

# マニピュレータの非接触型インピーダンス制御

辻 敏夫\* 畑 木 道 生\* 赤 松 寛 優\* 金 子 真\*

## Non-Contact Impedance Control for Manipulators

Toshio Tsuji\*, Michio Hatagi\*, Hiromasa Akamatsu\* and Makoto Kaneko\*

Impedance control is one of the most effective control method for a manipulator in contact with its environment. In this method, however, the end-effector of the manipulator does not move until an external force is exerted. Therefore an impact force from the environment cannot be avoided. The present paper proposes a concept of a non-contact impedance control for a manipulator, which can regulate virtual impedance between the end-effector and external objects using visual information. First, a virtual force exerted from the object that is not contact with the manipulator is introduced. The virtual force is computed from the non-contact impedance and the motion of the object, so that the manipulator can respond the approaching object without any contact. Then the proposed method applies to an object avoidance problem and a contact task. Validity of the proposed method is verified through computer simulations. Finally, the proposed method is implemented using a direct-drive robot and a PSD camera system in the planar task space. Experimental results show that the non-contact impedance control is realized with a high sampling rate and a sufficient accuracy.

**Key Words:** Impedance Control, Robot Manipulator, Vision-Based Control, Obstacle Avoidance, Impact Control

### 1. はじめに

インピーダンス制御とは、マニピュレータの手先の機械インピーダンスを、目標とする作業に応じて望ましい値に制御する方法で、外力に対する手先の応答特性を規定することができる。Hogan [1] は、手先の位置、速度、力を計測し、分解加速度制御 [2] の考え方をを用いてマニピュレータの手先インピーダンスを望ましい値に設定する方法を示した。その後、ヤコビ行列の逆行列を使わない方法 [3] や力センサを用いない方式 [4] などの実現法、接触に伴う安定性の解析 [5] [6]、複数マニピュレータの協調制御 [7] など数多くの研究が行われており、環境との相互作用を制御するための重要な枠組みを与えている。

しかしながらインピーダンス制御を行うに当たり、作業によっては、手先と対象物との相互作用力の有無に注意しなければならない場合がある。例えば、ガラスなどのもろい物質の対象物に対して手先で作業を行う場合には、対象物に接触する前に手先を減速し、発生する衝撃力をできるだけ小さくする必要があり。また、危険な障害物とロボットが接触する可能性がある場合には、障害物とロボットの相互作用力の発生をできるだけ回避しなければならない。ところが、従来のインピーダンス

制御では、外力を加えられてはじめて運動が変化するため、手先が対象物に接触する前に何らかの行動を起こすことは難しい。

一方、最近、vision-based control を用いた様々な研究が行われている [8]~[10]。vision-based control ではカメラなどを用いた人工視を利用して環境の情報を獲得し、この視覚情報を用いることにより対象物の状態に応じてロボットを制御することが可能となる。この vision-based control に基づき Castano and Hutchinson [11] は Visual Compliance という概念を提案している。彼らの方法は、カメラからの視覚情報とマニピュレータの関節に取り付けたエンコーダからの角度情報を用いて、位置制御に関する視覚センサ情報と内界センサ情報のハイブリッド制御系を構成し、仮想的に設定した作業平面にマニピュレータの手先を拘束制御しようというものである。これにより与えられた環境に適した作業プランを計画することが容易となるが、実際のマニピュレータの手先のダイナミクスを決定するインピーダンスそのものを視覚情報に基づいて制御しているわけではない。

また、新井、太田 [12] は複数の移動ロボットの動作計画問題に対して、移動ロボット本体と目標位置や障害物、他のロボットとの間に仮想的なインピーダンスを想定し、この仮想インピーダンスによって発生する仮想外力を利用して複数移動ロボット間の協調運動を実現している。

そこで本論文では、マニピュレータのインピーダンス制御法

原稿受付 1996年4月17日

\*広島大学工学部

\*Faculty of Engineering, Hiroshima University

に vision-based control の枠組みに基づいて新井らの仮想インピーダンス制御の概念を導入し、手先のインピーダンスと同時に手先と対象物との間の仮想的なインピーダンスを制御するという非接触型のインピーダンス制御法を提案する。この方法では、ロボットと対象物が接触する前に手先に仮想的な外力を加えることで、対象物に対するロボットの手先の応答特性を制御することが可能となる。以下、提案する制御法の動作原理を説明するとともに、接近してくる対象物をマニピュレータが回避する場合、および、マニピュレータが対象物に衝突する場合についてシミュレーション実験を行い、本手法の有効性を示す。さらに、ダイレクト・ドライブ・ロボット (以下 DD ロボット)、PSD カメラを用いた実験を行い、本手法の実現可能性を検討する。

## 2. インピーダンス制御

マニピュレータの運動方程式は、作業空間の自由度を  $l$ 、関節自由度を  $m$  とすると、

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau + J^T(\theta)F_{ext} \quad (1)$$

となる。ここで、 $\theta \in \mathbb{R}^m$  は関節角度ベクトル、 $M(\theta) \in \mathbb{R}^{m \times m}$  は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^m$  は、コリオリ力、関節摩擦力、遠心力、重力等を表す項、 $\tau \in \mathbb{R}^m$  は関節駆動トルク、 $F_{ext} \in \mathbb{R}^l$  は外力、 $J \in \mathbb{R}^{l \times m}$  はヤコビ行列を表す。

いま、手先の目標インピーダンスを

$$M_e d\ddot{X} + B_e d\dot{X} + K_e dX = F_{ext} \quad (2)$$

により記述する。ただし、 $M_e, B_e, K_e \in \mathbb{R}^{l \times l}$  はそれぞれ、手先の目標慣性行列、目標粘性行列、目標剛性行列で、 $dX = X - X_d$  は目標手先位置  $X_d$  と現在位置  $X$  との偏差を表す。

このとき、ヤコビ行列の逆行列を用いないインピーダンス制御則 [3] は次のようになる。

$$\tau = \tau_{effector} + \tau_{comp} \quad (3)$$

$$\tau_{effector} = J^T \{ M_x(\theta) [M_e^{-1}(-K_e dX - B_e d\dot{X}) + \ddot{X}_d - \dot{J}\dot{\theta}] - [I - M_x(\theta)M_e^{-1}]F_{ext} \} \quad (4)$$

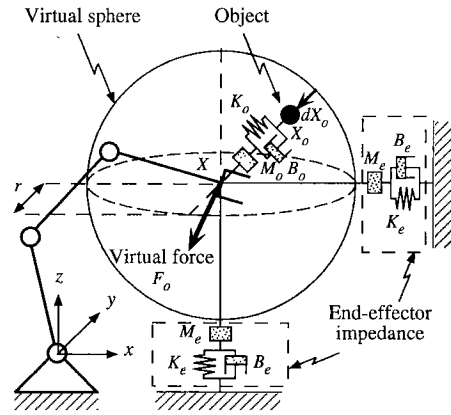
$$\tau_{comp} = \hat{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (5)$$

ただし、 $\hat{h}(\theta, \dot{\theta})$  は  $h(\theta, \dot{\theta})$  の推定値、 $M_x(\theta) = (JM^{-1}(\theta)J^T)^{-1} \in \mathbb{R}^{l \times l}$  はアームが特異姿勢にない限り正則で、 $\hat{M}(\theta)$  は慣性行列の推定値を表す。式 (4) の  $\tau_{effector}$  はマニピュレータの手先のインピーダンスを調節するための関節トルク、式 (5) の  $\tau_{comp}$  は運動方程式に含まれる  $h(\theta, \dot{\theta})$  を補償するための関節トルクである。

## 3. 非接触型インピーダンス制御

**Fig. 1** に本手法の概念図を示す。いま、対象物がロボットに近づいてくる場合を考えよう。このときロボットの手先を中心とする半径  $r$  の仮想的な球を設定する。ここで、対象物の位置を  $X_o \in \mathbb{R}^l$  とすると、仮想球の表面から対象物への法線ベクトル  $dX_o \in \mathbb{R}^l$  は、

$$dX_o = X_r - rn \quad (6)$$



**Fig. 1** Schematic representation of a Non-Contact Impedance Control (NCIC)

で与えられる。ただし、手先から対象物へのベクトルを  $X_r = X_o - X$  とし、ベクトル  $n \in \mathbb{R}^l$  は、

$$n = \begin{cases} \frac{X_r}{|X_r|} & (|X_r| \neq 0) \\ 0 & (|X_r| = 0) \end{cases} \quad (7)$$

と定義する。ただし、 $|X_r|$  はベクトル  $X_r$  のユークリッド・ノルムを表す。

ここで、対象物が仮想球の内部に侵入したとき ( $|X_r| < r$ )、対象物と手先との間に仮想的な非接触インピーダンス  $M_o, B_o, K_o \in \mathbb{R}^{l \times l}$  を設定する。 $M_o, B_o, K_o$  は、それぞれ仮想慣性行列、仮想粘性行列、仮想剛性行列を表す。この非接触インピーダンスと、ベクトル  $dX_o$  を用いて対象物から手先に加わる仮想外力  $F_o \in \mathbb{R}^l$  を、

$$F_o = \begin{cases} M_o d\ddot{X}_o + B_o d\dot{X}_o + K_o dX_o & (|X_r| < r) \\ 0 & (|X_r| \geq r) \end{cases} \quad (8)$$

と定義する。ただし、式 (7)、(8) から明らかなように、対象物が仮想球の外部に存在する場合および、対象物と手先の位置が一致する場合は  $F_o = 0$  となる。

以上より、マニピュレータの手先の運動方程式は式 (2) から、

$$M_e d\ddot{X} + B_e d\dot{X} + K_e dX = F_{ext} + F_o \quad (9)$$

となり、非接触型インピーダンス制御則は式 (3) を修正して

$$\tau = \tau_{effector} + \tau_{comp} + \tau_o \quad (10)$$

$$\tau_o = J^T F_o \quad (11)$$

となる。

**Fig. 2** に本手法のブロック線図を示す。本手法では対象とする作業に応じてロボットの手先のインピーダンス  $M_e, B_e, K_e$  を調節できるという通常のインピーダンス制御の特徴に加えて、手先と対象物との間に仮想的なインピーダンス  $M_o, B_o, K_o$  を設定でき、対象物に対する手先の相対的な運動を調節できるという利点を有している。

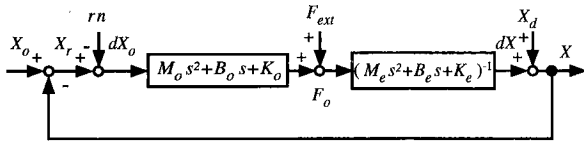


Fig. 2 The block diagram of the NCIC

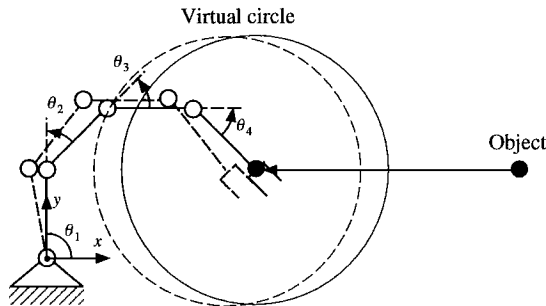


Fig. 3 Avoidance of an object using the NCIC

#### 4. シミュレーション実験

本手法の有効性を示すために、4関節平面マニピュレータ (Fig. 3 参照) のシミュレーション実験を行った。対象とするマニピュレータのリンクパラメータは、各リンクがそれぞれ長さ 0.4 [m]、質量 3.75 [kg]、関節からリンクの重心位置までの距離 0.2 [m]、慣性モーメント 0.8 [kgm<sup>2</sup>]とした。そして、マニピュレータの手先インピーダンスを  $M_e = \text{diag.}[1, 1]$  [kg],  $B_e = \text{diag.}[20, 20]$  [Nm/s],  $K_e = \text{diag.}[100, 100]$  [N/m] と設定し、目標手先位置は初期手先位置とした。なお、マニピュレータの初期姿勢は  $\theta(0) = [\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}]^T$  [rad] である。

##### 4.1 対象物回避問題への適用

まず、対象物がマニピュレータに接近する場合を考えよう。通常のインピーダンス制御では、対象物と接触するまでに何らかの行動を起こすことは難しいので、衝突を避けることができない。しかしここでは、Fig. 3 のように、マニピュレータの手先に仮想円を設置し、手先と対象物との間に非接触インピーダンスを設定することにより対象物との接触を回避することを考えた。

Fig. 4 に、仮想円の半径を  $r=0.3$  [m]、仮想慣性、仮想粘性を  $M_o = \text{diag.}[0.5, 0.5]$  [kg],  $B_o = \text{diag.}[10, 10]$  [Ns/m] と設定し、仮想剛性を  $K_o = \text{diag.}[0, 0], \text{diag.}[100, 100], \text{diag.}[200, 200]$  [N/m] と変化させた場合の  $x$  方向の手先変位の時間変化  $x(t)$ 、対象物の軌道  $x_o(t)$  を示す。このとき対象物は、初期位置を仮想円の外部に設定し、Fig. 3 に示す初期位置から  $x$  軸方向に周期 2.0 [s]、振幅 0.3 [m] の単振動をさせ、仮想円の内部に侵入させた (Fig. 3 参照)。ただし、サンプリングタイムは 1.0 [ms]、マニピュレータのダイナミクスはアッペル法 [13] を用いて計算した。

Fig. 4 より、手先と対象物の相対距離が仮想円の半径  $r=0.3$  [m] 以上のときには手先の位置変化は生じないが、対象物が仮想円の内部に侵入すると、対象物を回避する方向に手先が変位していることが分かる。また、仮想剛性の値が大きいほど

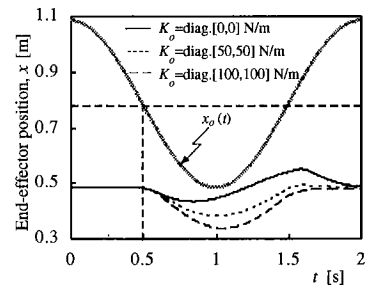


Fig. 4 Change of the end-effector trajectories for the object under the NCIC

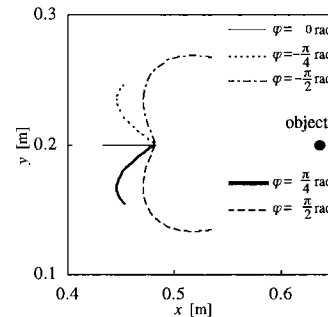


Fig. 5 Control of the end-effector trajectories via the non-contact impedance matrices

手先位置が大きく変化している。なお、 $K_o = \text{diag.}[0, 0]$  [N/m] の場合には対象物が手先から離れていくときに逆に対象物に引っ張られるような応答が現れていることに注意されたい (Fig. 4 実線)。この現象については 4.3 節で詳しく議論する。

次に非接触インピーダンス  $M_o, B_o, K_o$  を

$$M_o^\varphi = 0.5R(\varphi) \text{ kg}$$

$$B_o^\varphi = 10R(\varphi) \text{ Ns/m}$$

$$K_o^\varphi = 50R(\varphi) \text{ N/m}$$

$$R(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

として、時刻  $t=0$  で手先の初期位置から  $x$  軸方向に 0.15 [m] 離れた位置に対象物を設置した場合の手先の応答を調べた。手先に作用する仮想外力の方向は、ベクトル  $dX_o$  の方向を 0 [rad] として角度  $\varphi$  だけ反時計方向に回転することになる。

Fig. 5 にマニピュレータの手先軌道を示す。図から同じ対象物に対しても、非接触インピーダンス行列を調節することで、手先の空間軌道が調節可能であることが分かる。

##### 4.2 接触作業への適用

次に、マニピュレータが作業中に環境に衝突する場合を考えよう。通常のインピーダンス制御では、衝突時に手先に衝撃力が加わってしまう (Fig. 6) [14]。しかしここでは、マニピュレータが環境に衝突する前に、手先と環境との間に設定した非接触インピーダンスを用いて、衝撃力を抑制することを試みた。

まず、対象物の特性をインピーダンスモデルを用いて表現

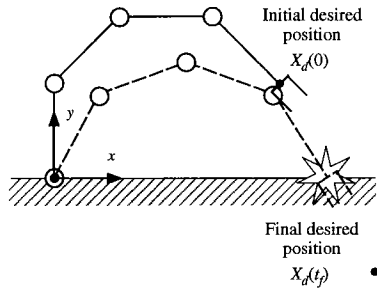


Fig. 6 An example of a contact task

する。

$$M_w d\ddot{X}_w + B_w d\dot{X}_w + K_w dX_w = F_{ext} \quad (12)$$

ここで、 $M_w, B_w, K_w \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  はそれぞれ対象物の慣性、粘性、剛性で、 $dX_w = X_s - X \in \mathbb{R}^2$  は対象物の平衡点  $X_s$  とマニピュレータの手先位置との変位を表す。もちろん、手先が対象物に接触していないときは、 $F_{ext} = 0$  である。シミュレーションでは  $M_w = \text{diag.}[0, 0.5]$  [kg],  $B_w = \text{diag.}[0, 100]$  [Ns/m],  $K_w = \text{diag.}[0, 10000]$  [N/m] とし、対象物の表面は  $x$  軸上に設定した (Fig. 6)。まず通常のインピーダンス制御 (式 (3)~(5)) を用いた場合の  $xy$  平面の手先軌道  $X(t)$  および、 $y$  方向の手先の目標軌道  $y_d(t)$  と手先位置  $y(t)$ 、手先と対象物との間の相互作用力  $F_{ext}(t)$  を Fig. 7 に示す。ただし、手先の目標軌道  $X_d(t)$  は、境界条件

$$\begin{aligned} X_d(0) &= \left( \frac{1 + \sqrt{2}}{5}, 0.2 \right) \text{ [m]} \\ X_d(t_f) &= \left( \frac{2 + \sqrt{2}}{5}, -0.2 \right) \text{ [m]} \\ \dot{X}_d(0) &= (0, 0) \text{ [m/s]}, \quad \dot{X}_d(t_f) = (0, 0) \text{ [m/s]} \\ \ddot{X}_d(0) &= (0, 0) \text{ [m/s}^2], \quad \ddot{X}_d(t_f) = (0, 0) \text{ [m/s}^2] \end{aligned}$$

を用いて 5 次多項式 [15] で与えた。  $t_f$  は終了時刻で、 $t_f = 2$  s とした。

非接触型インピーダンス制御を適用した結果を Fig. 8, 9 に示す。いずれも仮想円は  $r = 0.05$  [m] とし、ベクトル  $X_o$  が常に対象物の法線ベクトルとなるように対象物表面 ( $x$  軸上) に代表点  $X_o$  を設定した。 Fig. 8 は、非接触インピーダンス行列のうち、仮想慣性、粘性を  $M_o = \text{diag.}[0.5, 0.5]$  [kg],  $B_o = \text{diag.}[10, 10]$  [Ns/m] とし、仮想剛性を  $K_o = \text{diag.}[100, 100], \text{diag.}[200, 200], \text{diag.}[300, 300]$  [N/m] と変化させた場合の結果である。一方、 Fig. 9 では、 $M_o = \text{diag.}[0.5, 0.5]$  [kg],  $K_o = \text{diag.}[0, 0]$  [N/m] とし、仮想粘性を  $B_o = \text{diag.}[10, 10], \text{diag.}[50, 50], \text{diag.}[90, 90]$  [Ns/m] と変化させている。

Fig. 7 では、手先が対象物に接触する時に、大きな衝撃力が発生している。しかしながら、 Fig. 8, 9 では、手先が対象物に接触する前に、手先に対象物との衝突を回避する方向に仮想外力が働くので、あらかじめ手先は減速し衝撃力を緩和している。以上より、本手法は対象物を回避する場合だけでなく、接触する場合にも有効であることが分かる。

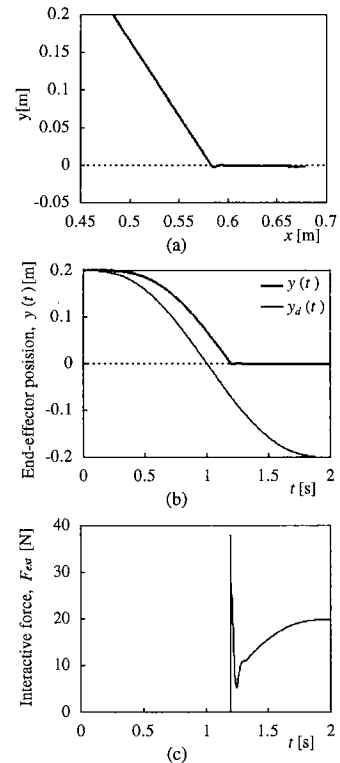


Fig. 7 A simulation result of the contact task under the conventional impedance control

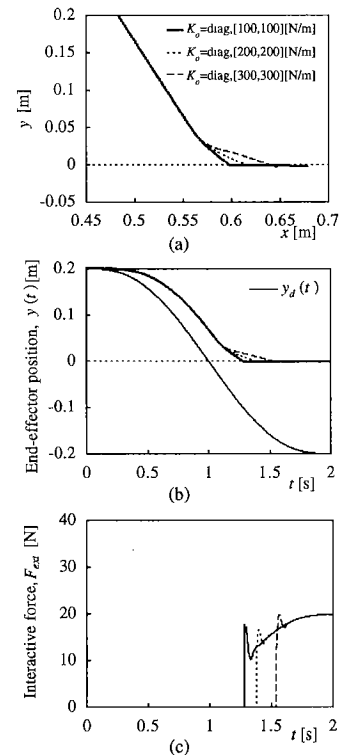


Fig. 8 Simulation results of the contact task under the NCIC. Three different virtual stiffness matrices are used.

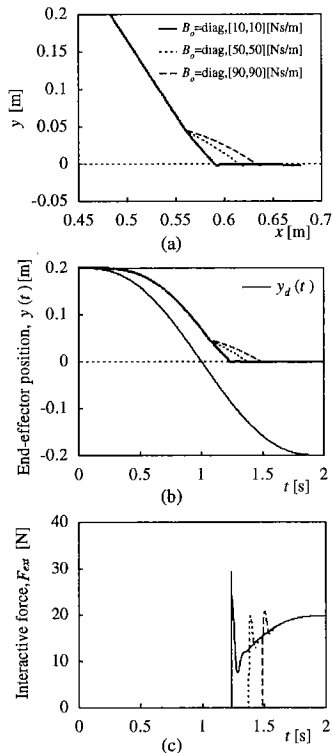


Fig. 9 Simulation results of the contact task under the NCIC. Three different virtual viscosity matrices are used.

### 4.3 非接触インピーダンスの設計例

Fig. 4 で示したように設定した非接触インピーダンスによっては対象物に対して手先が不自然な応答を示す場合がある. そこでこの現象を調べるため, 式 (9) に式 (8) を代入し手先インピーダンスと非接触インピーダンスによる手先の応答を求めると,

$$Md\ddot{X} + Bd\dot{X} + KdX = \tilde{F} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F} = & F_{ext} + M_o (\ddot{X}_o - \ddot{X}_d - r\ddot{n}) \\ & + B_o (\dot{X}_o - \dot{X}_d - r\dot{n}) \\ & + K_o (X_o - X_d - rn) \end{aligned} \quad (14)$$

を得る. ただし,  $M = M_e + M_o$ ,  $B = B_e + B_o$ ,  $K = K_e + K_o$  である. 簡単のため, ベクトル  $n$  は一定とすると, 結局,

$$\frac{X(s)}{X_o(s)} = (Ms^2 + Bs + K)^{-1} (M_o s^2 + B_o s + K_o) \quad (15)$$

となる.  $X(s)$ ,  $X_o(s)$  はそれぞれ  $X(t)$ ,  $X_o(t)$  のラプラス変換を表す.

上式から対象物に対する手先の応答は, 手先インピーダンスと非接触インピーダンスの和で決定されることが分かる. Fig. 4 の実線 ( $K_o = \text{diag.}[0, 0]$  [N/m]) の例では  $K_o$  が小さいため対象物に対する手先の応答が過減衰となり, 結果的に手先が対象物を追従するような応答が表われているのである.

2 種類のインピーダンスのうち, 手先インピーダンス  $M_e$ ,  $B_e$ ,  $K_e$  はマニピュレータが手先で行っている作業に応じて設

計されるパラメータである. ここでは  $M_e$ ,  $B_e$ ,  $K_e$  が回転行列  $T \in \mathbb{R}^{l \times l}$  を用いて対角化できる場合を考えよう.

$$M_e = T^T \tilde{M}_e T \quad (16)$$

$$B_e = T^T \tilde{B}_e T \quad (17)$$

$$K_e = T^T \tilde{K}_e T \quad (18)$$

$\tilde{M}_e$ ,  $\tilde{B}_e$ ,  $\tilde{K}_e \in \mathbb{R}^{l \times l}$  はそれぞれ対応する行列の固有値を要素とする対角行列である.

そこで, 非接触インピーダンス  $M_o$ ,  $B_o$ ,  $K_o$  もこの対角行列  $T$  を用いて対角化できる値とする.

$$M_o = T^T \tilde{M}_o T \quad (19)$$

$$B_o = T^T \tilde{B}_o T \quad (20)$$

$$K_o = T^T \tilde{K}_o T \quad (21)$$

問題は  $M_o$ ,  $B_o$ ,  $K_o$  の固有値を要素とする対角行列  $\tilde{M}_o$ ,  $\tilde{B}_o$ ,  $\tilde{K}_o$  を設計することになる. ここでは, 設計例の一例として  $\tilde{B}_o$ ,  $\tilde{K}_o$  の  $i$  番目の要素を

$$\tilde{B}_o^{(i)} = 2\omega_n^{(i)} \zeta^{(i)} (\tilde{M}_e^{(i)} + \tilde{M}_o^{(i)}) - \tilde{B}_e^{(i)} \quad (22)$$

$$\tilde{K}_o^{(i)} = (\omega_n^{(i)})^2 (\tilde{M}_e^{(i)} + \tilde{M}_o^{(i)}) - \tilde{K}_e^{(i)} \quad (23)$$

のように決定する. ただし,  $\zeta^{(i)}$ ,  $\omega_n^{(i)}$  はそれぞれ対応する自由度に対する減衰係数, 固有角周波数を表す. そして対象物回避動作の優先度を表す  $\tilde{M}_o$  を適当に設定すれば, 非接触インピーダンスを手先インピーダンスに応じて決定することが可能となる. なお, 手先の運動の安定性は式 (15) の  $M$ ,  $B$ ,  $K$  で決まるため, 式 (22), 式 (23) の  $\tilde{B}_o$ ,  $\tilde{K}_o$  は必ずしも非負である必要はないことに注意されたい. ただし, 非接触インピーダンスの  $\zeta^{(i)}$ ,  $\omega_n^{(i)}$  を手先インピーダンスの対応する自由度に対する減衰係数, 固有角周波数に一致するように選べば,  $\tilde{B}_o^{(i)}$ ,  $\tilde{K}_o^{(i)} > 0$  となることを容易に示すことができる.

本論文ではさらに  $\tilde{M}_o$  の  $i$  番目の要素を

$$\tilde{M}_o^{(i)} = \frac{|dX_o|}{r} M_{\max}^{(i)} \quad (24)$$

のように決定する方法を提案する. 対象物の位置  $X_o$  が手先位置  $X$  に一致すると  $|dX_o| = r$  になり,  $\tilde{M}_o^{(i)} = M_{\max}^{(i)}$  が成り立つ. すなわち,  $M_{\max}^{(i)}$  は対応する自由度における仮想慣性の上限を与える. この方法を用いれば, 手先インピーダンスと非接触インピーダンスをともに考慮した手先の応答特性を実現できるだけでなく, 対象物が仮想球に接触した瞬間には小さな仮想インピーダンスが設定され, 仮想球の内部に対象物が侵入するにつれて仮想インピーダンスが大きくなるという対象物の位置に応じた仮想インピーダンスの設定が可能となる.

Fig. 10 にこの方法を用いて行ったシミュレーション結果の 1 例を示す. 実験条件は Fig. 4 と同様で, 手先インピーダンスは対角行列であるから  $T$  は単位行列になる. 減衰係数  $\zeta^{(i)} = 1$ , 固有角周波数  $\omega_n^{(i)} = 10$  [rad/s] ( $i = 1, 2$ ) とし, 仮想慣性の上限值を  $M_{\max}^{(i)} = 0.5, 1.0, 1.5$  [kg] ( $i = 1, 2$ ) と変化させて手

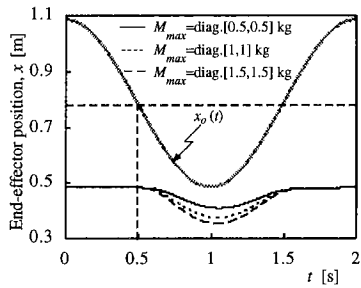


Fig. 10 Change of the end-effector trajectories for the object, where  $\zeta^{(i)} = 1$  and  $\omega_n^{(i)} = 10$  rad/s ( $i = 1, 2$ )

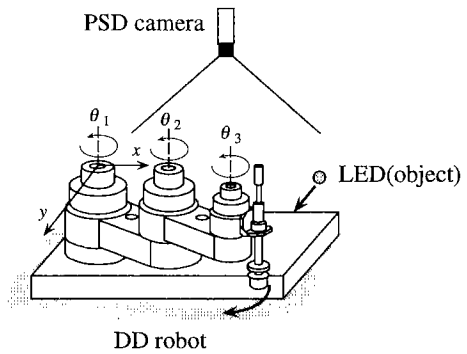


Fig. 12 Experimental apparatus

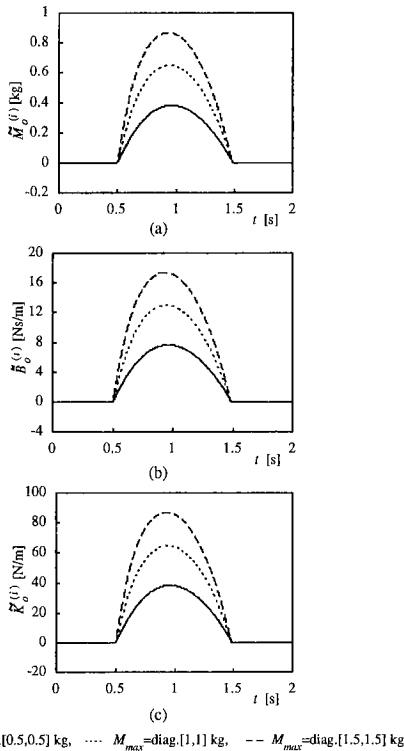


Fig. 11 Time histories of the Non-Contact Impedance parameters

先の応答を求めた。図からいずれの場合も手先は振動することなく初期位置に戻っている様子が見られる。また、このときの仮想インピーダンスの各要素  $M_o^{(i)}$ ,  $B_o^{(i)}$ ,  $K_o^{(i)}$  の時間変化を Fig. 11 に示す。いずれも対象物の運動に応じて仮想インピーダンスが適応的に変化している。

## 5. DD ロボット制御実験

### 5.1 実験装置

Fig. 12 に示す DD ロボット (3 関節平面型: (株) 神戸製鋼所製) と、対象物の位置を測定するための PSD カメラ ((株) 浜松ホトニクス製) を用いてインピーダンス制御実験を行った。作業空間は水平面に限定し、対象物には LED を装着して水平面における位置を測定した。測定誤差は 3 [mm] 以内である。なお、DD ロボットのリンクパラメータは Table 1 に示す。

Table 1 Link parameters of the DD robot

	link 1	link 2	link 3
length [m]	0.25	0.25	0.125
center of mass [m]	0.064	0.065	0.031
moment of inertia [kgm <sup>2</sup> ]	0.334	0.196	0.0851
mass [kg]	20.8	13.2	8.84
joint friction [Nms/rad]	2.69	1.88	0.0634

### 5.2 実験結果

DD ロボットの手先インピーダンスを  $M_e = \text{diag.}[25, 25]$  [kg],  $B_e = \text{diag.}[200, 200]$  [Ns/m],  $K_e = \text{diag.}[400, 400]$  [N/m] と設定し、目標手先位置  $X_d = [0.4, 0]^T$  [m] を初期手先位置とした。初期姿勢は  $\theta(0) = [0.8, -1.02, -1.49]^T$  rad である。仮想円の半径は  $r = 0.3$  [m] で、時刻  $t = 0$  で DD ロボットの手先の初期位置から  $y$  軸方向に 0.2 [m] 離れた位置に LED を設置した。

Fig. 13 に、非接触インピーダンス行列のうち、仮想慣性、仮想剛性を  $M_o = \text{diag.}[4, 4]$  [kg],  $K_o = \text{diag.}[400, 400]$  [N/m] とし、仮想粘性を  $B_o = \text{diag.}[20, 20], \text{diag.}[100, 100], \text{diag.}[200, 200]$  [Ns/m] と変化させた場合の  $y$  方向の手先変位の時間変化  $dy(t)$ 、Fig. 2 から計算した理想的なマニピュレータの手先軌道と実際の軌道との誤差  $e_y(t)$  を示す。ただし、サンプリングタイムは 2.6 [ms] で外乱やモデル化誤差の影響を小さくするためにロバスタインピーダンス制御 [16] を適用した。図から設定した  $B_o$  に応じて手先の応答特性が変化することが分かる。

次に、任意の方向から対象物を DD ロボットに近づけた場合の手先軌道を調べた。Fig. 14 に  $xy$  平面での手先軌道  $X(t)$  と対象物 (LED) の軌道  $X_o(t)$  を示す。ただし、仮想円の半径は  $r = 0.2$  [m] で、非接触インピーダンスは  $M_o = \text{diag.}[4, 4]$  [kg],  $B_o = \text{diag.}[80, 80]$  [Ns/m],  $K_o = \text{diag.}[400, 400]$  [N/m] とした。LED の位置に応じて DD ロボットの姿勢が変化していることが分かる。

## 6. ま と め

本論文では、手先と対象物間の仮想的なインピーダンスを制御することが可能な非接触型インピーダンス制御を提案した。この方法は、ロボットと対象物が接触する前に手先に仮想的な外力を加えることができ、対象物に対するロボットの応答特性

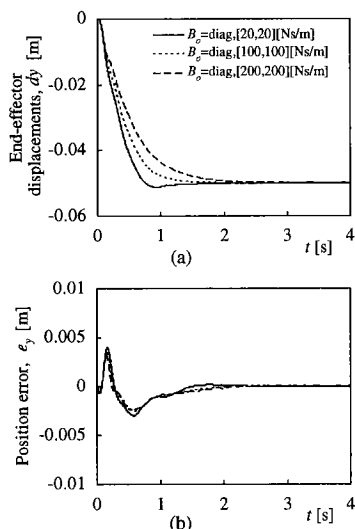


Fig. 13 Step responses of the end-effector under the NCIC

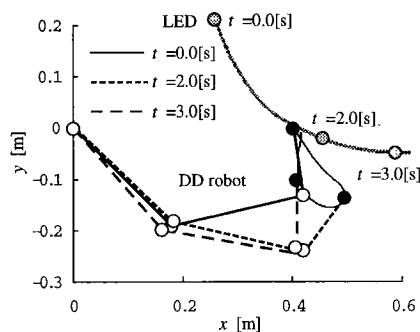


Fig. 14 The DD robot avoiding the object

を調節することができる。そして、シミュレーション実験、DDロボットを用いた制御実験により、本手法が障害物回避問題や対象物との接触作業に応用できることを示した。

本論文では制御実験を2次元に限定していたためあまり問題とならなかったが、一般に視覚フィードバックを利用したロボット制御では、オクルージョンや対象物の3次元復元法、計算時間による制御ループの遅延などが問題となる場合が多い。しかしながら本論文で提案した非接触型インピーダンス制御では、視覚による環境情報を必要とするのは仮想球内部に限られるという特徴を有している。したがって必ずしもカメラを用いた一般的な視覚センサを用いる必要はなく、磁気や超音波を利用した局所的な3次元位置センサが利用可能である。また仮想球内でオクルージョンが起こる場合には、対象物を隠した物体が手先に接近していることになり、この物体に対して仮想インピーダンスを設定すればよい。

今後は手先だけでなくアーム全体と対象物との関係を取り扱えるように本手法を拡張するとともに、磁気センサや超音波センサの利用可能性、マニピュレータの冗長自由度を有効に利用する方法[17]などについて検討する予定である。

## 参考文献

[1] N. Hogan: "Impedance Control: An Approach to Manipula-

tion, Parts I, II, III," ASME journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.107, no.1, pp.1-24, 1985.

- [2] J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R.P. Paul: "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators," IEEE Transaction on Automatic Control, AC-25, pp.468-574, 1980.
- [3] N. Hogan: "Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1047-1054, 1987.
- [4] 館, 榎, 荒井, 西澤, 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.
- [5] E. Colgate and N. Hogan: "An Analysis of Contact Instability in terms of Passive Physical Equivalents," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.404-409, 1989.
- [6] 羅, 伊藤 (正美): "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, pp.26-4, pp.61-68, 1990.
- [7] 小菅, 吉田, 福田, 蟹谷, 酒井, 針木: "インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.3, pp.404-410, 1995.
- [8] J.E. Agapakis, J.M. Katz, J.M. Friedman and G.N. Epstein, "Vision-aided Robotic Welding: An Approach and a Flexible Implementation," International Journal of Robotics Research, vol.9, no.5, pp.17-33, 1990.
- [9] B. Espiau, F. Chaumette and P. Rives: "A new approach to visual servoing in robotics," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.8, no.3, pp.313-326, 1992.
- [10] R. Sharma, J. -Y. Herve and P. Cucka: "Dynamic robot Manipulation Using Visual Tracking," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2 pp.1844-1849, 1992.
- [11] A. Castano and S. Hutchinson: "Visual Compliance: Task-Directed Visual Servo Control," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.10, no.3, pp.334-342, 1994.
- [12] 新井, 太田: "仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.1039-1046, 1993.
- [13] V. Potkonjak and M. Vukobratovic: "Two New Methods for Computer Forming of Dynamic Equation of Active Mechanisms," Mechanism and Machine Theory, vol.14, no.3, pp.189-200, 1987.
- [14] T. Tsuji, K. Ito and P. Morasso: "Neural Network Learning of Robot Arm Impedance in Operational Space," IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics - PartB: Cybernetics, vol.26, No.2, pp.290-298, 1996.
- [15] 吉川恒夫: ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- [16] 畑木道生, アハマド ヤジディ, 辻敏夫, 金子真: "ロバスト位置制御に基づくマニピュレータのインピーダンス制御", ロボティクス・メカトロニクス'95 講演会講演論文集, vol.A, pp.371-374, 1995.
- [17] 辻敏夫, アハマド ヤジディ: "冗長マニピュレータのインピーダンス制御: 冗長性を利用した関節インピーダンスの調節法", 日本ロボット学会誌, vol.12, no.4, pp.609-615, 1994.



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手、1994年同助教授、現在に至る。工学博士。人間とロボットの運動制御、ニューラルネット、マン・マシンシステムなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会、電子情報通信学会などの会員。  
(日本ロボット学会正会員)



赤松寛優 (Hiromasa Akamatsu)

1974年1月1日生。1996年3月、広島大学工学部第二類(電気系)卒業。同年4月、広島大学大学院工学研究科(博士課程前期)情報工学専攻入学、現在に至る。主にマニピュレータのインピーダンス制御の研究に従事。



畑木道生 (Michio Hatagi)

1971年4月18日生。1995年3月、広島大学工学部第二類(電気系)卒業。同年4月、広島大学大学院工学研究科(博士課程前期)情報工学専攻入学、現在に至る。主にマニピュレータのインピーダンス制御の研究に従事。



金子 真 (Makoto Kaneko)

1981年3月東京大学工学系研究科博士課程卒業。工学博士。同年4月、通産省工業技術院機械技術研究所入所。1990年4月、九州工業大学情報工学部助教授。1993年10月、広島大学教授、現在に至る。ロボットハンド、力覚センサ、触覚ベーストアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会などの会員。  
(日本ロボット学会正会員)