コンプライアントマニピュレーションにおけるロボットの 動的作業環境に対する適応について†

羅 志 偉*・加 藤 厚 生**・伊 藤 正 美*

On Adaptation of Robot to Dynamic Environment in Compliant Manipulation

Luo Zhi-wei*, Atsuo Kato** and Masami Ito*

This paper studies on the control of robot to perform compliant manipulation on unknown dynamic environments. Compliant manipulation fundamentally requires robot to adapt for environment dynamics. For robot manipulators to be succeeded in performing such manipulation, it's already known that control of position or force alone is inadequate. Focused on the input-output responses of both position and force of the robot control system, we have proposed a model matching approach. In this approach, both for the selection of reference model and the design of force feedback compensator, the accurate information on environment dynamics was needed. However practically, in most of the robot's contact tasks, we never know the environment dynamics or only know the bounds of its parameters before exiting the task.

In this paper, by studying the most unfavourable environment dynamics for robot's compliance, the digital simulator for continuous linear dynamic environment, we try to give out an algorithm for robot manipulators to adapt for the unknown environment dynamics autonomously during the manipulation. A setup of experimental system of one degree of freedom robot and environment has also been made to study various of control approaches for robot's pushing manipulation on dynamic environment. Experiment results show the effectiveness of our design approach.

Key Words: compliant manipulation, robot control
unknown environment dynamics, adaptive, digital
simulator

1. はじめに

作業環境、または操作対象に対して、ロボットが接触作業を行うための制御問題について、この十数年来、多くの研究者から関心が集められ、ロボット工学の分野での新しい課題として活発な研究が行われてきた。

こうしたロボットの接触作業において、幾何学的な環境拘束と動力学的な環境拘束が存在する^{1),2)}。

たとえば、黒板に文字を書くとき、手先は黒板面の幾何学的な拘束を受け、ドアを押すとき、手先はドアの慣性モーメントや軸回りの粘弾性のようなドアのダイナミクスに影響され、動力学的な拘束を受ける。

幾何学的な環境拘束に対応するためのロボットの制御方式として、ハイブリット制御やコンプライアンス制御が有効である^{1),3),4)}。

一方、動力学的な環境拘束における接触作業を行うためには、単にロボット手先の位置、または力を制御するだけでは不十分で、両者の相互関係も考慮する必要がある。この観点から、N. Hogan が、作業環境から見たロボット手先の動特性 (dynamic behavior) がある目標インピーダンスに一致するようにロボットを制御するインピーダンス制御を提案した^{5),6)}。

物理的な意味から見れば、この制御方式はとても直観的で理解しやすい。しかし、制御系を設計する角度から考えると、環境ダイナミクスに適したロボットの目標インピーダンスを接触作業の作業要求から設定することはたいへん抽象的で困難な問題となる。

このことを考え、われわれは制御理論の立場から、ロボット制御系の入出力 (手先の位置と力) 応答に着目して、文献2)で、環境ダイナミクスを考慮したモデ

† 第19回制御理論シンポジウムで発表 (1990・5)

* 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

** 愛知工業大学 豊田市八草町八千草 1247

* Faculty of Engineering, Nagoya University,
Nagoya

** Aichi Institute of Technology, Toyota

(Received October 8, 1990)

(Revised February 4, 1991)

ルマッチング法を提案した²⁾。

モデルマッチング法では、ロボットの手先が環境から動力学的な拘束を受けるとき、力フィードバックを行い、その補償器を、手先の位置運動特性がある規範モデルに一致するように設計する。規範モデルのパラメータの設定に際して、ロボット手先と作業環境との相互作用力を考慮し、環境ダイナミクスに適応できるように選ぶ。合理的な規範モデルの選択指針を与えるために、環境ダイナミクスのモデル化誤差に対するロボット制御系のロバスト性と規範モデルとの関係について検討をし、接触の断続現象やロボットの駆動トルクの限界を考慮した。また、計算機シミュレーションを行い、既知の動的な環境の場合のこの設計法の有効性を確かめた。

この設計法において、作業環境ダイナミクスの正確な情報が必要であった。ところが、現実のロボットの接触作業においては、環境の正確なダイナミクスが事前にわからないケースが多い。

本論文では、文献2)の研究の一貫として、作業環境のダイナミクスが未知の場合における接触作業のためのロボットの環境適応問題について考察する。その対応策として、つぎのような一般的なアプローチを提案する：まず、最初に環境が未知であるときのロボット制御系の設計に際して、基本的には、先の文献2)で提案したモデルマッチング法を用いる。ただし、この場合の規範モデルの選択については、ロボットのコンプライアンス性にとって一番不利な環境ダイナミクスを想定する。これによって、接触の断続現象を排除する。つぎに、このように設計されたロボットを用いて、未知の環境に対して接触作業を行い、接触時におけるロボット手先の位置および環境反作用力を計測する。そして、環境ダイナミクスの近似的なデジタルシミュレータを構成し、計測されたデータから環境ダイナミクスのパラメータを同定する。同定結果によりロボットの規範モデルおよびそれに従った力フィードバックをさらに再調整し、ロボットの動的な環境への適応性を改善する。

さらに本論文ではこのアプローチを適用する一例として実際の接触作業に多く見られるような慣性、粘性と弾性をもつ2次系の環境に対して、それぞれのパラメータの誤差範囲が既知である場合の具体的な式展開を行う。そして、1自由度の回転型ロボットと環境から構成される実験システムを開発し、押す作業の実験および計算機シミュレーションを行い、われわれの設計法の有効性を確認した。

未知の動的環境におけるロボットの接触作業につい

ては、これまで辻らが、インピーダンス制御された多自由度ロボットの作業時に、対象のスティフネスを同定する手順を示し⁷⁾、館らがロボットおよび接触前の作業対象の運動に関する位置、速度および加速度の情報を利用して、未知な対象の弾性、粘性と慣性を求める手法を提案している⁸⁾。しかし、実際の接触作業においては、接触前の対象の速度と加速度がわかりにくく、ロボット手先の加速度の測定（または演算）も大変困難である。また、接触の断続現象および接触による対象物への破壊現象を考えると、ロボット手先の運動は作業対象の運動とは必ずしも一致するとは限らないので、この場合のロボット手先の運動情報を対象の同定に使うのは、合理的ではない。さらに、これらの研究では、同定された対象のパラメータを、いかにロボットの目標インピーダンスの設定に使用するかにについての検討も、まだ十分とはいえない。本論文では、環境を同定するのにただロボットの手先の位置と力の情報だけを必要とし、また同定された結果をロボットの制御に有効に利用するような制御系の設計法も与えた。

以下、本論文の構成として、2章では、先に提案したコンプライアントマニピュレーション（略してCM作業）におけるロボットの環境適応概念およびロボット制御系設計のモデルマッチング法について概説し、3章で未知環境ダイナミクスに対するロボットの適応について考察する。4章では実験システムを説明し、各制御法におけるロボットの押す作業の実験結果について検討する。

2. ロボットの環境適応と制御系の設計

2.1 CM 作業におけるロボットの環境適応概念

CM 作業は、ロボットが動的な作業環境に対して連続的に接触しながら操作を加えるとき、操作方向での環境との相互作用が無視できない作業である。

このような作業を行うためには、単にロボットの位置制御、または力制御だけでは不適切で、作業時におけるロボットの手先の位置応答特性と力応答特性を同時に配慮する必要がある。たとえば、ドアを（掴まずに）速くかつ滑らかにある目標位置まで押すためには、まずロボットの手先がドアにつねに接触（つまり、手先と環境との接触力をつねに正に保つ）しなければならないし、また、対象物を破壊せずに曲げる、または掴むためには、相互作用力が対象の受けられる臨界力より小さい範囲内で行わなければならない。

したがって、CM 作業の基本的な作業要求はこうしたロボットの手先の力応答に対する要求（接触力がつ

ねに正であること、最大の作用力が臨界力より小さいこと)と位置応答に対する要求(速応性と非振動性)からなると考えられる。

文献2)では、この両作業要求が満たされるようなロボットの性質をそれぞれコンプライアンス性と環境適応性として定義している。これによって、ロボット制御系の設計目標を明確化した。

接触作業に特有の接触の断続現象、または対象破壊などの問題を考えると、明らかに、ロボットが環境に適応した作業をするためには、まずコンプライアンス性(接触の連続性と接触力の有限性)をもたなければならない。しかし、コンプライアンス性をもったからといって、ロボットが動的な環境に適応できたとはいえない。場合によって、コンプライアンス性をロボットの環境適応性の基礎として考えることもありうる。両者の関係は作業環境のダイナミクスに拘束される。

このような位置と力のトレードオフを考慮したロボット制御系の具体的な設計法として、先に提案したモデルマッチング法が有効である。

2.2 モデルマッチング設計法

Fig. 1 に、環境ダイナミクスを含めた接触作業ロボットの制御系の一般的な構成を示している。

ここに、 X_d と X はそれぞれ作業空間で記述されたロボットの目標運動入力と手先の実座標、 θ は関節空間でのロボットの関節座標、両座標の幾何学的な関係は $X=L(\theta)$ で与えられる。 $I(\theta)$ と $H(\theta, \dot{\theta})$ は関節空間での慣性行列と角度および速度に関する力、 $J(\theta)$ はヤコビ行列である。 $P(s)=1/s^2$ は非線形補償により単純化されたロボット本体のダイナミクス、 G_e は環境ダイナミクス(一般的にはプロパーではない)、 F_{int} は作業環境からロボットへの反作用力である。 C_x は位置制御補償器で、ロボットの自由空間での運動を可能とするように、従来の追値制御系の設計法により設計

される。 C_f は力フィードバック補償器で、ロボットが動的な環境に接触するとき、上の作業要求を満たすためには、この補償器の設計が問題の焦点となる。

この制御系の環境からみたインピーダンス G_e と力フィードバック C_f との関係は次式のようなものである(付録I参照)。

$$G_e = \frac{1+C_x P}{(1+C_f)P} \quad (1)$$

インピーダンス制御では、ある目標インピーダンスを与えることによって、力フィードバック C_f を設計すると主張しているが、しかし、2.1 節のような作業要求から、この目標インピーダンスをどのように与えるかは大変困難な問題である。

これに対して、先に提案したモデルマッチング設計法では²⁾、既知の環境ダイナミクスに対して、接触するときの位置入力 X_d からロボット手先位置 X までの位置伝達特性のある規範モデルに一致するように力フィードバック C_f を設計している。この規範モデルはロボットの位置運動が速応性と非振動性を満足するように選び、そのパラメータはロボットがコンプライアンス性をもつように設定する。

たとえば、次式のような慣性 m_e 、粘性 d_e と弾性 k_e が既知の環境ダイナミクス

$$m_e \ddot{X} + d_e \dot{X} + k_e X = F_{int}, \quad (m_e > 0) \quad (2)$$

に対して、規範モデルの一つはつぎのように与えられる。

$$G_d = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2} \times \frac{u}{v} \quad (3)$$

ただし、 ω_n は制御系の速応性とコンプライアンス性に関連するパラメータで、環境のパラメータ m_e 、 d_e と k_e に依存して設定される(詳細については文献2)を参照されたい)。 u は作業対象物の破壊臨界力を表わし、 v は対象物の材質によって決まる。たとえば、

Fig. 1 Generalized structure of robot control system

対象物が玉子のような接触の衝突力により破壊されやすければ、

$$v = m_e \omega_n^2 X_d(0_+)$$

と選べ、接触の定常力により破壊されやすければ、

$$v = k_e X_d(\infty)$$

を取ればよい。

3. 未知動的環境に対するロボットの適応

2章の議論からわかるように、モデルマッチング法では、ロボットが動的な環境に適応するために、規範モデル G_d のパラメータの設定も環境ダイナミクスに依存しなければならないし、またこれに従った力フィードバック補償の設計にも、作業環境ダイナミクス G_e の正確な情報が必要であった。しかし、現実の接触作業では、 G_e を事前に正確に知ることが困難である。この場合におけるモデルマッチング法の応用について、基本的につぎの二つの問題点がある：

a. 環境ダイナミクスが未知のときに、規範モデルと力フィードバック補償をいかに適切に設計すればよいのか？

b. 接触作業時において、いかに連続な環境ダイナミクスを同定するか？

以下では、これらの問題を検討し、未知の動的作業環境に対するロボットの適応が可能となるためのアルゴリズムを提案する。

3.1 未知環境における規範モデルの設定

動的な作業環境が未知であるときのロボットの規範モデルと力フィードバックの設計について、まず第一にロボットと環境との接触の断続現象、または対象物破壊を配慮して、接触作業中に、ロボットのコンプライアンス性をできるだけ保つように注意する必要がある。そのため、ロボットのコンプライアンス性にとって一番不利な環境ダイナミクスを想定しなければならない。したがって、問題 a の解決は一番不利な環境ダイナミクスの発見に帰着される。

Fig. 1 に示したロボットの制御系において、環境ダイナミクスのモデル化誤差に対する力感度関数がつぎのように計算される。

$$S_f \triangleq \frac{\hat{G}_{fe} - G_{fe}}{\hat{G}_e - G_e} = \frac{G_d}{G_x} \quad (4)$$

ただし、 G_x は自由運動空間での制御系の位置伝達関数で、 G_{fe} は環境に接触するときの力伝達関数である。

すでに文献 2) で考察しているように、自由運動空間

での位置制御特性を維持しながら、環境拘束空間でのロバストコンプライアンス性を保つためには、(4)式から規範モデル G_d の高周波ゲインをなるべく小さく設定したほうが望ましく、したがって(3)式のような規範モデルの場合、カットオフ周波数 ω_n をできるだけ小さく取ったほうがよい。環境が未知の場合には、規範モデル G_d の設定はコンプライアンス性にとってもっとも不利な環境ダイナミクスを想定して、できるだけ高周波ゲイン（すなわち ω_n ）を小さくするように行わなければならない。

(2)式のような動的な環境を考えると、もし真のパラメータ m_e 、 d_e と k_e が未知で、その誤差変動がある推定範囲にある、つまりつぎのような式

$$G_e = (m_e + \Delta_m)s^2 + (d_e + \Delta_d)s + (k_e + \Delta_k) \quad (5)$$

において、

$$0 < |\Delta_m| < \alpha < m_e$$

$$0 < |\Delta_d| < \beta$$

$$0 < |\Delta_k| < \gamma$$

である場合、 ω_n をもっとも小さくする環境パラメータの想定値はつぎのようになる。ただし、 α 、 β と γ は既知の推定誤差の上限を表わす。

$$m'_e = m_e + \alpha, \quad d'_e = d_e - \beta, \quad k'_e = k_e - \gamma \quad (6)$$

これらは(5)式の動的環境集合の中で、ロボットのコンプライアンス性にとって一番不利な環境パラメータとなっている。このようなパラメータを基準に、ロボットの規範モデル、およびこれに従った力フィードバック補償の設計を行えばよい。これによって、ロボットのコンプライアンス性が最大限に保障され、環境適応を図るための真の環境パラメータの同定に、ロボットの手先の位置情報を有効に利用できる。

3.2 動的な環境のデジタルシミュレータ

以上の選択では、ロボットが未知の動的な環境に対してコンプライアンス性が最大限に保障されたが、環境に対する適応性を改善するためには、結局真の環境パラメータを同定しなければならない。

計算機で離散的にサンプリングされたロボットの手先の位置および環境反力のデータ情報から、時間的に連続な環境ダイナミクスを同定するためには、この連続な環境のデジタルシミュレータを構成する必要がある。

ここでは、Fig. 2 に示すような、零次ホルダの近似を考え、 $X(i) = X'(i)$ とする。

たとえば(2)式の動的環境に関する近似的なデジタルシミュレータはつぎのような差分関係で表わせる。

Fig. 2 Digital simulator of dynamic environment

$$\begin{aligned} X(i) + a_1 X(i-1) + a_2 X(i-2) \\ = b_1 F_{int}(i-1) + b_2 F_{int}(i-2) + r(i) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $X(i)$ 、 $F_{int}(i)$ は、それぞれ時刻 iT にサンプリングされたロボットの手先の位置信号、環境反力で、 $r(i)$ は式誤差である。また、

$$a_1 = -(\alpha_1 + \alpha_2), \quad a_2 = \alpha_1 \alpha_2$$

$$b_1 = \left[\frac{1}{s_1 s_2} + \frac{\alpha_2}{s_2(s_2 - s_1)} - \frac{\alpha_1}{s_1(s_2 - s_1)} \right] \times \frac{1}{m_e}$$

$$b_2 = \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2}{s_1 s_2} + \frac{\alpha_1}{s_2(s_2 - s_1)} - \frac{\alpha_2}{s_1(s_2 - s_1)} \right] \times \frac{1}{m_e}$$

$$\alpha_1 = e^{-s_1 T}, \quad \alpha_2 = e^{-s_2 T},$$

s_1 、 s_2 は(3)式の固有値で、

$$s_{1,2} = \frac{-d_e \pm \sqrt{d_e^2 - 4m_e k_e}}{2m_e}$$

である。 T はサンプリング周期である。

逐次最小 2 乗法 (付録 II 参照) を用いて、観測データ $\{X(i), F_{int}(i)\}$ ($i=1, 2, \dots, N$) から (a_1, a_2, b_1, b_2) を同定し、さらに上の式を用いれば、環境パラメータの同定値 m'_e 、 b'_e と k'_e がつぎのように計算される。

$$m'_e = \left[\frac{1}{s_1 s_2} + \frac{\alpha_2}{s_2(s_2 - s_1)} - \frac{\alpha_1}{s_1(s_2 - s_1)} \right] \times \frac{1}{b_1}$$

$$d'_e = (s_1 + s_2) m'_e$$

$$k'_e = s_1 s_2 m'_e$$

ただし、

$$\alpha_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}{2}, \quad s_{1,2} = -\frac{\log \alpha_{1,2}}{T}$$

である。

3.3 適応アルゴリズム

以上の考察を利用して、本節では、接触作業中に、ロボットが自動的に未知の動的環境に適応するようなアルゴリズムをつぎのように提案する：

Step 1. 環境パラメータを設定する。

ただし、環境が未知のときに、コンプライアンス性にとって一番不利な環境ダイナミクスを考える。たとえば(5)式のような環境に対して、(6)式のように取る。

Step 2. ロボットの制御系を設計する。

a. 規範モデル G_d の設定

(3)式の G_d に対しては、文献 2) の中の

(7)式を解くことによって、 ω_n を決める。

b. カフィードバック C_f の設計

Step 3. CM 作業を行い、作業中のロボット手先の位置および環境作用力を計測する。

Step 4. 作業環境パラメータを同定して、Step. 1 に戻る。

このアルゴリズムの特徴として、ロボットが動的な環境に適応するために、環境ダイナミクス同定結果に従って規範モデルも再調整されることと、環境ダイナミクスを同定するのに手先の速度と加速度情報が必要でなく、実用的には比較的便利であることの 2 点がある。

4. 実験的な考察

(5)式のような動的環境に対する CM 作業を行うための、ロボットの各制御方式について考察するために、実験システムを構成し、1 自由度の回転型ロボットによる押す作業の実験を行った。

4.1 実験システムの構成

Photo. 1 に実験システムの概観を示す。このシステムは水平面で動く 2 台の 1 自由度回転型アーム装置から構成されている。A を作業ロボットとし、B を動的環境として使用している。両アームは基本的に同じもので、粘弾性が調節できるような装置として加藤らによって開発された⁹⁾。

Fig. 3 に、その中の 1 台のアーム装置の構成および位置制御に関するブロック図を示している。この装置はモータで駆動される 2 個の電磁パウダクラッチ

Photo. 1 Experimental setup

Fig. 3 Block diagram of visco-elastic equipment

(神鋼電機 PMC-40 A) の出力を 1 本のシャフトに連結した構造をしている。電磁パウダクラッチは電磁粉体をトルク伝達媒体として使った回転器で、そのトルク伝達特性はクーロン摩擦特性を示す。したがって、一定の入力トルクに対して、出力トルクは入出力軸の角度および角速度に依存せず駆動電流に比例する。入力電流からアームの回転角度までの伝達特性に、モータの動特性の影響が無視でき、単純な慣性特性をなす。これはちょうど非線形補償後のロボットの単純化されたモデルに一致するため、ロボットの各制御方式に関する基礎的な研究にとっては、非常に理想的である。駆動電流は出力軸に付けられたポテンショメータから検出されたアームの回転角度およびその微分値から構成されている。コントローラの比例ゲイン k_0 と微分ゲイン b_0 はハード的に、またソフト的に調節可能となっている。そのため、アーム B はいろいろな定常な環境ダイナミクスを実現できるだけでなく、粘弾性が連続的に変動するような時変的な環境も実現可能である。

接触時における両アームの相互作用力を計測するために、アーム A の先端に、力センサとして LM 5 KA 小型荷重変換器が付けられている。力センサからの電圧信号は 12 ビットの A/D コンバータを通して、NEC PC-9801 RX (10 MHz) 計算機に送られ、そこでソフトウェアにより力フィードバック補償の計算処理を行い、再び D/A 変換され、アーム A の駆動電流信号に加えられる。したがって、この実験システムが、接触作業を行うロボットの各種の制御方式（位置制御、インピーダンス制御、可変粘弾性制御、またわれわれのモデルマッチング制御）に対する研究に、有効に用いられることができる。

4.2 実験およびシミュレーション結果

以上の実験システムを用いて、アーム A により B を押す作業の実験および計算機シミュレーションを行い、アーム A に対する位置制御、インピーダンス制御とわれわれのモデルマッチング制御などの方式について考察を行った。実験はアーム A が静止しているアーム B に接している状態から始めた。

実験では、アーム B の軸回りの慣性モーメント I_e と弾性 k_e の真値をつぎのように設定し、

$$I_e = 0.035 \text{ (kgm}^2\text{)},$$

$$k_e = 0.495 \text{ (Nm/rad)}$$

各パラメータの既知の推定誤差範囲を

$$|\Delta_m| < \alpha = 0.025 \text{ (kgm}^2\text{)},$$

$$|\Delta_k| < \gamma = 0.105 \text{ (Nm/rad)}$$

とおいた。A の慣性モーメントを $I = 0.027 \text{ (kgm}^2\text{)}$ とし、位置補償器を $C_s = \frac{0.2085s + 0.85}{0.01s + 1}$ とした。サンプリング周期は 0.01 s であった。

Fig. 4 に、自由運動空間におけるアーム A の位置制御のステップ応答を示す。(a)、(b)ともにより速応性を示し、アーム装置がシミュレーションに用いたモデルの特性とよく一致することがわかる。

Fig. 5 に、上のように単に位置フィードバック制御を行った場合、アーム A が、アーム B を押すときの回転角度および相互作用力のステップ応答を示す。シミュレーションからは、 $t = 0.3 \text{ s}$ のときに、力の応答値が負となり、実験からも、時刻 $t = 0.4 \text{ s}$ のとき、両

(a) Simulation

(b) Experiment result

Fig. 4 Position response in free motion space

Fig. 5 X, F_{int} responses with position control

アームの断続的な接触現象が観測され、大きな衝突力が記録された。

Fig. 6 に、アーム A に対して、目標インピーダンスを $F_{int} = -0.0054\ddot{X} + 0.0413(\dot{X}_d - \dot{X}) + 0.172(X_d - X)$ となるように (すなわち、Fig. 1 において、 C_x を不変にし、 C_f を定数 4 とする)、インピーダンス制御を行った場合、アーム B を押すときの回転角度と相互作用力のステップ応答を示す。この場合、力応答は常に正で、アーム A の B に対するコンプライアンス性はよいが、角度に注目してみれば、その応答が振動的

Fig. 6 X, F_{int} responses for impedance control with $C_f=4$

になり、アーム B に対する適応性が悪いことがわかる。また、 C_f が定数である限り、接触におけるアーム A と B の位置振動の改善が期待できない。これについて、文献 10) を参照されたい。

これに対して、モデルマッチング法を用いた場合は、アーム B の未知ダイナミクスに対して、3.3 節のアルゴリズムを用いて、見かけ上、

$$I'_e = I_e + \alpha = 0.06 \text{ (kgm}^2\text{)},$$

$$k'_e = k_e - \gamma = 0.39 \text{ (Nm/rad)}$$

と想定すると、Fig. 7 のようなコンプライアンス性の保障された力の応答が得られた。角度の応答についてはこの場合、 C_f の設計にアーム B の真の I_e 、 k_e と違ったパラメータを利用したため、若干の振動が発生し、環境適応性がまだよくないことがわかる。このようなデータを利用して、環境ダイナミクスのパラメータを同定すると、

$$I'_e = 0.03496 \text{ (kgm}^2\text{)},$$

$$k'_e = 0.48222 \text{ (Nm/rad)}$$

が計算され、これを 2 回目の押す動作に代入すると、Fig. 8 のような理想に近い角度と力の応答が得られ

Fig. 7 X, F_{int} responses for $I'_e = I_e + \alpha$, $k'_e = k_e - \gamma$

Fig. 8 Results of our approach

Fig. 9 X, F_{int} responses for $I'_e = I_e - \alpha$, $k'_e = k_e + \gamma$

た。

ただし、環境のパラメータの同定に、環境の近似的なデジタルシミュレータを利用したため、どうしても同定誤差が残り、完全な環境適応性が得られない。これは本手法の限界である。

ここで、もし逆に、アームBの想定値を

$$I'_e = I_e - \alpha = 0.01 \text{ (kgm}^2\text{)},$$

$$k'_e = k_e + \gamma = 0.6 \text{ (Nm/rad)}$$

と取ると、Fig. 9 に示したように、アームAの角度と力のステップ応答が不安定になり、かつコンプライアンス性がよくないことがわかる。

5. おわりに

動的な作業環境、または操作対象に対して、ロボットがうまく操作を行うためには、環境ダイナミクスに適応しながら作業を進めなければならない。

本論文は文献2)の続きとして、CM 作業におけるロボットの未知の動的環境に対する適応問題について検討をし、モデルマッチング設計法を応用した場合、ロボットが未知の環境ダイナミクスに自動的に適応できるような制御アルゴリズムを提案した。

また、実験システムを構成し、一自由度の回転型ロボットによる押す作業の実験を行い、2次系の環境の慣性、粘性と弾性の誤差範囲が既知である場合の考察を具体的に行った。実験結果から、単に位置制御、または固定パラメータの場合のインピーダンス制御では、CM 作業に不適切であることを確認し、モデルマッチング法の有効性を確かめた。

本文も文献2)と同じく、ロボットと環境との接触の初期状態を零状態と仮定した。自由空間からの接近問題はこれからの研究課題となる。

参考文献

- 1) M. T. Mason: Compliant Motion, Robot Motion, Edited by M. Brady, et al., Ch. 5, 305/322 (1982)
- 2) 羅, 伊藤: コンプライアントマニピュレーションのためのロボットの制御設計, 計測自動制御学会論文集, 26-4, 427/434 (1990)
- 3) M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/

Force Control of Manipulators, Trans. of ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 102, 126/133 (1981)

- 4) 吉川恒夫: ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御, 日本ロボット学会誌, 3-6, 25/30 (1985)
- 5) J. K. Salisbury: Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, Proc. 19th IEEE CDC, 95/100 (1980)
- 6) N. Hogan: Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I ~ III, Trans. of ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 107-1, 1/24 (1985)
- 7) T. Tsuji, K. Ito and H. Nagaoka: Identification and Regulation of Mechanical Impedance for Force Control of Robot Manipulators, 11th. Proc. of IFAC World Congress, 184/189 (1990)
- 8) 館, 榊: インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム(I), 日本ロボット学会誌, 8-3, 241/252 (1990)
- 9) 加藤, 伊藤: 機械インピーダンスを自由に調節できる装置, 電子情報通信学会論文誌, J72-A-10, 1687/1694 (1989)
- 10) 羅, 伊藤: 接触作業ロボットの制御設計方針について, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 207/208 (1989)

《付 録 I》

Fig. 1 において、環境がない場合、 $F_{int}=0$ で、 X_d の位置入力に対して、ロボットは C_x により追従動作を行い、手先の実位置 X_b は次式のようなのである。

$$X_b \triangleq G_x X_d = \frac{C_x P}{1 + C_x P} X_d \quad (A.1)$$

一方、同じ X_d 位置入力に対して、環境と接触する場合、環境作用力 F_{int} の影響で、ロボット手先の実位置は X と F_{int} はそれぞれつぎのようになる。

$$X \triangleq G_{ex} X_d = \frac{C_x P}{1 + C_x P + P(1 + C_f) G_e} X_d \quad (A.2)$$

$$F_{int} \triangleq G_{fx} X_d = G_e X \quad (A.3)$$

環境作用力 F_{int} に対して、環境から見るロボットの変形は Fig. 10 に示したように、 $X_b - X$ となり、環境からみたロボットのインピーダンス G_r はつぎの

Fig. 10 Robot pushing on the dynamic environment

ようになる.

$$G_r \triangleq \frac{F_{\text{int}}}{X_b - X} \quad (\text{A.4})$$

(A.1)式と(A.2)式, (A.3)式を代入すると, 次式のようなロボットのインピーダンス G_r とカフィードバック C_f との関係が得られる.

$$G_r = \frac{1 + C_x P}{(1 + C_f)P} \quad (\text{A.5})$$

《付 録 II》

環境の同定について: 3.2 節の(7)式に対して,

$$z_i = [-X(i-1), -X(i-2),$$

$$F_{\text{int}}(i-1), F_{\text{int}}(i-2)]^T$$

$$\theta = [a_1, a_2, b_1, b_2]^T$$

とおくと, つぎのように書き換える:

$$X(i) = z_i^T \theta + r(i)$$

ただし, $i=1, 2, \dots, N$ である.

最小2乗法の逐次計算アルゴリズムを適用すると, パラメータ θ はつぎのように逐次的に計算される.

$$\theta_N = [I_4 - k_N z_N^T] \theta_{N-1} + k_N X_N$$

ただし,

$$k_N = p_N z_N,$$

$$p_N = p_{N-1} - \frac{p_{N-1} z_N z_N^T p_{N-1}}{1 + z_N^T p_{N-1} z_N}$$

である. 初期値として, $p_0 = a I_4$, a を十分大きな正実数となるように選び,

$$\theta_0 = [a_1(0), a_2(0), b_1(0), b_2(0)]^T$$

は(6)式の m'_e , b'_e , k'_e から計算する. また,

$$z_1 = [-X(0), -X(0), 0, 0]^T$$

のように設定する.