多関節ロボットアームのトルクオブザーバを用いた フォースフリー制御*

後藤 聡** 臼井辰己*** 中村政俊** 久良修郭†

Forcefree Control for Articulated Robot Arms Using Torque Observer

Satoru GOTO, Tatsumi USUI, Masatoshi NAKAMURA and Nobuhiro KYURA

In this paper, position information based forcefree control is proposed in order to realize flexible motion of articulated robot arms without force or torque information sensing. The proposed position information based forcefree control uses torque observer instead of torque information sensing, which enables flexible motion for more general articulated robot arms. The proposed position information based forcefree control was assured by experimental results of an actual articulated robot arm. Moreover, the proposed position information based forcefree control is compared with the previously proposed forcefree control using torque monitor.

Key words: articulated robot arms, servo controller, torque monitor, position information, forcefree control, torque observer

1. 緒 言

ロボットは、産業用ではカッティング、塗装、溶接、組立などの作業に用いられており、工場の自動化には欠かせない存在であり、また、福祉や趣味の分野にも利用されてきている。ロボットの剛性は通常高く取られており、通常外力によってロボットを動作させることはない。一方、ダイレクトティーチやアルミダイキャストの成形物の取り出し作業などの、ロボットが外力によって柔軟な動作が要求される作業も存在する。

多関節ロボットアームの柔軟な動作を実現するために、著者らは、過去にフォースフリー制御¹⁾を提案している。フォースフリー制御とは、ロボットアームが、無重力、無摩擦状態で、自らの慣性に従って外力によって柔軟に接触力から逃げる動作をさせる制御法である。また、設計者がロボットアームの慣性、摩擦、重力を自由に設定できる独立補償フォースフリー制御^{2,3)}も提案しており、ダイレクトティーチ⁴⁾や柔軟動作に対して適用⁵⁾し、食事動作支援ロボットの安全性の実現⁶⁾にも用いている。これらの作業では、柔軟な動作を必要とする場合にのみフォースフリー制御を適用するため、フォースフリー制御は輪郭制御(もしくはPTP制御)と切り替えて用いる。これら2つの制御を一連の作業の中で実現するために、輪郭制御を行うために必要な位置情報と、フォースフリー制御を行うために必要なトルク情報を同時に検出し、状況に応じて制御法を切り替えていた。

近年では、サーボコントローラとサーボモータがセットで構成されたものが販売されており⁷⁾、その組み合わせで構成するロボットアームや、ラジコンサーボモータ⁸⁾のように位置制御系がモジュールに内蔵されたものでロボットアームを構成する場合においては、位置情報は検出できるが、トルク情報は検出することが困難である。そのため、このようなサーボモータで構成されるロボットアームでは位置情報とトルク

情報を同時に検出できず、フォースフリー制御を適用することとはできない。この問題は、市販のサーボモータのモータコントローラ部を改造し、トルク制御機能を追加することで解決される⁹⁾が、ハードウェアの変更が必要になり、コスト高となってしまう。そこで、トルク情報を得るために、内部状態を推定して力を得る方法⁹⁾や外乱オブザーバ¹⁰⁾、トルクオブザーバ^{11,12)}などを用いた方法が提案されている。これらの方法は、トルクオブザーバや内部状態の推定によりトルク情報を得ることで、力センサを用いることなしに、インピーダンス制御、コンプライアンス制御、力制御、位置の力のハイブリッド制御を実現したものである。そこで、本論文では、これらの手法と同じ考え方にに基づき、トルクオブザーバを用いることによって、力センサやトルクモニタを用いることなしに、フォースフリー制御を実現させる。さらに、トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御と過去に提案したトルクモニタを用いたフォースフリー制御とを比較し、それぞれの特徴を整理した。

2. トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御

2.1 フォースフリー制御とは

フォースフリー制御とは、一般に剛性が高く設計されている多関節ロボットアームに、外力に応じて、ロボットアームに掛かる重力とモータの摩擦の影響を受けずに、自らの慣性によって柔軟に接触力から逃げる動作をさせる制御法である¹⁾。フォースフリー制御を用いると、ロボットアームが外部から受ける力に対して柔軟に倣う動作を行うことができるため、ダイレクトティーチ⁴⁾や取り出し作業⁵⁾や食事動作支援ロボットにおける利用者の安全性の確保⁶⁾が実現できる。インピーダンス制御は、基本的には接触力の制御であり、アームに外力を与えるとアームが押し返すので、外力を逃がす制御ができない。また、インピーダンス制御には、目標位置や目標速度があるので、アームを外力によって自由に動作させることが困難である。フォースフリー制御を用いると、ロボットアームが外部から受ける力に対して柔軟に倣う動作を行うことが

* 原稿受付 平成 19 年 3 月 26 日

** 正 会 員 佐賀大学大学院 (佐賀市本庄町 1 番地)

*** 佐賀大学大学院

† 正 会 員 近畿大学 (飯塚市柏の森 11-6)

Fig. 1 Block diagram of position information based forcefree control

できるため、フォースフリー制御は非常に価値が高く、その有用性は極めて大きい。

過去の研究では、フォースフリー制御は力センサやトルクモニタを用いて実現してきたが、より一般的な多関節ロボットアームにフォースフリー制御を適用できるように、トルクオブザーバを用いることによってフォースフリー制御を位置情報のみで実現させる。

2.2 トルクオブザーバを用いる必要性

多関節ロボットアームを駆動するサーボモータはサーボコントローラ¹³⁾で制御されている。サーボコントローラへの入力は位置指令となっているため、フォースフリー制御においても位置指令を生成する。フォースフリー制御には外力情報が必要であり、従来のフォースフリー制御においては外力情報をサーボコントローラに装備されているトルクモニタ¹⁾から検出していた。しかし、トルクモニタの信号が外部出力として取り出せない場合には、フォースフリー制御を実現するためには、新たに力センサを取り付ける必要がある。そこで、トルクモニタや力センサを用いることなく、フォースフリー制御が実現されることが望まれる。

フォースフリー制御をトルクオブザーバを用いて位置情報のみで実現させるためには、外力、すなわちトルク外乱がロボットアームに加わったときに、ロボットアームが動作し、ロボットアームの位置が変化する必要がある。トルク外乱が加わるとロボットアームが動作し、この位置の変化からトルクオブザーバを用いて外力を推定することによって、位置情報のみでフォースフリー制御を構成する。もし、トルク外乱がサーボコントローラ内の速度ループのPI制御器により補償されている場合には¹⁴⁾、P制御器に変更する。

2.3 トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御の構成法

図1にトルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御のブロック図を示す。フォースフリー制御の対象となるトルクは、外力によって発生するトルク τ^f 、摩擦補償トルク τ^d 、重力補償トルク τ^g である。サーボコントローラの特長は、位置ループゲイン K^p 、速度ループゲイン K^v 、トルク定数 K^r によって表わされる。 q^d はサーボコントローラに入力される位置指令である。

サーボコントローラを含んだ多関節ロボットアームのダイナミクスは

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = K^r[K^p(q^d - q) - \dot{q}] - \tau^d - \tau^g \quad (1)$$

となる。 $H(q)\ddot{q}$ は慣性項、 $h(q, \dot{q})$ は非線形項、 q 、 $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ はそれぞれ関節位置、関節速度、関節加速度である。ここで、式(1)の右辺に摩擦トルク τ^d と重力トルク τ^g が含まれているのは、速度ループをP制御としているため、サーボコントローラ

ラでは、摩擦と重力は補償されないためである。式(1)の多関節ロボットアームに対してフォースフリー制御を実現すると、フォースフリー制御の位置指令 q^d は

$$q^d = (K^p)^{-1}[(K^v)^{-1}(K^r)^{-1}\{\tau^f + \tau^d + \tau^g\} + \dot{q}] + q \quad (2)$$

で与えられる。ここで、式(2)の右辺に外力によって発生するトルク τ^f に加えて摩擦補償トルク τ^d と重力補償トルク τ^g が含まれているのは、式(1)の摩擦と重力が補償されていないことに対応する。式(2)を式(1)に代入すると

$$\tau^f = H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) \quad (3)$$

となる。フォースフリー制御は、ロボットアームのダイナミクスが等価的に式(3)となるように制御を行う手法¹⁾である。

2.4 トルクオブザーバによる外力トルクの推定

従来のフォースフリー制御では式(3)の τ^f はトルクモニタから検出して求めていた¹⁾。トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御では、トルクモニタを用いないため、式(3)からトルクオブザーバを用いて外力トルクを推定する。

2自由度多関節ロボットアームの場合、慣性項は

$$H(q) = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。ここで、慣性項の各成分は

$$\begin{aligned} H_{11} &= m_1 l_{g1}^2 + m_2(l_{g1}^2 + 2l_1 l_{g2} \cos q_2 + l_{g2}^2) + I_1 + I_2 \\ H_{12} &= m_2 l_1 l_{g2} \cos q_2 + m_2 l_{g2}^2 + I_2 \\ H_{21} &= I_2 + m_2 l_{g2}^2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos q_2 \\ H_{22} &= m_2 l_{g2}^2 + I_2 \end{aligned}$$

であり、 m はリンク質量、 l はリンク長さ、 l_g は重心までの長さ、 I は重心まわりの慣性モーメントである。また、非線形項は

$$h(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} -m_2 l_1 l_{g2} (2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin q_2 \\ m_2 l_1 l_{g2} \dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。つまり、ロボットアームの物理パラメータから慣性項と非線形項を計算し、式(3)の右辺を求め、フォースフリー制御の位置指令式(2)に式(3)の右辺を計算した τ^f を用いることで、トルクオブザーバを用いて位置情報のみでフォースフリー制御を実現することができる。

3. 摩擦と重力の補償

サーボコントローラでトルク外乱が補償されていない場合は、サーボコントローラ内で摩擦と重力が補償されないため、フォースフリー制御の位置指令式(2)に含まれる摩擦補償トルク τ^d と重力補償トルク τ^g を適切に求めることが大切になる。本論文で示す摩擦項と重力項の導出手順は、基本的な考え方は逐次型アーム動特性同定法^{15)~17)}と同一であるが、摩擦項にシグモイド関数を使い、クーロン摩擦の大きさを滑らかにに変化させた摩擦補償トルクと、重力項にガンマ関数を使い、静止摩擦を含まない重力補償トルクを用いる。

3.1 摩擦補償の方法

摩擦項は、粘性摩擦係数 D およびクーロン摩擦の大きさ N_μ から導出できる。摩擦補償トルクの導出を行い³⁾、シグモイド関数

$$f_s(\dot{q}) = \left(\frac{1 - \exp(-\gamma \dot{q}_1)}{1 + \exp(-\gamma \dot{q}_1)}, \frac{1 - \exp(-\gamma \dot{q}_2)}{1 + \exp(-\gamma \dot{q}_2)}, \dots, \frac{1 - \exp(-\gamma \dot{q}_n)}{1 + \exp(-\gamma \dot{q}_n)} \right)^T \quad (6)$$

Fig. 2 Experimental equipment

を用いて摩擦補償トルク

$$\tau^d = D\dot{q} + N_\mu f_s(\dot{q}) \quad (7)$$

を求める。シグモイド関数は、クーロン摩擦の大きさ N_μ を、静止状態から滑らかに変化させるために導入した。

3.2 重力補償の方法

重力項は、ロボットアームの位置 q の関数として

$$g(q) = C(q)a + b \quad (8)$$

とモデル化して導出する。重力補償トルクの導出を行い³⁾、ガンマ関数

$$K(q) = \text{diag}(\exp(-\lambda q_1^2), \exp(-\lambda q_2^2), \dots, \exp(-\lambda q_n^2)) \quad (9)$$

を用いて重力補償トルク

$$\tau^g = C(q)a + K(q)b \quad (10)$$

を求める。ガンマ関数は、静止摩擦が含まれる定数項 b をロボットアームが動作しているときに無くすために導入した。

4. 実験ロボットアームによる検証

4.1 実験条件

トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御を実験多関節ロボットアームにおいて検証した。実験に用いた多関節ロボットアームは、Performer MK3(八幡電機精工製)で、その仕様は、位置ループゲイン $K_1^p = K_2^p = 25$ 1/s, 速度ループゲイン $K_1^v = K_2^v = 150$ 1/s, 定格トルク $\tau_1^r = 0.319$ Nm, $\tau_2^r = 0.159$ Nm, ギア比 $N_1 = N_2 = 1/160$ である。図2に実験の概略図を示す。トルクオブザーバに必要な位置情報はエンコーダ出力をパルスカウンタで計測している。ロボットアームの物理パラメータは、リンク質量 $m_1 = 2.86$ kg, $m_2 = 2.19$ kg, アーム長 $l_1 = 0.25$ m, $l_2 = 0.215$ m, 質量中心までの長さ $l_{g1} = l_1/2$ m, $l_{g2} = l_2/2$ m, 質量中心まわりの慣性モーメント $I_1 = m_1 l_{g1}^2/3$ kgm², $I_2 = m_2 l_{g2}^2/3$ kgm² であり、実験のサンプリング時間間隔 $\Delta t = 4$ ms, 実験時間 7 s, ロボットアーム先端の初期位置 $(x, y) = (0.3, 0.3)$ m とした。ロボットアーム先端に加わる外力とサーボモータのトルク出力は、それぞれ力センサとトルクモニタを用いて測定した。この力センサとトルクモニタは、トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御には必要ないが、印加した外力とサーボモータのトルクを測定するために用いている。また、力センサで検出された外力を用いてシミュレーションを行い、実験結果と比較した。

4.2 摩擦補償と重力補償

3.1 節で述べた方法で摩擦補償トルクを求めた結果を図3に示す。実線が式(7)で求めた結果、破線がシグモイド関数の代

Fig. 3 Friction compensation torque

Fig. 4 Gravity compensation torque

わりに符号関数を用いた $\tau^d = D\dot{q} + N_\mu \text{sgn}(\dot{q})$ で求めた結果である。式(6)中のパラメータ γ は、データを元に、リンク1, リンク2共に $\gamma = 120$ と与えた。リンク1, リンク2共に、破線で示すように符号関数を用いて求めた摩擦補償トルクがステップ的な変化をしている部分が、実線に示すようにシグモイド関数を用いることで滑らかに変化する結果を得た。

3.2 節で述べた方法で重力補償トルクを求めた結果を図4に示す。破線は式(8)で求めた結果、一点鎖線は式(8)中の $b = 0$ として求めた結果、実線は式(10)で求めた結果である。式(9)中のパラメータ λ は、データを元に、リンク1, リンク2共に $\lambda = 500$ と与えた。リンク1, リンク2共に、ロボットアームが動き出すと定数項 b は $b = 0$ となり、静止摩擦を含まない重力補償トルクが求められていることがわかる。

4.3 実験結果

実験は、ロボットアームが初期位置 $(x, y) = (0.3, 0.3)$ m の静止状態から、ロボットアーム先端にヒトが手で外力 60 N を加えて、ロボットアームを外力により動作させることで、トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御の検証を行った。

図5(a)は力センサで検出したX軸方向の力、(b)は力センサで検出したY軸方向の力、(c)はリンク1の関節位置、(d)はリンク2の関節位置、(e)はリンク1の関節速度、(f)はリンク2の関節速度、(g)はリンク1の外力トルク、(h)はリンク2の外力トルク、(i)はロボットアーム先端の軌跡であり、点線がシミュレーション結果、実線が実験結果である。但し(g), (h)は、点線が力センサで検出した外力トルク、実線がトルクオブザーバで推定した外力トルク、一点鎖線がトルクモニタで検出した外力トルクである。ここでのシミュレーション結果とは、実験で力センサから得られた外力 $F = [F_x, F_y]^T$ を用いて、 $\tau^f = J^T F$ により発生するトルク τ^f (図5(g), (h)の破線)を求め、式(3)により理論応答を求めた結果である。

図5(a)からロボットアームの先端には60 Nの力が加わっていることがわかる。(c), (d)より外力が加わっていないときには、リンク1, リンク2共に動いていないことから、重力が適切に補償されていることがわかる。(e), (f)より外力が加わると、理想的には一定速度で動くことになるが、わずかに減速していることがわかる。(g), (h)よりトルクオブザーバで推定した外力トルクは、力センサから検出された外力トルクとほぼ一致していることがわかる。トルクモニタ出力とトルクオブザーバ出力とを比較すると、トルクモニタより理想に近い外力トルクがトルクオブザーバにより推定できていることがわかる。

Fig. 5 Simulation and experimental results for external force 60 N

図 5(i) はシミュレーションに応じた軌跡を描いており、位置情報のみでフォースフリー制御を行えることがわかる。実験結果とシミュレーションにわずかに誤差があるが、この原因は、摩擦補償トルク式 (7) と重力補償トルク式 (10) での補償の誤差などによるものと考えられる。

5. 考 察

5.1 トルクモニタを用いたフォースフリー制御との比較

トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御とトルクモニタを用いたフォースフリー制御^リの比較を行う。図6にトルクモニタを用いたフォースフリー制御のブロック図を示す。

トルクモニタを用いたフォースフリー制御では、図 6 に示すようにサーボコントローラの速度ループは PI 制御を用いており、PI 制御の I 動作により、外力、摩擦や重力によるトル

Fig. 6 Block diagram of torque monitor based forcefree control

ク外乱が補償されているため、サーボコントローラを含んだ多関節ロボットアームのダイナミクスは

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = K^T[K^v\{K^p(q^d - q) - \dot{q}\}] \quad (11)$$

となる。サーボコントローラの速度ループのPI制御のI動作で摩擦と重力が補償されるため、フォースフリー制御を実現するための位置指令 q^d において摩擦と重力を補償する必要がない。そのため、トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御における位置指令式(2)の中の摩擦補償トルク τ^d と重力補償トルク τ_g は不要となり、トルクモニタを用いたフォースフリー制御を実現するための位置指令 q^d は

$$\mathbf{q}^d = (\mathbf{K}^p)^{-1}[(\mathbf{K}^v)^{-1}(\mathbf{K}^\tau)^{-1}\boldsymbol{\tau}^f + \dot{\mathbf{q}}] + \mathbf{q} \quad (12)$$

で与えられる。外力の検出にはトルクモニタを用いているが、トルクモニタ値の出力は、外力によって発生するトルクと、摩擦によって発生するトルクと、重力によって発生するトルクと、ロボットアームの慣性項や非線形項が混在しているため、純粋に外力によって発生するトルク τ^f は

$$\tau^f = -[\tau^s - \tau^d - \tau^g - \{H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\}] \quad (13)$$

として求められる。つまり、トルクモニタによりサーボモータの出力トルク τ を測定することで、外力により発生するトルク τ_f を得ることができる。ここで、フォースフリー制御ではあまり高速な作業は想定していないため、ロボットアームの慣性項や非線形項により発生するトルクは小さい($H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) \approx 0$)と仮定し、外力により発生するトルクは

$$\tau^f = -(\tau^s - \tau^d - \tau^g) \quad (14)$$

として求められる.

トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御とトルクモニタを用いたフォースフリー制御の違いは、フォースフリー制御を実現するために、前者はトルクオブザーバを用いることにより位置情報の検出のみでよく、トルクモニタがないようなロボットアームに対しても適用できるが、後者は位置とトルクの両者の検出が必要となる。トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御では、位置情報のみで外力を推定するため、外力でロボットアームが動作するように、サーボコントローラの速度ループはP制御となる。一方、トルクモニタを用いたフォースフリー制御では、トルクモニタの出力から外力が求められるため、外力でロボットアームが動作する必要がなく、サーボコントローラの速度ループはPI制御である。具体的には、トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御では、サーボコントローラの速度ループがP制御のときサーボコントローラで摩擦と重力で補償されないため、位置指令式(2)で摩擦と重力を補償し、外力トルク τ_f をトルクオブザーバの式(3)で求めているのに対し、トルクモニタを用いたフォースフリー制御では、サーボコントローラの速度ループがPI制御であり、サーボコントローラ内で摩擦と重力が補償されるため、位置指令は式(12)で求め、外力トルク τ_f をトルクモニタによる出力トルクの測定値 τ_m を用いて式(14)で求めている点が異っている。

5.2 トルクモニタを用いたフォースフリー制御での近似の影響について

5.1 節で述べたトルクモニタを用いたフォースフリー制御での $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) \approx 0$ の近似の影響について実験的に調べる.

Fig. 7 Simulation and experimental results for external force 130 N

図6に示すトルクモニタを用いたフォースフリー制御において、式(14)で求めた外力トルクでフォースフリー制御の実験を行い、式(13)と $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})$ のデータを取る。式(13)で求めた外力トルク τ^f から式(12)で位置指令 q^d を導出し、多関節ロボットアームのモデルに入力し、式(11)により理論応答を求めた。図2に示す実験装置で、130 Nの外力を印加して実験を行った。

図7に外力が130 Nのときの実験結果およびシミュレーション結果を示す。(a)は力センサで検出したX軸方向の力、(b)は力センサで検出したY軸方向の力、(c)はリンク1の関節位置、(d)はリンク2の関節位置、(e)はリンク1の関節速度、(f)はリンク2の関節速度、(g)はリンク1の外力トルク、(h)はリンク2の外力トルク、(i)はロボットアーム先端の軌跡であり、点線がシミュレーション結果、実線が実験結果である。但し(g)、(h)には、一点鎖線 $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})$ のグラフを示す。

フォースフリー制御ではあまり高速な作業は想定していないため、ロボットアームの慣性項や非線形項により発生するトルクは小さい ($H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) \approx 0$) と仮定していたが、図7に示すように外力トルクは $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})$ の分だけ大きくなるため、その影響で同じ外力でも応答が大きくなる。外力トルクを式(13)で求めるためには、慣性項と非線形項の数式モデルを計算機で計算する分だけアルゴリズムが複雑になる。そのため、トルクモニタを用いたフォースフリー制御では、 $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})$ を無視している。このことにより図7に示す結果では外力による応答が鈍くなるが、フォースフリー制御に

実用上の問題を与えない。一方で、トルクオブザーバを用いたフォースフリー制御を行う際には、トルクモニタ値 τ^f を用いずに、輪郭制御に必要なエンコーダやポテンシオメータ等で測定される位置情報のみで、トルクオブザーバ $H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})$ を用いて外力トルクを推定している。

6. 結 論

- (1) 本研究では、トルクモニタや力センサを用いずに、トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御を提案した。
- (2) トルクオブザーバ、摩擦補償と重力補償を用いることで、トルクモニタや力センサなしに、フォースフリー制御で必要となる外力を推定した。
- (3) 実機ロボットアームの実験結果から、トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御を行えることを確認し、理論応答に近い動作を得ることができた。
- (4) 従来のトルクモニタを用いたフォースフリー制御と、提案するトルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御とを比較し、それらの違いを明確にした。
- (5) トルクオブザーバを用いた位置情報のみによるフォースフリー制御は、力センサやトルクモニタを使用することなく位置情報のみで実現できるため、フォースフリー制御の適用範囲が著しく拡大する。

参 考 文 献

- (1) 柳田大輔, 中村政俊, 後藤 聡, 久良修郎: 産業用多関節ロボットアームに対する力センサレスのフォースフリー制御, 精密工学会誌, **67**, 9 (2001) 1507.
- (2) 後藤 聡, 松山裕一, 中村政俊, 久良修郎: 産業用多関節ロボットアームの慣性と摩擦と重力の独立補償を図ったフォースフリー制御, 精密工学会誌, **70**, 11 (2004) 1381.
- (3) S. Goto, T. Usui, N. Kyura and M. Nakamura: Forcefree Control with Independent Compensation for Industrial Articulated Robot Arms, Control Engineering Practice, **15**, 6 (2007) 627.
- (4) D. Kushida, M. Nakamura, S. Goto and N. Kyura: "Human Direct Teaching of Industrial Articulated Robot Arms Based on Forcefree Control", Artificial Life Robotics, **5**, (2001) 26.
- (5) D. Kushida, M. Nakamura, S. Goto and N. Kyura: "Flexible Motion Realized by Force-free Control: Pull-Out Work by an Articulated Robot Arm", International Journal of Control, Automation, and Systems **1**, 4 (2003) 464.
- (6) 柳田大輔, 中村政俊: 運動障害者のための食事動作支援装置と制御法の開発, 電気学会論文誌 C, **124-C**, 6 (2004) 1296.
- (7) <http://www.tokyo.numata.co.jp/coolmuscle.htm>
- (8) 小俣 亮, 友成伸保, 雑賀 優, 小山崇之, 黄 健, 藪田哲郎: コンプライアンス制御可能な小型ヒューマノイドの研究, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2005).
- (9) 館 榊 泰輔, 荒井裕彦: 力センサを用いないダイレクト・ドライブ・マニピュレータのインピーダンス制御, 日本ロボット学会誌, **7**, 3 (1989) 172.
- (10) 村上俊之, 中村 亮, 郁 方銘, 大西公平: 反作用力推定オブザーバに基づいた多自由度ロボットの力センサレスコンプライアンス制御, 日本ロボット学会誌, **11**, 5 (1993) 765.
- (11) 大石 潔, 宮崎 勝, 藤田昌弘: H^∞ 制御に基づくセンサレス力制御, 電気学会論文誌 D, **122-D**, 9 (1992) 852.
- (12) 大石 潔, 宮崎 勝, 藤田昌弘: 力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御, 日本ロボット学会誌, **11**, 3 (1993) 468.
- (13) 中村政俊, 後藤 聡, 久良修郎: メカトロニクス系の制御-産業界における問題点とその理論的解決, 森北出版 (1998) 78.
- (14) 藤野義一, 久良修郎: モーション・コントロール, 産業図書 (1996) 98.
- (15) 大須賀公一, 前田浩一: マニピュレータの動特性同定法, 計測自動制御学会論文集, **22**, 6 (1985) 637.
- (16) 吉田浩治, 池田展也, 前田浩一: 6自由度産業用マニピュレータに対するパラメータ同定法の実証的研究, 日本ロボット学会誌, **11**, 4 (1993) 564.
- (17) 杉山謙一郎, 松浦龍生, 前田浩一: 6自由度産業用マニピュレータを用いたモデルベース運動制御の実証研究, 日本ロボット学会誌, **20**, 5 (2002) 521.