作業空間での外乱オブザーバに基づいた可変コンプライアンスゲインを有する複数台マニピュレータの協調制御

学生員 Edi Leksono (慶應大)

正員 村上俊之 (慶應大)

正員 大西公平 (慶應大)

Cooperative Motion Control of Multimanipulator Based on Workspace Disturbance Observer with Variable Compliance Gain

Edi Leksono, Student Member, Murakami Toshiyuki, Member, Ohnishi Kouhei, Member (Keio Univ.)

This paper proposes a cooperative motion control strategy of multimanipulator based on workspace disturbance observer with variable compliance gain. The workspace disturbance observer as an acceleration controller provides a simple, robust and flexible controller structure and computation while the addition of variable compliance gain will maintain the performance of the system in free motion as well as in contact conditions. It is assumed that the goal of the system is to move the grasped object tracking the desired motion trajectory in the presence of a stiff contact environment with a relatively constant system's performance. To achieve the goal of system, the motion trajectory control of the cooperative control is realized using an impedance control approach enhanced by a variable compliance gain. The compliance gain is considered as a reflexive response against the interaction force which plays an important role in adjusting the stiffness of the cooperative system. The value of this gain increases exponentially with the increasing interaction force to resemble the response of muscle against an external force disturbance. The experimental results show that the use of variable compliance gain has advantages over that of conventional impedance control approach such as it does not no longer require a switching mechanism to set the system's compliance according to the object motion condition.

キーワード：協調制御, 作業空間での外乱オブザーバ, インピーダンス制御, 可変コンプライアンスゲイン, 相互作用力

1. ま え が き

複数台マニピュレータの協調制御は任意形状の物体を把持し、その物体を操作目的に応じて動かすことを可能にする。また、比較的大きな力を発生することも可能であるので応用範囲も広く、単一のマニピュレータより有利である。このような理由から、マニピュレータの協調制御に関する研究は活発に行われ、多くの研究成果が発表されている。これらの手法は有用であるが、外乱に対するロバスト性を含めた上で、把持物体の位置制御と内力制御の非干渉化ならびに外力に対する把持の安定化が十分には考慮されていない⁽¹⁾⁽²⁾。

協調マニピュレータの殆どどの制御問題は全制御空間を運動に関する力空間と把持力空間に分離して考慮できる⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。運動力は把持物体とマニピュレータ自身を操作する目的から生成された軌道に追従させるために必要

な力である。一方、把持力は協調マニピュレータが安定に物体を掴むために生成されたものであり、内力とも呼ばれる。本論文では、これらの力をより簡単に制御するため作業空間での外乱オブザーバを応用した制御系を提案している。作業空間の外乱オブザーバに基づいた制御手法を用いれば、システムの内側ループは加速度制御構成になるので運動軌道ならびに力制御への適用は簡単である。特に、運動軌道制御への適用はシステムの目的によって位置、インピーダンス、またはコンプライアンス運動制御等に簡単に拡張することを可能にする。

ロボットの現実的な応用で考慮すべきことに環境との相互作用力があげられる。把持物体の運動が自由であれば協調システムの硬さ(スチフネス)を高くすることが好ましいが逆に物体を動かしている途中で平面的な障害物がある場合、衝突時の撃力を緩和するためシステムの硬さを低化させることが必要となる。協調システムの硬さは制御手法と

そのパラメータに依存するので制御系を設計する時にこの様な要因を考慮しなければならない。従来のインピーダンス制御手法を直接利用した場合、二つの運動条件(自由な運動と拘束運動)を同時に満たしながら高精度な運動制御を実現することは困難である。システムの目標インピーダンスを高くすると物体の運動追従特性を改善できるが、障害物との衝撃力の緩和は保証されない。一方、インピーダンスを低くすると把持された物体が平面的な障害物に接触した場合に、衝撃力の緩和は行われるが、自由運動で軌跡追従性能は低下してしまう。

制御システムに作業空間での外乱オブザーバを採用する場合、システムの動的モデルを記述する時に、公称値を用いてその運動を表し、モデル化誤差を内部的な外乱力として取り扱う。環境から相互作用力がある場合には外部的な外乱力と内部的な外乱力を加えて全外乱力として定義でき、これを推定することが外乱オブザーバの主な役割となる。結局、外乱オブザーバを有する内部ループが加速度制御になることによって全システムでの位置、力制御系が簡単に構成できる。また、位置に関する運動制御も目標加速度のフィードフォワード補償要素を有するPD制御で実現でき、インピーダンス制御あるいはコンプライアント運動制御の構成も容易である。

本論文では環境の外力を考慮した作業空間での外乱オブザーバを用いた複数台協調マニピュレータの一般化インピーダンス制御構成を提案する。提案する制御手法は内側ループに、従来のインピーダンス制御系、さらに協調システムの力フィードバックによる可変コンプライアンスゲインの外側ループが加えられる制御構成である。この外側ループの動作は、作業空間に外乱オブザーバを導入することで保証される。コンプライアンスゲインはゼロから指数的に任意の正数値まで可変である。外力がゼロであればコンプライアンスゲインもゼロとなり、運動軌道に関する協調制御は高インピーダンス制御と等価となる。一方、協調システムが環境から外力を受けた状態では衝突時の撃力を緩和するため、高コンプライアンス制御を実現する。外力に応じてコンプライアンスゲインを指数的に上げることによって協調システムは柔らかくなり、物体の運動は障害物環境の表面に倣うことになる。つまり、提案する制御手法は外力によってシステムの硬さを調整し、その目的操作を達成する。特に、作業空間での外乱オブザーバを協調マニピュレータに適用することで、指定した可変インピーダンス特性は精確に実現され、把持の安定性も向上する。これが提案する手法の一特徴である。

本論文の構成を示す。まず、把持される物体と全てのマニピュレータの動的なモデルから全システムの動的なモデルを示す。次に、協調システムの動的なモデルによって外乱力を定義し、作業空間での外乱オブザーバに基づいた一般化インピーダンス制御系を構成する。さらに、制御空間を分離して得られた内力空間で内力制御系を構成し、イン

ピーダンス制御系と合成したシステムを実現する。更に、本制御手法の有効性を示すために2台のSCARA マニピュレータを用いた協調制御の実験を行う。

2. 協調システムの動的モデル

協調させるマニピュレータの数は m とし、把持される物体に対して各エンドエフェクタの相対的な位置は一定であるとする。そこで、 F_E 、 F_{ext} をそれぞれエンドエフェクタが生成する力と外力であるとすれば、協調マニピュレータに把持される物体に関する全駆動力 F は(1)式で表される。

$$F = J_o^T F_E + F_{ext} \quad (1)$$

ここで、 J_o^T は各先端力から物体の中心までの変換行列である。物体を取り扱う協調制御では先端に生成される力は駆動力と内力に分離され、(1)式より、(2)、(3)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} F_E &= J_o(J_o^T J_o)^{-1}(F - F_{ext}) + F_I \\ &= J_o^+(F - F_{ext}) + F_I \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$F_I = (I - J_o^+ J_o^T) \epsilon = V f_I \quad (3)$$

但し、

$$\begin{aligned} F_I &: \text{内力ベクトル} \\ J_o^+ &: J_o^T \text{の逆行列} \\ \epsilon &: \text{任意の } 3m \times m \text{ 行列} \end{aligned}$$

V は適当な次元のベクトル f_I で内力を表す行列であり、内力の計算と表し方を簡単化する。

マニピュレータのヤコビ行列は正方で非特異行列であると仮定すると、物体とマニピュレータの全システムの動的なモデルは(4)式で表される⁽³⁾。

$$M_h \ddot{x} + N_h + J_m^T F_I = \tau_m + J_m^T J_o^+ F_{ext} \quad (4)$$

ここで、 M_h と N_h はそれぞれ(5)と(6)式の様に書ける。

$$M_h \equiv M_m J_m^{-1} J_o + J_m^T J_o^+ M_o \quad (5)$$

$$\begin{aligned} N_h &\equiv M_m J_m^{-1} (\dot{J}_o \dot{x} - \dot{J}_m \dot{q}_m) \\ &\quad + J_m^T J_o^+ N_o + N_m \quad (6) \end{aligned}$$

但し、

$$\begin{aligned} M_m &: \text{システムの慣性行列} \\ N_m &: \text{マニピュレータの摩擦、コリオリと重力項} \\ J_m &: \text{全てのマニピュレータのヤコビ行列} \\ x &: \text{物体の位置と姿勢のベクトル} \\ q_m &: \text{マニピュレータの関節角度ベクトル} \\ M_o &: \text{物体の質量} \\ N_o &: \text{物体の摩擦、コリオリと重力項} \\ \tau_m &: \text{関節入力トルクベクトル} \end{aligned}$$

(4)で表されるシステムの動力学に基づいて、関節の入力トルクベクトル τ_m は(7)式の様に駆動力と内力成分に分解することができ、さらにマニピュレータ自身を駆動する力と把持物体を駆動する力に分離できる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_m &= J_m^T(F_{em} + F_I) \\ &= J_m^T(F_{ma} + J_o^+(F - F_{ext}) + F_I) \end{aligned} \right\} (7)$$

ここで、 F_{em} は先端に生成される力ベクトルで、 F_{ma} はマニピュレータ自身が必要とする駆動力ベクトルである。

3. 作業空間での外乱オブザーバに基づいた協調制御システムの構成

内力は行列 J_o^T に対してゼロ空間での作用となるので(7)式は(8)式と(9)式の様に協調システムの把持物体の運動駆動力と内力に関する二つの独立な成分に分解することができる。

$$J_o^T J_m^{-T} (M_h \ddot{x} + N_h) = J_o^T J_m^T \tau_m + F_{ext} \\ = (F_n + F_{ext}) \dots\dots\dots (8)$$

$$J_o^T F_I = 0 \dots\dots\dots (9)$$

(8)式と(9)式は協調制御問題が必然的に運動軌道のための制御系と内力の制御系に分離できることを示す。最終的な制御信号は各アクチュエータに送られる電流信号として二つの制御器の合計出力が座標変換される。次節で、協調システムの運動軌道(位置)制御と力制御についてより細かく述べる。

〈3・1〉 外乱オブザーバに基づいた位置制御 複数台の協調マニピュレータの位置制御の目的は、把持物体を所望の軌道に沿って、マニピュレータの協調をとりながら動かすことにある。このシステムの標準的な方程式を得るために(8)式を(10)式に書き直す。

$$M_n \ddot{x} + N_n = F_n \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$M_n = J_o^T J_m^{-T} M_h \\ N_n = J_o^T J_m^{-T} N_h - F_{ext}$$

ロバストな非干渉位置制御を実現するにあたり、協調マニピュレータの初期姿勢により決まる標準対角質量行列 M_{nn} を導入し、等価質量行列を(11)式の様に定義する。

$$M_n = M_{nn} + \Delta M_n \dots\dots\dots (11)$$

ΔM_n はマニピュレータの姿勢が変動したことによるシステムの質量行列の変動を表す。この標準質量行列以外の変動分はシステムの動的な外乱力とみなすことができる。これを数学的に表すと(12)式の様になる。

$$F_n = M_{nn} \ddot{x} + F_{dis} \dots\dots\dots (12)$$

外乱力 F_{dis} は(13)式で計算することができる。

$$\hat{F}_{dis}^m = F_n - M_{nn} \ddot{x} \dots\dots\dots (13)$$

外乱力の計算は外乱オブザーバと等価な構成となりセンサ信号に含まれるノイズを低減するためのフィルタ行列を導入する。基本的に加速度情報を直接利用することが好ましいが、実際には物体の移動速度を利用することが容易であるため、(13)式で表した外乱オブザーバモデルを(14)式の様に書き直す。

$$\hat{F}_{dis}^m = G_H^o(s) \{F_n + G^o(s) M_{nn} \dot{x}\} \\ - G^o(s) M_{nn} \dot{x} \dots\dots\dots (14)$$

但し、

$$G_H^o(s) = \text{diag}\left\{\frac{\alpha_i}{s + \alpha_i}\right\} \\ G^o(s) = \text{diag}\{\alpha_i\} \\ \alpha_i = \text{フィルタゲイン}$$

外乱力に対してシステムの感度を低化させるために α_i を十分大きく選択する。その外乱力が外乱オブザーバで完全に抑圧することができれば、協調システムを純粋な慣性システムと考えることができる。すなわち制御システムの内部ループは加速度制御器となり、システムの望ましい性能を満たす外部ループ制御器の設計は簡単化される。把持物体の所望の運動を実現するため、外部ループに(15)式の様に従来のインピーダンス制御器を構成する。

$$F_n = M_{nn} \{\ddot{x}^{cmd} + \frac{B}{M}(\dot{x}^{cmd} - \dot{x}) \\ + \frac{K}{M}(x^{cmd} - x) - \frac{F_{co}}{M}\} + \hat{F}_{dis}^m \dots\dots\dots (15)$$

但し、

$$x^{cmd} = \text{所望の物体の位置/姿勢} \\ M, B, K = \text{システムの目標インピーダンス} \\ F_{co} = \text{協調システムから環境にかける力}$$

外乱が完全に抑圧できれば、(15)式を(16)式に書き直せる。

$$F_{co} = M \ddot{\hat{x}} + B \dot{\hat{x}} + K \hat{x} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $\hat{x} = x^{cmd} - x$ である。(15)式に示した協調マニピュレータへの力指令を計算するため、物体の位置と速度のフィードバック信号が必要である。この信号は(17-a)と(17-b)式の様にエンドエフェクタの位置と速度ベクトルから得られる。

$$x = L(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \dots\dots\dots (17-a)$$

$$\dot{x} = J_L \dot{x}_{ef} \dots\dots\dots (17-b)$$

但し、

$\mathbf{x}_{ef} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)^T$
 = エンドエフェクタの位置ベクトル
 $\mathbf{L}$ = 位置の変換行列
 $\mathbf{J}_L$ = 物体のヤコビ行列

先ほど述べたインピーダンス制御は物体の運動に対して環境の拘束外力があることに基いて構成された。環境の stiffness が高い場合は環境からの相互作用外力は非常に高くなる可能性があるため、外力を受ける方向に把持物体の位置制御を実現することは不可能となる。従って、環境、協調システムの保護からも物体のコンプライアンス運動制御を実現することが適切であり、(15) 式で表したインピーダンス制御をより一般的なインピーダンス制御に改める必要がある。そのために物体と協調マニピュレータをバネ-ダンパモデルで表されるシステムとし、相互作用力によって引き起こされる物体の運動軌道の修正偏差、 $\Delta \mathbf{x}$ を次の様に表す。

$$\Delta \mathbf{x} = \frac{\mathbf{G}_{comp}}{\mathbf{B}_o \mathbf{s} + \mathbf{K}_o} \mathbf{F}_{co} \quad (18)$$

ここで、

$(\mathbf{B}_o, \mathbf{K}_o)$ = 協調システムのダンパとばね係数
 $\mathbf{G}_{comp}$ = 可変コンプライアンスゲイン

相互作用力による所望の物体のコンプライアンス運動 $\mathbf{x}_c^{cmd}$ は元々の望ましい運動軌道を $\Delta \mathbf{x}$ だけ (19) 式の様に修正することになる。

$$\mathbf{x}_c^{cmd} = \mathbf{x}^{cmd} - \Delta \mathbf{x} \quad (19)$$

物体を把持する協調システムにおいて、相互作用力は各マニピュレータ先端につけられた力センサを利用することで得られる。先端の座標に変換した力、 $\mathbf{F}_E^{res}$ 、より外力と内力はそれぞれ (20) と (21) 式で得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ext} &= -\mathbf{J}_o^T \mathbf{F}_E^{res} \\ &= -\mathbf{F}_{co} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\mathbf{F}_I = (\mathbf{I} - \mathbf{J}_o^+ \mathbf{J}_o^T) \mathbf{F}_E^{res} \quad (21)$$

実際に (18) 式で述べたコンプライアンスゲイン $\mathbf{G}_{comp}$ の値を一定とすることもできるが力センサの調整が不十分な場合、例えばセンサの力のオフセットや手先のモーメントの影響などがある時に実際の外力がなくてもコンプライアンス運動に軌道偏差が生じてしまう。また、前章でも述べた様に一定のコンプライアンスゲインでは自由運動と拘束運動の両方に対して、良い制御性能を得ることは難しい。このような問題を避けるため、一定のコンプライアンスゲインの代わりに可変コンプライアンスゲインを導入した手法を提案する。コンプライアンスゲインを変更させる一つの手法としては外力に対して人間の筋肉に倣った応答を行う

図1 一般化協調運動軌道の構成

Fig. 1. Generalized cooperative motion trajectory control scheme

ものを考える。一般に、外力が大きければ大きいほど人間の筋肉の反作用応答は柔らかい状態からより硬い状態に指数的に移る。ここで、人間を保護する観点からは stiffness は硬い状態から柔らかい状態へ移行する。そこで、マニピュレータ保護の観点から硬い状態からより柔らかい状態に指数的に移る可変ゲインを導入する。協調マニピュレータにおけるコンプライアンスゲインは相互作用外力に対するシステムの stiffness の反動的な応答であり、(22) 式で表される。

$$\mathbf{G}_{comp} = \text{diag}\{a_i(1 - \exp(-b_i |F_{co}^i|))\} \quad (22)$$

ここで、 a_i, b_i は一定の係数である。図1に協調マニピュレータの可変コンプライアンスゲインを用いた一般化運動軌道制御構成を示す。

〈3・2〉 外乱オブザーバに基づいた力制御の構成 (9)

式の内力制御分は物体に作用する力の合計が零となる様に各マニピュレータの先端に望ましい内力を生成させることを示している。この場合、力制御のための動的モデルは単一のマニピュレータモデルであるため、単一のマニピュレータに適用される従来の力制御手法が協調マニピュレータシステムにも応用できる。

速度フィードバックを利用すると、力制御システムの動力学は (23) 式で表される。

$$\mathbf{F}^{cmd} - \mathbf{F}^{res} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{M}_{nn}^{in} \ddot{\mathbf{x}}_e \quad (23)$$

但し、

$\mathbf{F}^{cmd}$ = 力指令ベクトル
 $\mathbf{K}_v$ = 速度フィードバックゲイン
 $\mathbf{M}_{nn}^{in}$ = 標準質量行列
 $\mathbf{x}_e$ = 先端の位置偏差

力センサより検出された内力がバネ-ダンパとしてモデル化できると仮定すると、力から位置までの2次遅れの伝達関数が得られる。但し、応答の速さは制御器のゲイン $\mathbf{K}_v$ と標準質量行列 $\mathbf{M}_{nn}^{in}$ の影響を受ける。また、力信号から加

速度指令信号を生成するために、システムに等価仮想対角質量行列 M_{vn} を(24)式のように付加する。

$$\ddot{x}_e^{ref} = M_{vn}^{-1} (F^{cmd} - F^{res} - K_v \dot{x}_e) \quad (24)$$

i 番目のマニピュレータの等価仮想質量行列 M_v^i は任意の等価関節慣性行列 I_v^i とマニピュレータのヤコビ行列 J_{aco}^i で(25)式の様に定義できる。

$$M_v^i = J_{aco}^i(q)^{-T} I_v^i J_{aco}^i(q)^{-1} \quad (25)$$

力制御システムの外乱オブザーバは協調システムの位置制御と同様に、(26)式で表される。

$$\begin{aligned} \hat{F}_{dis}^f &= M_{nn}^{in} (\ddot{x}_e^{ref} - \ddot{x}_e) \\ &= F_I^{ref} - M_{nn}^{in} \ddot{x}_e \quad (26) \end{aligned}$$

この場合も、加速度情報ではなく速度情報より内力空間の外乱力が求められるので(14)式で述べた手法と同様なオブザーバ構成としなければならない。図2に作業空間での外乱オブザーバに基づいた力制御構成のブロック線図を示す。

図2 力制御の構成
Fig. 2. Force control scheme

協調システムの位置制御と力制御を同時に行いには、各マニピュレータへのトルク指令を得るために運動軌道制御と力制御に関する力制御信号を合成する必要がある。入力トルクベクトルは全てのマニピュレータのヤコビ行列を用いた変換行列より得られ、(27)式の様に書ける。

$$\tau_m = J_m^T \{ F_m^n + F_I^n \} \quad (27)$$

ここで、 F_m^n 、 F_I^n はそれぞれ(28)、(29)式で現される。

$$F_m^n = F_m^{ref} + \hat{F}_{dis}^m \quad (28)$$

$$F_I^n = F_I^{ref} + \hat{F}_{dis}^f \quad (29)$$

(27)式より、提案する複数台のマニピュレータの協調制御手法は運動力と内力が相互に直交する関係を持っているので、運動力と内力の制御方向には何ら拘束がなく、物体の把持運動に直接適用することが可能である。制御器と外乱オブザーバに必要とされる計算は非常に簡単であり、実用の段階で設定すべきパラメータも少ない。

表1 システムの機械的なパラメータ
Table 1. Mechanical parameters of system

Items	value
l_{11}, l_{12}	200 mm
l_{12}	324 mm
l_{22}	328 mm
Length of the object, 2r	110 mm
Distance between bases, d	285 mm

(a) システム構成

(b) システムの座標系

図3 協調マニピュレータの実験システム

Fig. 3. Experimental system

4. 実験結果

提案した協調制御手法の有効性を調べるために2台の2-リンク SCARA マニピュレータを用いて実験を行った。図3(a),(b)はそれぞれ実験システムの外観図とその座標系を示す。また表1はシステムの機械的なパラメータを示す。

実験では次の様な二つのケースを考慮してマニピュレータの協調制御を行った。

(a)従来のインピーダンス制御

表2 インピーダンス制御で利用したパラメータ

Table 2. Parameters for impedance control

Items	Value
M	diag(1.0,1.0,1.0)
B	diag(50,50,50)
K	diag(500,500,500)
$M_{nn1,robot\ 1}$	diag(0.72,0.70)
$M_{nn2,robot\ 2}$	diag(0.72,0.70)
$M_{nn,system}$	diag(1.2,1.4,0.006)
$M_{vn1,robot\ 1}$	diag(0.6,0.6)
$M_{vn2,robot\ 2}$	diag(0.6,0.6)
$M_o, motion\ obs.\ gain$	diag(140,140,140)
$F_o, force\ obs.\ gain$	diag(100,100,100,100)
$K_{vf}, Force\ damping$	diag(90.0,90.0)

(b) 可変コンプライアンスゲインを有するインピーダンス制御

全てのケースにおいて、協調させるマニピュレータは物体を把持して、その物体を円軌道に沿って動かしている。円軌道の中心と直径はそれぞれ(0.0,0.35)[m]と0.1[m]である。望ましい内力は20[N]とした。また、物体の姿勢は0.0[rad]に設定し、円軌道の周期は0.125[Hz]としている。実験で利用される把持物体は直径6.5[cm]の中空缶である。更に、協調制御システムのサンプリング周期は0.001[sec]である。

最初の動作では、平面的な障害物がない状態で、協調マニピュレータは把握物体を望ましい円軌道に沿って動かしている。次に、物体を動かしている状態で平面的な障害物を導入する。環境から受ける相互作用力はy-方向とする。この障害物の有無に対して、各ケースについて得られた実験データによって各手法の性能を分析した。

〈4・1〉従来のインピーダンス制御 硬い平面的な障害物との相互作用を緩和するために、システムの目標インピーダンスを低く設定している。表2に従来のインピーダンス制御手法で設定したパラメータを示す。インピーダンスパラメータが低いため協調システムの剛性も低くなり、障害物との衝突がない場合でも円軌道の応答は劣化してしまう。図4(a),(c)と(d)はそれぞれ自由な運動状態に関する円軌道の応答、物体の位置偏差と協調システムの内力応答である。x-方向、y-方向ともに円軌道の偏差は比較的大きく、最大2.0[mm]まで達した。偏差が大きくなる主な原因として、内力制御による内力の干渉力が影響していると考えられる。特に、低インピーダンスのため、各マニピュレータの不釣り合いによるわずかなモーメント方向のずれの影響が生じる。所望とする物体姿勢制御に関しては、最大偏差が0.008[rad]以内となり、0[rad]付近ではほぼ保たれている。従って、物体にかかる先端のモーメント力はほぼゼロとなっていることがわかる。20[N]の望ましい内力指令に対して、力応答の誤差は2[N]以下となっているが、協調システムの柔らかいインピーダンス応答の影響を受けるためわずかな振動が生じている。一方、物体の外力に対するコンプライアント動作に関して、システムのスチフネス

(a) 自由な運動のケース (b) 自由と拘束条件付きのケース

(c) 物体の位置偏差

(d) 内力の応答

(e) 検出された外力

図4 従来のインピーダンス手法の実験結果

Fig. 4. Results of conventional impedance case

を500[N/m]に設定し、図4(e)に示される様に12[N]までの相互作用外力に対して位置偏差応答が2.0[cm]以上になっており所望とするインピーダンス特性がよく実現されていることがわかる。この様に低インピーダンス設定により、システムが硬い環境と接触する際にその影響を低減することはできるが、先ほど示したように運動追従特性は劣化してしまう。この影響は協調制御システムでは顕著に現れてしまう。

表3 可変コンプライアンスでのパラメータ
Table 3. Parameters for variable compliance gain

Items	Value
M	diag(1.0,1.0,1.0)
B	diag(80,80,80)
K	diag(1600,1600,1600)
B_o^y	40
K_o^y	200
α^y	10.0
b^y	0.002
$M_{n1,robot\ 1}$	diag(0.72,0.70)
$M_{n2,robot\ 2}$	diag(0.72,0.70)
$M_{nn,system}$	diag(1.2,1.4,0.006)
$M_{v1,robot\ 1}$	diag(0.6,0.6)
$M_{v2,robot\ 2}$	diag(0.6,0.6)
$M_o, motion\ obs.\ gain$	diag(140,140,140)
$F_o, force\ obs.\ gain$	diag(100,100,100,100)
$K_{vf}, Force\ damping$	diag(90.0,90.0)

〈4・2〉 可変コンプライアンスゲインを有するインピーダンス制御 可変コンプライアンスゲインを有するインピーダンス制御は相互作用力に応じて可変となるコンプライアンスゲインを含む外側ループと高インピーダンスパラメータからなる内側ループから構成されている。外側ループのゲインが外力に応じて指数的に変化するため、力センサに含まれる微弱なノイズやオフセットの影響をほとんど受けなくなる。把持物体に障害物接触時の拘束力が働かない場合、測定した相互作用力はゼロとなり、システムは従来のインピーダンス制御と同じ構造となる。この時、インピーダンスパラメータの値を高く設定することが可能であるので、把持物体の軌跡制御に対する制御剛性を高めることができる。使用されるパラメータを表3にまとめる。また、実験結果を図5、6に示す。図5(a)に示す様に、物体の運動軌道はきれいに望ましい円形軌道に追従している。位置偏差は図5(c)に示す様にx-方向のみ内力制御の影響をわずかに受ける。y-方向と姿勢の偏差はそれぞれ0.5[mm]と0.005[rad]以下であり、非常に小さく抑えられている。また、協調システムの内力の応答も従来のインピーダンス制御よりも振動が少ないよい応答が得られている。把持する物体が平面的な拘束環境と接触した場合には、相互作用力に対して協調システムがコンプライアントな動作を実現するため、システムのスチフネスが低下するように外側ループのコンプライアンスゲインが変化する。図5(b)、(e)に示される様に外力にたいする応答も従来のインピーダンス制御と同様に、所望とするコンプライアント動作が実現されている。これらから、可変コンプライアンスゲインを有するインピーダンス制御で相互作用外力に対してシステムの安定性を改良することができる。図6に外力に対する協調システムのコンプライアンスゲインの変動を示す。提案する手法により、協調システムの運動時の制御剛性を低下させることなく、任意の外力に対してコンプライアント動作を実現することができる。

図5 可変コンプライアンスゲインのケース
Fig. 5. Results of variable compliance gain test

検証実験では安定な把持を優先しているため、運動速度が比較的遅い設定となっているが協調制御では実用上問題ない範囲である。提案している手法では、運動制御系と内力制御系の非干渉化、外力に対する把持の安定化をロバスト性を損なうこと無しに実現することが可能であり実用上有用と考えられる。

図6 コンプライアンスゲインの軌道

Fig. 6. Trajectory of compliance gain

5. あとがき

本論文では作業空間での外乱オブザーバに基づいた可変コンプライアンスゲインを有する複数台マニピュレータの協調制御の実現手法を提案した。特に、協調運動制御を実現するのに必要となる制御パラメータが標準対角質量行列、外乱オブザーバゲインのみとなり、制御器の簡略化が行え、システムの計算量が低減できる。また、複数台マニピュレータの協調制御では、把持物体の軌跡制御と内力制御を分離することにより制御系構成を容易にしている。さらに、外力に対するコンプライアント動作を実現するため、内部ループと外部ループからなる二重構造型のインピーダンス制御器を提案している。外部ループには外力に応じて変化する可変コンプライアンスゲインが導入されており、把持物体と外部環境との接触がない場合でも軌跡追従性能を極端に低下させないインピーダンス制御器を実現している。提案する手法の有効性は2台のマニピュレータを用いた協調制御実験により示した。

(平成9年5月26日受付, 同9年9月24日再受付)

文 献

- (1) K. Kosuge et. al, Decentralized Control of Robots for Dynamics Coordination, *IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, pp.76-81, 1995.
- (2) R.G. Bonitz and T.C. Hsia, Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators, *IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, Atlanta, USA, pp. 944-949, 1993
- (3) Ping Hsu, Coordinated Control of Multiple Manipulator Systems, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 400-410, 1993
- (4) S.A. Schneider et. al, Object Impedance Control for Cooperative Manipulation : Theory and Experimental Results, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No.3, pp. 383-394, 1992
- (5) E. Leksono et al, On Hybrid Position/Force Cooperative Control of Multimanipulator Based on Workspace Disturbance Observer, *IEEE Proc. of 22nd Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Taipei, Taiwan, pp.1873- 1878, 1996
- (6) E. Leksono et al, Cooperative Control of Multimanipula-

tor based on Workspace Disturbance Observer Considering the Interaction with External Force Environments, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, Tokyo, Japan, 1997.

- (7) Omar M. Al-Jarrah et al, Intelligent Compliant Motion Control, *Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on robotics and Automation*, Minneapolis, 1996.
- (8) Y. Kawasumi et al, A Force Control of Direct Drive Robot, *Proc. of 11th IFAC World Congress on Automatic Control in the Secure of Mankind*, Tallinn, Estonia, USSR, pp.209-214, 1990
- (9) T. Murakami et al, Determination of Equivalent Impedance in Workspace Based on Robust Control, *Proc. of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, San Francisco, California, pp.31-37, 1992
- (10) T. Murakami et al, A Motion Control Strategy Based on Equivalent Mass Matrix in Multidegree of Freedom Manipulator, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 42, No. 2, pp. 123-130, 1995
- (11) Y. Nakamura et al, Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No.2, pp.44-61, 1989
- (12) T. Yoshikawa et al, Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 1, pp. 67-77, 1991

Edi Leksono (学生員) 1990年3月東京工業大学工学部制御工学科修士課程終了。1995年4月慶應義塾大学理工学部電気工学科博士課程入学。現在、複数台マニピュレータの協調制御に関する研究に従事。

村上俊之 (正員) 1993年3月慶應義塾大学理工学部電気工学科博士課程終了。同年同大学勤務。現在、同大学理工学部システムデザイン工学科専任講師。工学博士。ロボットおよびモーションコントロールに関する研究に従事。

大西公平 (正員) 1980年東京大学大学院博士課程終了。工学博士。現在、慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授。