の軌道および6-DOF手法, 7-DOF手法, 高剛性状態の7-DOF手法で実際に描いた軌道の様子を、図8に6-DOF手法での各関節角度の応答、図10に7-DOF手法での各関節角度の応答、図12に高剛性状態の7-DOF手法での各関節角度の応答を示す。さらに、各手法において、入力を与えてから2sec後のエンドエフェクタの座標と、目標の座標との距離を、誤差の値として計算した結果を図13に示す。

まず同一の剛性値での実験結果を比べてみると6-DOF手法よりも、7-DOF手法の方が、目標の軌道に近い軌道を描けていることがわかる。図13の比較からも、一部で上回っている点もあるが、全体的に見ると7-DOF手法の方が6-DOF手法よりも、誤差を削減できており、その最大値では約39%の削減に成功している。この追従性の差は、時間応答の結果からわかるように、6-DOF手法では第1関節(肩関節)を大き

く変位させながら軌道を描いているのに対し、7-DOF手法では第1関節をあまり変位させず、より手先に近い第3-7関節を優先的に使用して、軌道を描いていることが原因であると考える。肩関節はエンドエフェクタまでの距離が長い為、その関節で発生した僅かな誤差や振動が、エンドエフェクタでは大きな誤差や振動として現れてしまう。一方、手先の関節ではエンドエフェクタまでの距離がより短い為、その関節で誤差や振動が発生しても、肩関節よりもエンドエフェクタで現れる誤差や振動は小さく済むと考えられる。また、その誤差や振動を発生させる要因である各関節にかかるマンピュレータ自体の重量や慣性も、より根元である肩関節の方が大きい為、6-DOF手法よりも7-DOF手法の方が、安定性が優れた結果となっていると考える。

また、7-DOF手法では、マンピュレータの挙動の安定性をさらに高めることが出来ると考え、第1-3関節の関節剛性を高め、同軌道を描かせる実験を行った。人工筋肉には、印加圧力の限界値がある。それゆえ、人工筋肉マンピュレータにおいて関節剛性を高めることと、関節の稼動範囲にはトレードオフの関係がある。すなわち、関節変位が少なく済むならば、より関節剛性値を高く設定することが可能となる。よって7-DOF手法では関節変位が少なく済む分、6-DOF手法よりも肩関節の関節剛性値を高く設定できるため、更なる振動の低減・制御性の向上ができると考えた。しかしながら、図13の比較および図11の軌道を見てみると、低剛性状態の7-DOF手法時と比べ、振動は減少したが、一部(角部)で精度が落ちてしまった。この理由として、図12の時間応答の結果より、剛性を高めた第2,3関節間で互いの動きへの差動歯車型関節の干渉<sup>(4)</sup>が発生していることがわかる。これは、人工筋肉の応答の個体差から発生する干渉を、低剛性状態では、

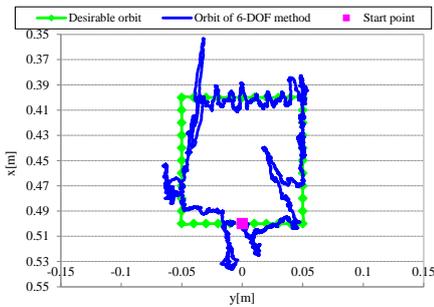


Fig. 7 Desirable and experimental orbit (6-DOF method)

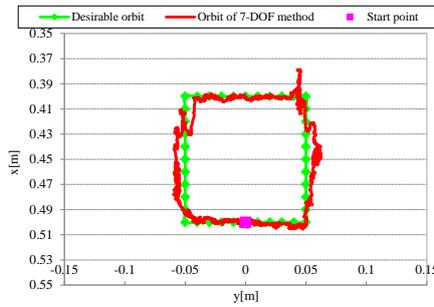


Fig. 9 Desirable and experimental orbit (7-DOF method)

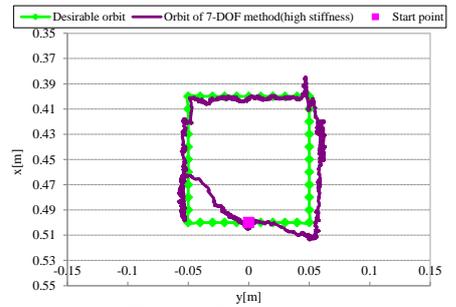


Fig. 11 Desirable and experimental orbit (7-DOF method (high stiffness))

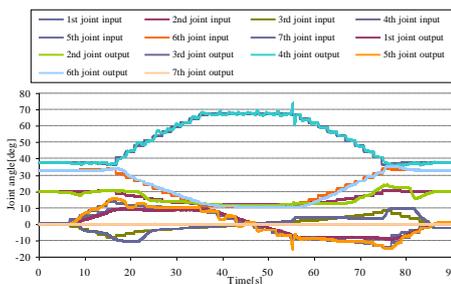


Fig. 8 Experimental result of 6-DOF method

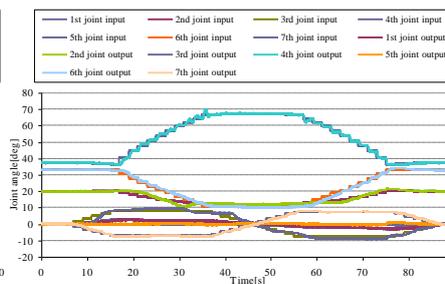


Fig. 10 Experimental result of 7-DOF method

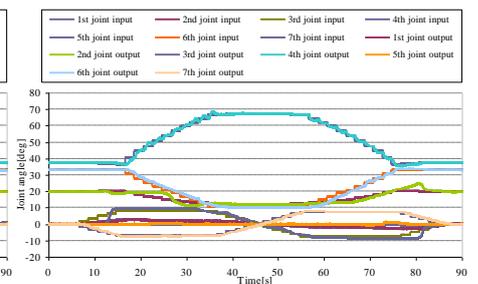


Fig. 12 Experimental result of 7-DOF method (high stiffness)

人工筋肉の弾性により吸収できていたのに対し、高剛性状態では、人工筋肉をより剛性の高い高圧印加状態で使用するため、吸収できなくなったと考える。今後は、制御システムに外乱オブザーバなどの動特性モデル制御を導入し、歯車の回転速度を制御することでこの問題を解決できると考える。

以上の実験から、今回提案した手法により逆運動学計算を行い、冗長性を利用することは人工筋肉マニピュレータの制御において有効であると考えられる。

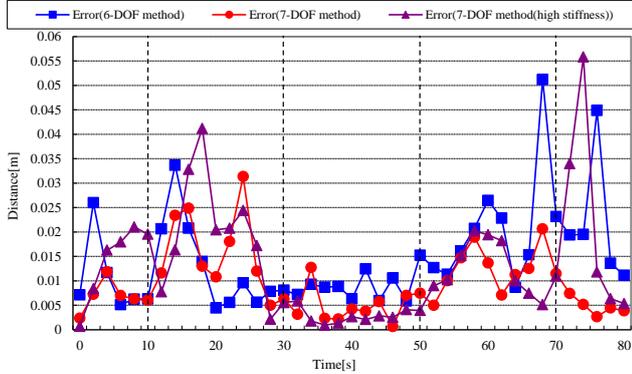


Fig. 13 Comparison of error

## 7. 手先剛性制御の検討

最後に本マニピュレータのエンドエフェクタの任意の方向への剛性制御手法について検討する。まず手先剛性行列  $\mathbf{K}$  を実現するための、関節剛性行列  $\mathbf{K}_j$  は、ヤコビ行列  $\mathbf{J}$  を用いて以下の式(9)で表すことができる。

$$\mathbf{K} = \text{diag}(k_{j_x}, k_{j_y}, k_{j_z}, k_{j_\phi}, k_{j_\theta}, k_{j_\psi}) \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_j = \text{diag}(k_{j_1}, k_{j_2}, k_{j_3}, k_{j_4}, k_{j_5}, k_{j_6}, k_{j_7}) \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{J}^T \mathbf{K} \mathbf{J} \quad (9)$$

式(9)よりヤコビ行列  $\mathbf{J}$  の  $i$  行  $j$  列成分を  $a_{ij}$  と置き、対角成分のみを取り出すと、手先剛性  $\mathbf{k}$  と関節剛性  $\mathbf{k}_j$ 、ヤコビ行列の各成分との関係は、 $7 \times 6$  型行列  $\mathbf{T}$  の  $i$  行  $j$  列成分を  $b_{ij}$  とし、式(14)のようになる。

$$\mathbf{k} = (k_{j_x}, k_{j_y}, k_{j_z}, k_{j_\phi}, k_{j_\theta}, k_{j_\psi})^T \quad (10)$$

$$\mathbf{k}_j = (k_{j_1}, k_{j_2}, k_{j_3}, k_{j_4}, k_{j_5}, k_{j_6}, k_{j_7})^T \quad (11)$$

$$\mathbf{T} = (b_{ij}) \quad (12)$$

$$b_{ij} = a_{ij}^2 \quad (13)$$

$$\mathbf{k}_j = \mathbf{T} \mathbf{k} \quad (14)$$

ここで  $\mathbf{T}$  の疑似逆行列  $\mathbf{T}^+$  を用いて式(14)を変形し、 $6 \times 7$  型行列  $\mathbf{T}^+$  の  $i$  行  $j$  列成分を  $c_{ij}$  と置くと式(16)のようになる。

$$\mathbf{T}^+ = (c_{ij}) \quad (15)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{T}^+ \mathbf{k}_j \quad (16)$$

本マニピュレータにおいて第 2,3 関節および第 4,5 関節に採用されている差動歯車機構では、一つの機構、同一の人工筋肉を用いて屈曲と内外転の 2 自由度の動きを実現しているため、その 2 自由度の剛性は同一の値となり、独立に制御することが出来ない。よって式(17)で表される拘束が存在する。これを考慮すると、手先剛性は  $6 \times 5$  型行列  $\mathbf{U}$  を用いて式(20)のように表わせる。

$$\begin{cases} k_{j_2} = k_{j_3} \\ k_{j_4} = k_{j_5} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{k}_{j_s} = (k_{j_1}, k_{j_2}, k_{j_4}, k_{j_6}, k_{j_7})^T \quad (18)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} + c_{13} & c_{14} + c_{15} & c_{16} & c_{17} \\ & & \vdots & & \\ c_{61} & c_{62} + c_{63} & c_{64} + c_{65} & c_{66} & c_{67} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{U} \mathbf{k}_{j_s} \quad (20)$$

そして、 $\mathbf{U}$  の疑似逆行列  $\mathbf{U}^+$  を用い、本マニピュレータで任意の手先剛性を実現するための関節剛性  $\mathbf{k}_{j_s}$  は式(21)のようになる。

$$\mathbf{k}_{j_s} = \mathbf{U}^+ \mathbf{k} \quad (21)$$

実際に使用する際には、本理論式は近似式である疑似逆行列を二度使うことによる、計算結果の精度の低下があると考えられる。また、マニピュレータの手先剛性には、リンク長さや、関節配置、姿勢などから決定される関係性があり、入力を行う際、その手先剛性が、実現可能な組み合わせの入力であるか注意する必要がある。そこで今後は、手先操作力楕円体を姿勢ごとに計算し、事前にその特性を考慮して、手先剛性の指定を行うことで、精度よく本理論式を利用できると考える。

## 8. 結言

人工筋肉をアクチュエータとした 7-DOF マニピュレータおよびその制御システムを開発した。本マニピュレータの特徴を活かす冗長性利用手法として手先関節を優先的に利用する手法を提案し、実験により、その有効性を確かめた。また、本マニピュレータの手先剛性制御手法の検討を行った。

## 参考文献

- (1) T. Nakamura, "Experimental Comparisons between McKibben type Artificial Muscles and Straight Fibers Type Artificial Muscles", SPIE International Conference on Smart Structures, Devices and Systems III, (2006)
- (2) 永井秀和, 島村健史, 中村太郎: "人工筋肉を用いた 6 軸人間共存型マニピュレータの開発", 第 7 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(SI2006), (2006), pp.704-705
- (3) 加茂大地, 渡辺拓巳, 田中大, 中村太郎, 大隅久: "軸方向繊維強化型人工筋肉を用いた 7 自由度人工筋肉マニピュレータの開発", ロボット学会 2012 予稿集, Vol.CD-ROM, (2012), 2C1-3
- (4) D.Kamo, M.Maehara, D.Tanaka, T.Nakamura: "Development of a manipulator with straight-fiber-type artificial muscle and differential gear mechanism", The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON2011, (2011), pp.98-103
- (5) 田中大, 加茂大地, 前原正典, 中村太郎: "空気圧人工筋を用いた 2 自由度手首機構の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 予稿集, Vol.CD-ROM, (2012), 1P1-R11
- (6) 清水昌幸, 角谷啓, 尹祐根, 北垣高成, 小菅一弘: "関節の可動範囲を考慮に入れた 7 自由度マニピュレータの解析的逆運動学解法", 日本ロボット学会誌, 25-4 (2007) pp.606-617
- (7) T. Nakamura, H. Maeda, and H. Nagai: "Development of a 6-DOF Manipulator Actuated with a Straight-Fiber-Type Artificial Muscle", in Proc. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS2009, pp.607-612