

# 安定した接触を実現するアドミッタンス制御手法

武居 直行\* 野畑 茂広\* 藤本 英雄\*

## Admittance Control Method Achieving Steady Contact

Naoyuki Takesue\*, Shigehiro Nobata\* and Hideo Fujimoto\*

This paper is concerned with the human-robot system such as power assist system based on the position-control-based impedance control (admittance control). The system has two force inputs from the operator and the environment, which may cause the vibratory behavior when the robot comes in contact with the environment. It is because the operational force and the contact force do not balance due to the noise, error, delay and so on. This paper proposes the admittance control with two inputs that achieves steady contact with an environment by modifying the contact force information. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through several experiments.

**Key Words:** Admittance Control, Impedance Control, Human-Machine System, Cooperative Task System, Power Assist

### 1. はじめに

人とロボットが協調して作業する研究の多くは、ロボットの手先に取り付けられた力覚センサの情報を用いた機械インピーダンス制御 [1] を採用している。機械インピーダンス制御は、その実装形態としてトルク制御ベース [1] と位置制御ベース [2] に大きく分類される。前者は、摩擦抵抗を少なからず含む減速機を用いたロボットでは操作性が悪化し実用に耐えるのは難しい。後者はアドミッタンス制御とも呼ばれており、力センサの情報に基づいて運動目標値を求め、その目標に対して位置（または速度）制御するため、産業用ロボットなどの位置制御ベースのロボットに適用しやすく、また操作性も改善されたものとなる。

しかしアドミッタンス制御では、通常は高ゲインの位置（または速度）制御を行っており、その目標位置は力センサの情報に基づいて決めるため、力センサを介さずに加えた力に対してはマニピュレータはほとんど動かない。そのため、力センサを配置していない部分が人や環境に接触すると、怪我や破損が生じる危険性がある。人とロボットが空間を共有していく必要性が高まっており、人や環境と接触するロボットの安全性を考慮して、外力に対してコンプライアンスを有するアドミッタンス制御が必要となる。

一方、力センサを用いずに外力推定によりインピーダンス制御する手法も提案されているが、その多くはダイレクトドライブ (DD) ロボットを対象としている [3]~[5]。減速機を有する

ロボットでの研究 [6]~[8] も行われているが、減速機の摩擦やバックラッシュなどを完全にモデル化するのは難しく、力覚センサを用いた場合に比べ操作性の低下は否めない。

操作性を保つ一番の方法は、操作部位に配置した力覚センサで直接計測した操作力情報を用いることである。一方、ワークや環境は頻繁に衝突する可能性があり、その衝撃で力覚センサが破損する危険性があるため、ロボットとワーク・環境との間に力覚センサを配置することは望ましくないとされる。

そこで本研究では、力覚センサの情報を用いて操作性を維持しつつ、力覚センサを介さずにリンクなどに作用した外力に対してはその推定値を用いることにより、環境との接触への安全性を高めたアドミッタンス制御を実現する。力覚センサ情報と外力推定情報を併用する手法は他にも提案されている [5] が、DD ロボットを対象としたものであり、減速機等に起因する推定誤差や接触時の挙動に関しては議論されていない。また、実測外力と推定外力を用いたデュアルアドミッタンス制御（文献 [5] ではデュアルインピーダンス制御と書かれている）により、操作者がロボットを環境に接触させても、コンプライアントな動作が可能となるが、接触状態からさらに押し付けるような状態では発振現象が生じるという問題 [9] [10] がある。本論文ではその解決手法として、推定外力を修正する安定接触制御法を提案し、押し付け接触実験およびなぞり接触実験により、提案手法の有効性を示す。

以下に本論文の構成を示す。第 2 章では、本論文で想定する人・ロボット・環境系について述べ、ロボットマニピュレータの運動方程式および本論文で用いる実験装置を示す。第 3 章において力覚センサを介さずに作用する未知外力の推定法について述べ、実験により実測外力と推定外力の比較を行う。第 4 章

原稿受付 2007 年 12 月 14 日

\*名古屋工業大学

\*Nagoya Institute of Technology

■ 本論文は学術的に評価されました。

では、実測外力とともに推定外力を用いたデュアルアドミッタンス制御を示し、その利点と問題点について考察する。さらに、問題となる発振現象を抑え、安定した押し付け接触が可能な安定接触制御法を提案する。押し付け接触実験およびなぞり接触実験を行い、本提案手法の有効性を示す。最後に第5章で本論文を総括する。

## 2. ロボットマニピュレータ

### 2.1 想定する人・ロボット・環境系

Fig.1のように、人の操作力に応じて動作するロボットマニピュレータを考える。人の操作力はロボットとハンドルの間に配置した力覚センサにより計測できる。ロボットが把持しているワーク等は、環境と頻繁に接触することが想定されるため、ロボットとワークの間には破損しやすい力覚センサを配置しない。すなわち、環境からの外力は実測できない。このように実測外力と未知外力が同時に作用しているロボットマニピュレータのアドミッタンス制御（位置制御ベースインピーダンス制御）について考える。

### 2.2 ロボットマニピュレータの運動方程式

Fig.1のように、力覚センサを介して人が操作するとともに、未知外力が作用しているロボットマニピュレータの運動方程式は、次のように表すことができる。

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + r(\dot{q}) + g(q) = \tau_a + \tau_s + \tau_e \quad (1)$$

ここで、 $n$  を関節自由度とすると、 $q \in \mathcal{R}^n$  はロボットアームの関節角度ベクトル、 $H(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  は慣性行列、 $C(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  はコリオリ・遠心力に関する行列、 $r(\dot{q}) \in \mathcal{R}^n$  は関節摩擦力ベクトル、 $g(q) \in \mathcal{R}^n$  は重力項のベクトルである。

また、右辺の  $\tau_a \in \mathcal{R}^n$  はアクチュエータの出力トルクである。ロボットの手先座標系の自由度を  $m$  とすると、 $\tau_s \in \mathcal{R}^n$  は力覚センサを介して作用した外力（操作力） $f_s \in \mathcal{R}^m$  によるトルクであり、 $\tau_e \in \mathcal{R}^n$  は環境との接触部に作用する計測できない外力  $f_e \in \mathcal{R}^m$  によるトルクである。すなわち、 $J_s(q) \in \mathcal{R}^{m \times n}$  および  $J_e(q) \in \mathcal{R}^{m \times n}$  をそれぞれ操作部および環境との接触部におけるヤコビ行列とすると、 $\tau_s = J_s^T(q)f_s$  および  $\tau_e = J_e^T(q)f_e$  と表される。しかし、実際にはロボットが環境に接触する箇所は

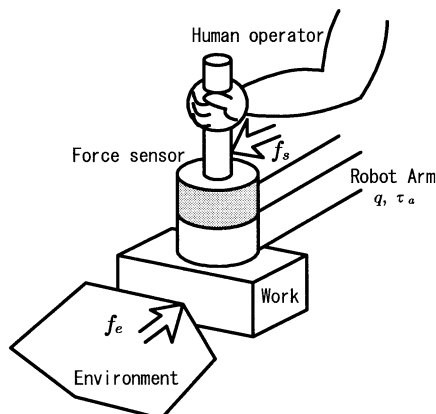


Fig. 1 Power assist robot in contact with environment

不明であるため、 $J_e(q)$  は厳密には分からない。本論文では簡単のために、手先に等価な外力が働いているものとし、 $J_e(q) = J_s(q)$  とし、 $J(q) \in \mathcal{R}^{m \times n}$  と表すことにする。

### 2.3 実験装置

本研究では Fig.2 に示す平行 2 リンク型マニピュレータを用いる。関節間距離（リンク長さ）は  $L = 0.6$  [m] であり、手先はおおむね  $0.8$  [m]  $\times$   $0.6$  [m] の可動範囲を持つ。関節角度は反時計方向を正とする（Fig.2 では、 $q_0 < 0$ 、 $q_1 > 0$  となっている）。

アクチュエータには減速比 1:50 の 32 型ハーモニックドライブを有する AC サーボアクチュエータ（(株)ハーモニック・ドライブ・システムズ製）を二つ用いている。最大トルクは  $220$  [N·m]、最高回転速度は  $90$  [rpm] であるが、本論文の実験では、最大スベックの  $1/10$  程度のモータ出力トルクで十分である。

手先には定格  $400$  [N] ( $x, y$  軸方向)、 $800$  [N] ( $z$  軸方向) の力覚センサ（ニッタ（株）製）が固定されており、操作力の検出が可能である。操作力をもとに手先位置の目標値を計算し、さらに逆運動学よりアクチュエータの角度目標値を求め、位置制御系を構成している。

制御は、PC（CPU：Pentium IV、クロック：2.6 [GHz]）上の ART-Linux [11]（linux kernel 2.4 ベース）を用いて、サンプリング時間  $T = 0.001$  [s] で行っている。

### 2.4 パラメータ

本マニピュレータにおける自由度は  $n = 2$ 、 $m = 2$  であり、式 (1) における行列・ベクトルは、次のように表される。

$$q = \begin{bmatrix} q_0 & q_1 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$H(q) = \begin{bmatrix} I_0 & C_r \cos_{01} \\ C_r \cos_{01} & I_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

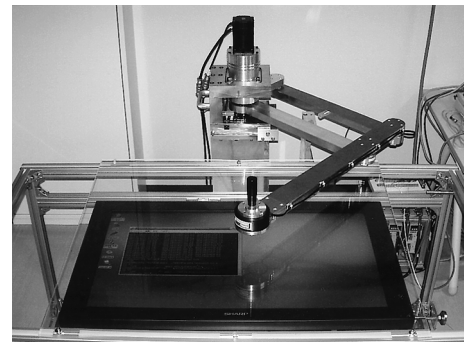


Fig. 2 Picture and coordinate of manipulator

**Table 1** Identified parameters

Symbol of parameter	Identified value
$I_0$	2.7 [kg·m <sup>2</sup> ]
$I_1$	1.1 [kg·m <sup>2</sup> ]
$C_r$	-0.64 [kg·m <sup>2</sup> ]
$B_0$	6.4 [N·m/rad]
$B_1$	4.6 [N·m/rad]
$E_0$	6.6 [N·m]
$E_1$	4.5 [N·m]

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & C_r \dot{q}_1 \sin_{01} \\ -C_r \dot{q}_0 \sin_{01} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$r(\dot{q}) = \begin{bmatrix} B_0 \dot{q}_0 + E_0 \operatorname{sgn}(\dot{q}_0) \\ B_1 \dot{q}_1 + E_1 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (6)$$

$$J(q) = \begin{bmatrix} -L \sin q_0 & L \sin q_1 \\ L \cos q_0 & -L \cos q_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $\cos_{01} = \cos(q_0 - q_1)$ 、 $\sin_{01} = \sin(q_0 - q_1)$ 。

$I_0$ 、 $I_1$  は各関節に関する慣性パラメータであり、 $C_r$  はコリオリ・遠心力に関するパラメータである。 $B_0$ 、 $B_1$  および  $E_0$ 、 $E_1$  は各関節における粘性係数およびクーロン摩擦力のパラメータである。各パラメータの同定値の一例を **Table 1** にまとめる。

### 3. 外力推定

環境との接触に対するアドミッタンス制御の安全性を高めるために、環境との接触力を推定することを考える。

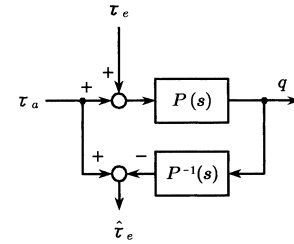
#### 3.1 外力推定法

外力推定法は大きく二つに分けられると考えられる。一つは外乱オブザーバ（例えば文献 [4] [12]）のように、モータ入力トルク  $\tau_a$  とモータの運動結果  $(q, \dot{q}, \ddot{q})$  から逆算したトルクとの差を外力として捉える方法である (**Fig. 3 (a)** 参照)。もう一つは、目標となる運動のための理想的な入力トルク（フィードフォワードトルク  $\tau_f$  と呼ぶことにする）と実際のトルク  $\tau_a$  との差を外力としてとらえるもの（例えば文献 [6]~[8]）である (**Fig. 3 (b)** 参照)。

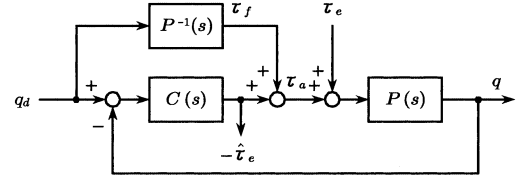
前者は基本的にはどのような制御系にも適用できると思われるが、実際の運動結果（特に加速度）を要することに注意が必要である。後者は目標の運動  $q_d$  がないと用いることができないが、位置制御をベースとしているアドミッタンス制御の場合には問題とならない。また、**Fig. 3 (b)** から分かるように、後者では、フィードバック制御器の出力トルクが推定の外力トルク  $-\hat{\tau}_e$  と見なせるため、別途計算が不要となる。本論文では、後者を用いるものとするが、モデルのパラメータが十分正確であれば、両者の結果に大きな差は見られない。

目標値  $q_d$  が与えられた場合、その値をもとに動力学補償（フィードフォワード）を行い、さらにフィードバックとして、例えば各関節での PD 制御を考えると、モータトルクは次式のようなになる。

$$\tau_a = \hat{H}(q_d)\ddot{q}_d + \hat{C}(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + \hat{r}(\dot{q}_d) + \hat{g}(q_d) - J^T(q) f_s - K_p \tilde{q} - K_d \dot{\tilde{q}} \quad (8)$$



(a) Disturbance observer



(b) Difference between reference and actual torque

**Fig. 3** Estimation methods of external force

ここで、 $\hat{\cdot}$  は同定値（あるいは推定値）であることを表し、 $\tilde{q}$  は  $q - q_d$  を表す。 $K_p \in \mathcal{R}^{n \times n}$  は比例ゲインを、 $K_d \in \mathcal{R}^{n \times n}$  は微分ゲインをそれぞれ表す正定対称（対角）行列である。

パラメータの同定が十分精度良くできているものとし、さらにロボットの運動が目標どおりに実現されているとすると、次のように考えることができる。

$$\begin{cases} H(q)\ddot{q} \simeq \hat{H}(q_d)\ddot{q}_d, & C(q, \dot{q})\dot{q} \simeq \hat{C}(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d, \\ r(\dot{q}) \simeq \hat{r}(\dot{q}_d), & g(q) \simeq \hat{g}(q_d) \end{cases} \quad (9)$$

よって、式 (1) に式 (8) を代入すると、外力推定値として、次式が得られる。

$$J^T(q)\hat{f}_e = K_p \tilde{q} + K_d \dot{\tilde{q}} \quad (10)$$

これは先に述べたように、フィードバック (FB) 項そのものである。

内界センサのみで外力検出し、力制御する方法としては、位置偏差を利用するもの [13] [14] や動的補償を加えたもの [15] がある。また、力補助を行うもの [16] もある。文献 [8] では、準静的な接触状態として、慣性、コリオリ・遠心力項を無視し、外力が FB 項と一致することを述べている。適応制御ベースの衝突判定手法 [6] もパラメータ同定に適応制御を利用しているが、結果的には FB 項を用いていることと等価であり、またフォースフリー制御 [7] も同様である。

#### 3.2 外力の実測値と推定値との比較実験

外力の推定精度を確認するために、2 章で示したマニピュレータを用いて実験を行う。この実験では、式 (8) のように実測外力  $\tau_s = J(q)^T f_s$  を補償せずに次式のようなモータトルクとする。

$$\tau_a = \hat{H}(q_d)\ddot{q}_d + \hat{C}(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + \hat{r}(\dot{q}_d) + \hat{g}(q_d) - K_p \tilde{q} - K_d \dot{\tilde{q}} \quad (11)$$

この制御式を用いた状態で、力覚センサを介して操作すると、

$$J^T(q)\hat{f}_e = K_p \tilde{q} + K_d \dot{\tilde{q}} = J^T(q) f_s \quad (12)$$

となるため、実測外力  $f_s$  と推定外力  $\hat{f}_e$  の比較が可能となる。

次式のように慣性  $M$  [kg], 粘性  $D$  [N·s/m], クーロン摩擦力  $F(\dot{p}_d, f_s)$  [N] を実現するように、リジッドアドミッタンス型の仮想摩擦モデル [17] を用いて、実測した外力  $f_s$  から目標手先座標  $p_d$  を求める。

$$f_s = M\ddot{p}_d + D\dot{p}_d + F(\dot{p}_d, f_s) \quad (13)$$

求めた手先座標から逆運動学により、目標関節角度  $q_d$  を求め、式 (11) により位置制御する。本実験では、 $M = 10$  [kg],  $D = 20$  [N·s/m],  $\max(F) = 5$  [N] とした。

力センサのハンドルを持って動かしたときの、操作力の実測値と推定値 (式 (12)) の一例を  $x$ ,  $y$  成分について Fig. 4 に示す。黒の実線が実測値  $f_s$  であり、グレーの実線が推定値  $\hat{f}_e$  である。また、軌道を黒実線で、実測外力ベクトル  $f_s$  を黒矢印で、推定外力ベクトル  $\hat{f}_e$  をグレーの矢印で表した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 中に 20 [N] の大きさの外力ベクトルを示す。

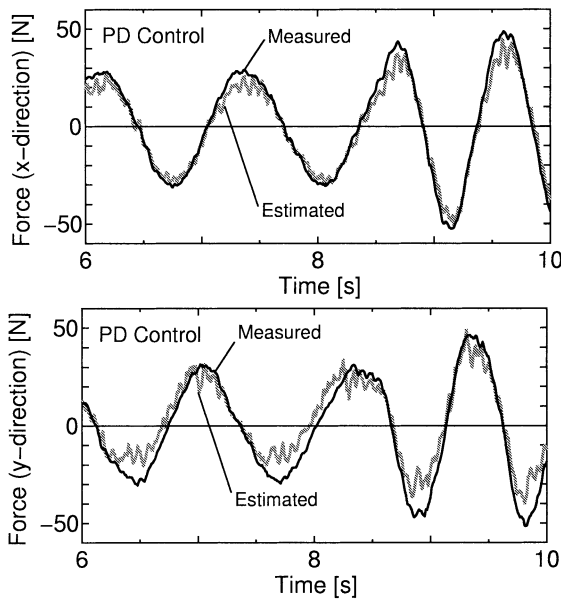


Fig. 4 Comparison with measured and estimated forces under PD control

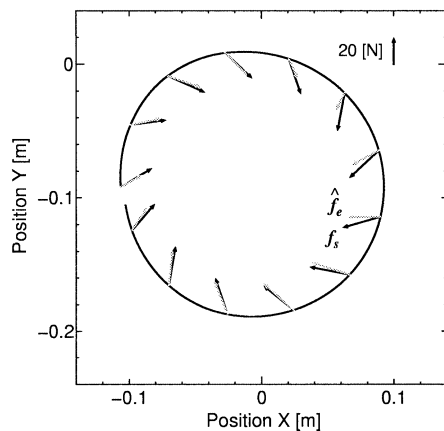


Fig. 5 Comparison with measured and estimated force vectors

今回の実験では、 $x$  成分に比べ、 $y$  成分で誤差が大きくなってしまった結果となった。また、操作力が小さい場合には誤差も少なくなっているが、操作力が大きいときに特に誤差が発生しているように見える。これは、ちょうど操作力がピークになる付近で関節回転速度がゼロを交差しており、静止摩擦等のモデル誤差が生じやすいためだと考えられる。結果として、全体で最大 10 [N] 程度の誤差が現れており、外力ベクトルの向きが若干ずれているが、逆向きになるような問題は生じていない。次章では、この誤差を考慮してパラメータを決定する。

上記では PD 制御の結果を示したが、さらに、PID 制御、計算トルク制御および分解加速度制御での実験も行った。いずれもほぼ同じ推定結果であることが確認でき、どのフィードバック手法でも外力推定に用いることができるといえる。

#### 4. アドミッタンス制御における安定接触制御法

##### 4.1 実測外力と推定外力を用いたアドミッタンス制御

測定値と推定値に独立にインピーダンスを設定することが提案されている [5]。ダイレクトドライブシステムでなく減速機構を有する場合、内在する摩擦により推定値に誤差が含まれ、その推定誤差により意図しない挙動が生じる。各軸で同定した摩擦の大きさにより閾値を設けることも考えられるが、手先部では異方性となり、操作性の悪化が懸念される。

そこで、式 (13) のように、手先部での摩擦特性 [17] [18] を設定することを提案する。すなわち、実測外力および推定外力に対するインピーダンスを以下のように設定する。

$$f_s = M_s \ddot{p}_s + D_s \dot{p}_s + F_s(\dot{p}_s, f_s) \quad (14)$$

$$\hat{f}_e = M_e \ddot{p}_e + D_e \dot{p}_e + F_e(\dot{p}_e, \hat{f}_e) \quad (15)$$

この二つのインピーダンス特性から、手先位置目標値  $p_d = p_s + p_e$  を算出する。逆運動学により関節角度を求め、式 (8) により位置制御を行う。

設定摩擦力  $F_e$  が駆動系の摩擦トルクの手先換算よりも大きければ、推定誤差による挙動を抑えることができる。適度な摩擦力は位置決め作業に有効 [18] であるが、設定摩擦力が大きくなりすぎると操作性が悪くなる。本論文では、操作性と 3.2 節で得られた推定誤差の大きさを考慮し、各インピーダンスパラメータを、 $M_s = M_e = 10$  [kg],  $D_s = D_e = 20$  [N·s/m],  $\max(F_s) = 3$  [N],  $\max(F_e) = 10$  [N] とした。ただし、 $\max(F_e)$  の値はクーロン摩擦力の大きさを表す。

##### 4.2 動作確認実験および問題点

###### 4.2.1 自由空間における動作実験

ロボット手先のハンドルを持って  $f_s$  だけで円運動した場合およびリンク部を持って  $\hat{f}_e$  だけで円運動した場合の実験結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。黒実線は軌道を、黒矢印は実測外力ベクトル  $f_s$  を、グレーの矢印は推定外力ベクトル  $\hat{f}_e$  をそれぞれ表す。図中に 20 [N] の大きさの外力ベクトルを示す。これらの結果から、自由空間において、力覚センサを介しての運動とリンク部を介しての運動が、同様に実現できていることが確認できる。

###### 4.2.2 接触動作実験

次に、実測外力と推定外力が同時に作用する実験として、接

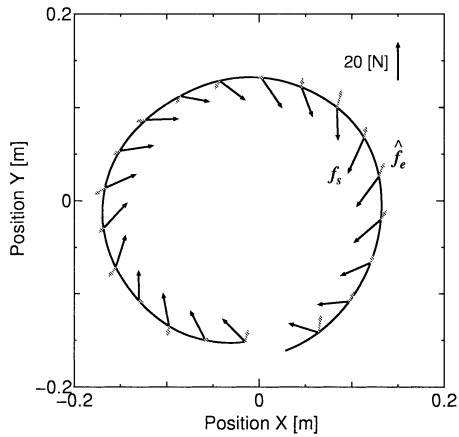


Fig. 6 Motion handling the operating handle

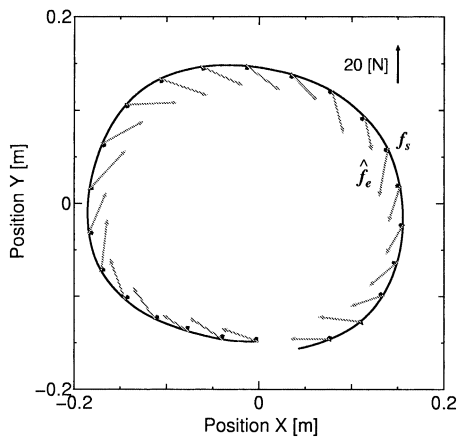


Fig. 7 Motion handling the robot link

触動作実験を行う。Fig. 8 のように、操作ハンドルにバネばかりを取り付け、3~4 [N] の力で移動させる。接触対象は発泡スチロールであり、ロボットアームは力覚センサを介さずに発泡スチロールの環境に接触する。

通常のアドミッタンス制御、すなわち実測外力のみでの実験結果を Fig. 9 に示す。位置  $x$ 、実測外力（操作力） $f_s$  および推定外力（環境接触力） $\hat{f}_e$  をそれぞれプロットした。破線で示す瞬間に環境に接触しているが、手先位置の  $x$  座標（点線、スケールは左軸）および操作力（黒実線、スケールは右軸）はほとんど変化なく推移している。一方、制御には用いていない推定環境接触力（グレー実線、スケールは右軸）は大きく変化しており、環境を破壊してしまう危険性がある（今回の場合、 $\hat{f}_e = 30$  [N] ほどで対象物が初期設置位置からずれてしまった）。

次に、実測外力とともに推定外力も用いたデュアルアドミッタンス制御の実験結果を Fig. 10 に示す。この手法では、接触に伴う推定外力の変化により、手先は対象物をずらしたり、めり込んだりせずに、 $x = 0$  [m] 付近の位置で留まっている。しかし、定常的な押し付けができず、発振現象が生じていることが分かる。これは、誤差や遅れ、ノイズなどのために、実測外力と推定外力が完全に釣り合った状態にならないためであり、仮に環境との接触力を別の力覚センサで実測したとしても（つまり二つの実測外力を用いた場合でも）起こりうる現象である。押

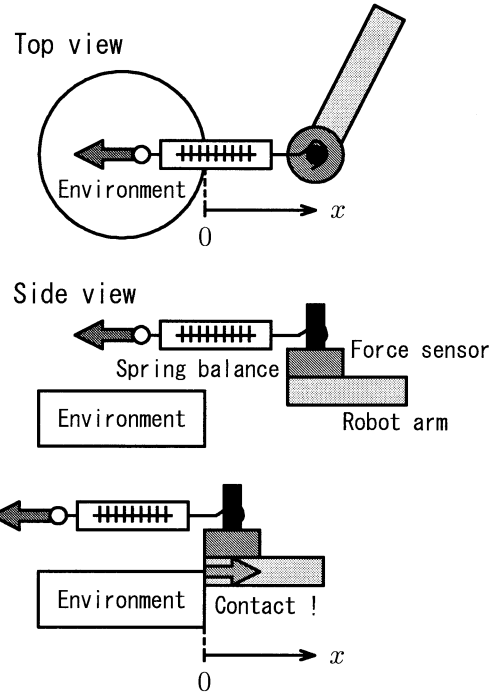
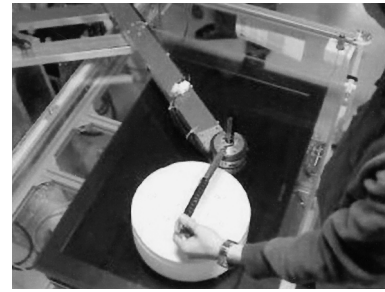


Fig. 8 Situation of contact experiment

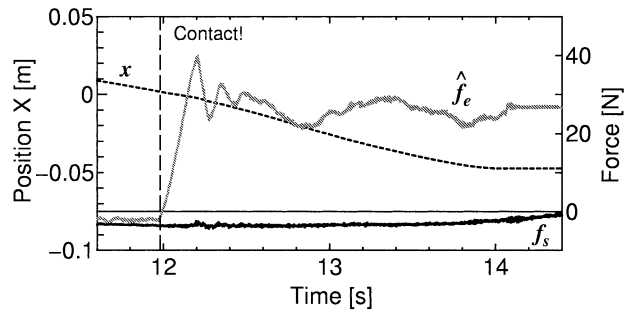


Fig. 9 Contact experiment under conventional admittance control

し付け力を弱くすれば発振させないこともできたが、微妙な力加減が必要となる。

### 4.3 安定接触制御法

前節で確認された問題を解決するため、定常的な押し付けを可能とする安定接触制御法を提案する。先に述べたように、振動的挙動は実測外力と推定外力の不釣り合いにより速度がゼロに収束しないためだと考えられる。そこで、状況に応じて強制的に速度がゼロに収束するように修正することにする。

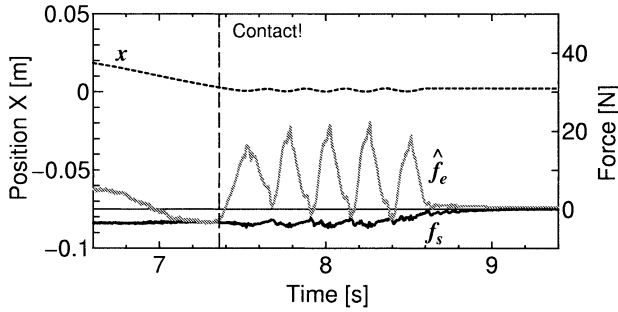


Fig. 10 Contact experiment under dual admittance control

修正する対象には、実測外力と推定外力の二つがあり得るが、実測外力は操作者が力覚センサから加えた外力であり、動作の主体であるといえる。そこで、実測外力値を修正するのではなく、従属側と思われる推定外力値を修正することとする。修正のポイントは、実測操作力以上に推定環境接触力が押し返す目標速度を生成しないようにすることである。

まず簡単に一次元について考える。以下では煩雑さを避けるため、 $f_e$  には  $\hat{\cdot}$  を付けずに記述する。

操作力  $f_s$  が作用したとき、式 (14) より速度  $v_s = \dot{p}_s$  が求まる。また、環境接触力  $f_e$  が作用することによって、式 (15) より速度  $v_e = \dot{p}_e$  が求まる。 $v_s$  と  $v_e$  が対向し (すなわち  $v_s^T v_e < 0$ )、さらに  $v_e$  が  $v_s$  よりも大きくなる場合 ( $|v_s| < |v_e|$ ) には、次のステップの速度目標値  $v_d = v_s + v_e$  がゼロとなるように修正する。

$$v'_e = \begin{cases} -v_s & \text{if } v_s^T v_e < 0 \text{ and } |v_s| < |v_e| \\ v_e & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$v_d = v_s + v'_e = \begin{cases} 0 & \text{if } v_s^T v_e < 0 \text{ and } |v_s| < |v_e| \\ v_s + v_e & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

これにより力が均衡するかのように作用し、発振せずに安定した接触状態を保つことができると考えられる。

これを多次元で考えると、Fig. 11 の速度ベクトル図により、以下のように説明できる (力のベクトルではなく、速度のベクトルであることに注意)。例えば、Fig. 11 (a) のように、操作力により得られる速度  $v_s$  を、外界接触力から求まる速度ベクトル  $v_e$  の方向とその垂直方向の成分 ( $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ ) に、分けて考える (Fig. 11 (b) 参照)。  $v_e$  が  $v_{s1}$  の逆向きであり、その大きさがより大きい場合には、 $v_e$  を  $v'_e = -v_{s1}$  に修正する (Fig. 11 (c) 参照)。これにより、最終的に得られる移動方向は  $v_d$  となる (Fig. 11 (d) 参照)。よって、環境から受ける力の方向には動かず、発振することがない。また、接線方向になぞることは妨げられない。

修正条件は以下のように表すことができる。

$$v'_e = \begin{cases} -v_{s1} & \text{if } v_s^T v_e < 0 \text{ and } |v_{s1}| < |v_e| \\ v_e & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

ただし、 $v_{s1}$  は  $v_s$  の  $v_e$  方向成分であり、次式で表される。

$$v_{s1} = \frac{v_s^T v_e}{v_e^T v_e} v_e \quad (19)$$

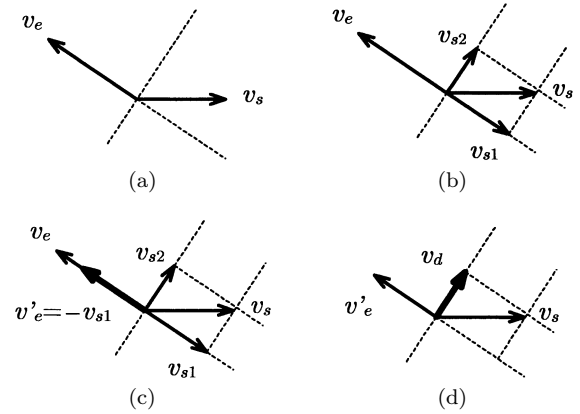


Fig. 11 Vector chart of example

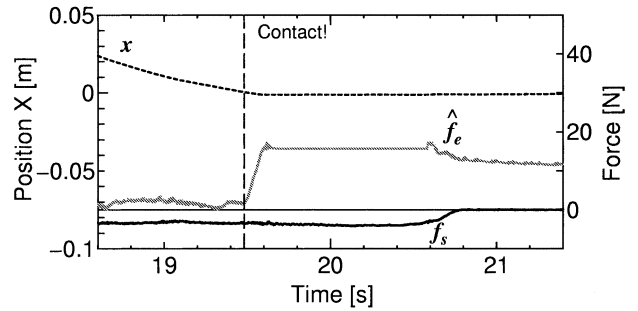


Fig. 12 Contact experiment under dual admittance control with proposed steady contact control

次の速度目標値は、次式で得られる。

$$v_d = v_s + v'_e = \begin{cases} v_{s2} & \text{if } v_s^T v_e < 0 \text{ and } |v_{s1}| < |v_e| \\ v_s + v_e & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

#### 4.4 押し付け接触実験

前節の安定接触制御を実装して Fig. 8 と同様に、操作ハンドルにバネばかりを取り付け、3~4 [N] の力で移動させた。

提案手法による接触実験結果を Fig. 12 に示す。操作力と推定環境接触力には大きな差があるにもかかわらず、この手法では接触してから押し付け状態に至るまで、安定した接触状態 ( $x = 0$  [m] でほとんど一定) を維持できていることが分かる。

推定環境接触力に対する設定摩擦力  $\max(F_e)$  を 10 [N] から 3 [N] に減らした場合の実験結果を Fig. 13 に示す。この場合でも安定した接触状態が維持されていることが分かる。安定した接触状態を保つために、設定摩擦力はほとんど依存していないと考えられる。

#### 4.5 なぞり接触実験

実測値のみのアドミッタンス制御、実測値とともに推定値を用いたデュアルアドミッタンス制御および安定接触制御を導入したデュアルアドミッタンス制御のそれぞれにおいて、Fig. 14 のようななぞり接触実験を行った。接触対象は発泡スチロールであり、力覚センサを介さずにロボット手先部を押し当てて接触させた。

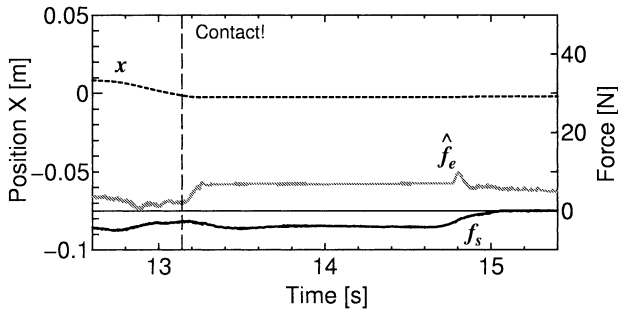


Fig. 13 Contact experiment under dual admittance control with proposed steady contact control (in case of  $\max(F_e) = 3$  [N])

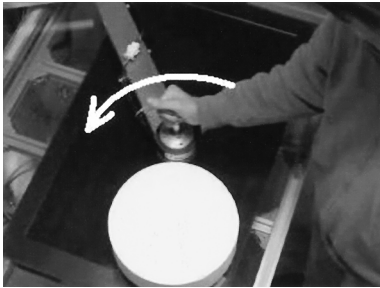
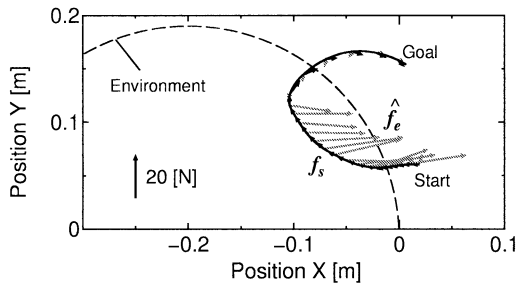
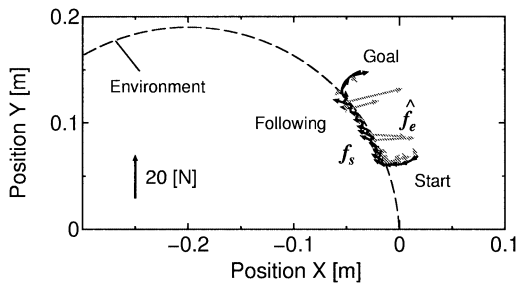


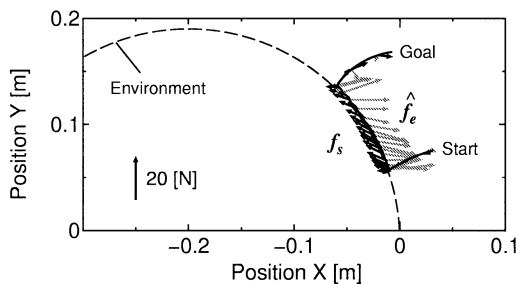
Fig. 14 Situation of following surface experiment



(a) Admittance control



(b) Dual admittance control



(c) Dual admittance control with steady contact control

Fig. 15 Experimental result of following surface

実験結果を Fig. 15 に示す. 黒実線は手先の軌跡であり, 黒矢印は実測操作力ベクトル, グレー矢印は推定環境接触力ベクトルである.

Fig. 15 (a) のアドミッタンス制御において, 推定外力を示しているが, その値は制御に用いていないため, 対象物にめり込むような結果 (実際には対象がずれた) となった. また, 操作力側にはその影響はほとんど現れず, 接触した手応えもないため, 実測外力ベクトルは小さなものとなっている.

Fig. 15 (b) のデュアルアドミッタンス制御では, 推定外力を加味しているため, 表面をなぞるような動作が可能であったが, 発振現象を生じないようになぞるには手加減が容易ではなかった. なぞり中の力の大きさも一定には保てなかった.

最後に, Fig. 15 (c) の提案する安定接触制御を用いた場合は, 発振することなく容易になぞることが可能であった. 操作力も定常的に印加することができ, 提案手法の有効性が示された.

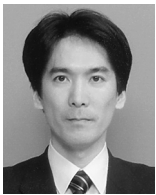
## 5. ま と め

本論文では, 人が操作して動作するロボットが環境との安定した接触作業を行うためのアドミッタンス制御手法を検討した. そのために, 操作性を維持するために操作部の力覚センサの実測外力を用いるとともに, 環境との接触力に対応するフィードバック制御トルクから算出した推定外力を用いた. しかし, 単に実測外力と推定外力を用いたデュアルアドミッタンス制御では押し付け接触時には発振現象が生じる問題があった. そこで, その解決手法として, 条件により推定外力を修正する安定接触制御法を提案した. 押し付け接触実験およびなぞり接触実験により, 提案手法の有効性を示した. 本手法の理論的証明は今後の課題となる.

## 参 考 文 献

- [1] N. Hogan: "Impedance Control Part 1—Part 3," Transaction of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985.
- [2] K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama: "Mechanical Impedance Control of a Robot Arm by Virtual Internal Model Following Controller," Proceedings of IFAC 10th World Congress on Autonomous Control, vol.4, pp.250-255, 1987.
- [3] 館暉, 榊泰輔, 荒井裕彦, 西澤昭一郎, ホセ・フェリペ, ペラエス・ポロ: "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, vol.7, no.3, pp.172-183, 1989.
- [4] T. Murakami, R. Nakamura, F. Yu and K. Ohnishi: "Force Sensorless Impedance Control By Disturbance Observer," PCC-Yokohama'93, pp.352-357, 1993.
- [5] H. Seki, M. Iso and Y. Hori: "How to Design Force Sensorless Power Assist Robot Considering Environmental Characteristics—Position Control Based or Force Control Based—," Proceedings of IEEE IECON'02, vol.3, pp.2255-2260, 2002.
- [6] 小菅一弘, 松本大志, 盛永真也: "適応制御を利用したマニピュレータの衝突検出", 計測自動制御学会論文集, vol.39, no.6, pp.552-558, 2003.
- [7] 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, vol.70, no.11, pp.1381-1386, 2004.
- [8] 永井清, 益原絆, 山中和也: "ハーモニックドライブを有するマニピュレータに対する飽和特性とディザを用いた力センサレス・コンプライア

- ンス制御”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.3, pp.353-360, 2004.
- [9] 池浦良淳: “ロボット—人間協調システムのモデリング”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.331-336, 2000.
- [10] 加藤寛之, 池浦良淳, 野口真平, 水谷一樹, 中村久, 本田朋寛: “接触操作を考慮した産業用パワーアシスト装置のインピーダンス制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.72, no.714, pp.514-521, 2006.
- [11] 石綿洋一: “SPM カーネルに基づく ART-Linux の安定化と実時間処理性能の測定”, 第 3 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 (SI 2002) 講演論文集, vol.2, pp.417-418, 2002.
- [12] K.S. Eom, I.H. Suh, W.K. Chung and S.R. Oh: “Disturbance Observer Based Force Control of Robot Manipulator without Force Sensor,” Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3012-3017, 1998.
- [13] 井上: “人工の手の計算機制御”, 日本機械学会誌, vol.73, no.618, pp.946-954, 1970.
- [14] 黒野: “一対の人工の手の協調制御”, 日本機械学会誌, vol.78, no.682, pp.804-810, 1975.
- [15] 内山: “人工の手の運動制御に関する研究 (第 2 報: 数学モデルによる協調運動の制御)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.45, no.391, pp.323-335, 1979.
- [16] 荒井裕彦, 館暉: “直接駆動マニピュレータの人力操作における操作力検出と能動的力補助”, 日本ロボット学会誌, vol.4, no.3, pp.209-218, 1986.
- [17] R. Kikuuwe, N. Takesue, A. Sano, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “Admittance and Impedance Representations of Friction Based on Implicit Euler Integration,” IEEE Transactions ON Robotics, vol.22, no.6, pp.1176-1188, 2006.
- [18] 武居直行, 菊植亮, 佐野明人, 望山洋, 澤田英明, 藤本英雄: “位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.2, pp.306-313, 2007.



武居直行 (Naoyuki Takesue)

2000 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。2000 年大阪大学助手。2003 年名古屋工業大学寄附講座講師。その後、准教授を経て、2008 年首都大学東京准教授。博士 (工学)。ロボットの運動制御, 触覚テクノロジー, 人間・機械系などの研究に従事。2004 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。日本機械学会, 計測自動制御学会, 電気学会, 精密工学会, IEEE の会員。(日本ロボット学会正会員)



野畑茂広 (Shigehiro Nobata)

2007 年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。現在, 豊田自動織機株式会社勤務。日本機械学会の会員。



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970 年名古屋大学工学部機械学科卒業。現在, 名古屋工業大学教授。ものづくりテクノセンター長。医学工学, 生産システム, ロボットなどの知能化, バーチャルリアリティ・感性の工学に興味を持つ。JUFAS 最優秀論文賞, グッドデザイン賞など多数受賞。スケジューリング学会会長, 文科省科学技術・学術審議会文化資源委員会委員など歴任。現在, 愛知県ものづくり人材育成協議会座長, 日本機械学会フェロー・評議員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)