作業座標系におけるノミナルモデルに基づく
マニピュレータ制御の一手法*金子 健二^{*1}, 小森 谷 清^{*1}, 谷 江 和 雄^{*1}Manipulator Control Based on a Nominal Dynamic Model
in Operational Space

Kenji KANEKO, Kiyoshi KOMORIYA and Kazuo TANIE

This paper proposes a method for designing a control law of providing a robotic manipulator which behaves according to a nominal dynamic model specified in operational space. The proposed control has a simple algorithm and requires no calibration of the mechanical parameters to formulate this control law. Initially, we consider the forces in operational space which will produce the difference between nominal dynamics and real manipulator dynamics. Secondly, introducing an observer to estimate such forces, a control system which can cancel out such forces and render the manipulator dynamics equal to the given nominal dynamic model will be designed. The proposed method was implemented in a real system and experiments were carried out to confirm its effectiveness. Finally, the experimental results are discussed.

Key Words: Robotics, Nominal Dynamic Model, Operational Space, Disturbance Observer, Manipulator Control

1. ま え が き

マニピュレータに多様な作業を行わせるため、位置、力などを高精度、高速に制御する種々の制御手法が提案されている^{(1)~(3)}。これらの多くの手法は計算トルク法に代表されるように、その制御トルクの決定にマニピュレータの構造パラメータの知識を必要とするものが多い。そこで、マニピュレータの動的モデリング手法やキャリブレーション技術が検討されてきた⁽⁴⁾。しかしながら、マニピュレータは数多くの部品点数から構成され、そのような手法から得られるモデルのパラメータは正確であるとはいえない。例えば正確なモデルが得られるとしても、マニピュレータに作用するコリオリ力、遠心力、姿勢変動に伴うパラメータ変動力を補償するための計算は非常に複雑であり、リアルタイムにマニピュレータを制御することは困難である。また、モデリング手法で得られたモデルも、エンドエフェクタで物体をつかむ前後で変化したり、さらには摩擦力の影響により、十分満足し得るモデルであるとも

いい難い。

この動的モデルを得ることの困難さを解決するため、マニピュレータのダイナミクスを所望とするモデルに固定化する制御手法が提案されてきた。その一つの手法がモデル規範形適応制御 (Model Reference Adaptive Control) である^{(5)~(7)}。この手法では、例えば正確なモデルがわからなくても、所望とする規範モデルを用いて希望の応答が得られるように制御系を構成することが可能である。しかし、このモデル規範形適応制御の手法も複雑な計算を必要とし、リアルタイム制御には難点がある。他の手法として、外乱オブザーバを用いた手法も提案されてきた^{(8)~(10)}。この手法は、各関節に作用するパラメータ変動トルク、コリオリトルク、遠心トルク、摩擦トルク等の外乱トルクを所望とするノミナルモデルを用いて推定し、その推定外乱トルクをフィードバック補償することで、各関節のダイナミクスを、慣性モーメント一定というシンプルな所望とするモデルに固定化することができる。そのアルゴリズムも非常にシンプルであり、リアルタイム制御性に優れているため、軌道制御や力制御にも導入された例が報告されてきた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ところで、これらのアルゴリズムは関節空間で記述される外乱オブザーバを基礎としており、我々はこれを関節座標系における外

* 平成4年6月17日 ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92において講演、原稿受付 平成5年4月28日。

^{*1} 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2)。

乱オブザーバ法と呼ぶことにする。こうした関節座標系における外乱オブザーバを用いる手法では、ある作業に適した作業座標空間においてマニピュレータを制御する場合には、作業空間で記述された指令を関節空間に変換するための複雑な計算が必要になる⁽¹³⁾。

この関節空間-作業空間の変換は、作業空間においてもともと制御系を設計していれば避けることができる⁽¹⁴⁾。この観点から、作業座標系における外乱オブザーバが提案されてきた⁽¹⁸⁾。この作業座標系における外乱オブザーバは、作業座標系における外乱加速度を推定・補償する外乱オブザーバであり、ロバストな位置制御系ベースの制御系を構築する上では有効な手段にも思える。しかしながら、外乱加速度をフィードバックする際、作業空間の加速度から関節空間の加速度への変換を要し、それにヤコビ行列や時間微分行列を用いるため、この手法においても若干計算パワーを必要とする難点がある。この解決策として、申・駒田ら⁽¹⁸⁾は逆運動学の簡略化としてヤコビ行列の転置を用いているが、作業空間での外乱補償の物理的意味があいまいになるという欠点がある。

本論文では、作業座標空間においてマニピュレータのダイナミクスをノミナルモデルに固定化する制御手法の確立という視点・目的から、作業座標系における外乱力を推定・補償する外乱オブザーバを提案する。ノミナルモデルを構築する有意性は、マニピュレータのキャリブレーションの困難さを解決するとともに、システムの安定性を損なうことなく種々の形態の制御を容易に実現できる点にある。提案する作業座標系における外乱オブザーバ法は、外乱力をフィードバックする際、作業空間から関節空間の変換に、申・駒田らと同じヤコビの転置行列を用いるが、それが変換する物理量が力からトルクであるため、作業空間での外乱補償の物理的意味を明確化することができる。また、この手法のアルゴリズムも非常にシンプルで、マニピュレータの正確なモデルがわからない場合でも、マニピュレータのダイナミクスを作業空間においてノミナルモデルに固定化する特徴を有する。以下、作業空間におけるノミナルモデルと外乱力(ベクトル)について考え、定義を行う。次に、この外乱力ベクトルを補償する作業座標系における外乱オブザーバを提案する。ま

た、この手法を適用することにより、作業座標系における各座標軸間の運動を非干渉化でき、各座標の仮想質量をノミナル値に固定化できることを示す。最終的には、平面2自由度ダイレクトドライブマニピュレータを用いた実験により本手法の有効性を確認したので報告する。

2. 作業空間におけるノミナルモデルの定義

議論を簡略化するため、まず1自由度の場合について考える。今、式(1)で表されるダイナミクスを1自由度のノミナルモデルとする。

$$Ms^2p = F^{ref} - F_{ext} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

M : 質量(一定量)

F^{ref} : 力指令

F_{ext} : 外力

p : アクチュエータ位置

s : 微分演算子

式(1)に示されるように、ノミナルモデルは、パラメータとして一定質量 M のみをもつ二次システムである。摩擦力は存在しないかすでに補償されていて、外力 F_{ext} がアクチュエータに作用しているシステムである。システムのダイナミクスが広帯域にわたり式(1)のように書けると、システムの安定性を損なうことなく、位置、速度、加速度フィードバックを自由に付加することができ、その結果、位置と力のハイブリッド制御、コンプライアンス制御、インピーダンス制御など、種々の形態の制御が容易に実現可能になる⁽¹⁹⁾。このような理由により、式(1)を1自由度の場合のノミナルモデルと定義している。

次に N 自由度の場合について検討を行う。作業空間において、各座標のダイナミクスが式(1)のように表され、図1に示すように各座標軸間の運動が非干渉化されたシステムを作業座標におけるノミナルモデルとして考える。すなわち、各座標軸のダイナミクスは式(2)のように書くことができる。

$$M_{iis} s^2 p_i = F_i^{ref} - F_{exti} \quad (1 \leq i \leq N) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

図1 作業空間における各座標軸のノミナルモデル

図 2 作業座標系におけるノミナルモデル

M_{iin} : i 軸のノミナル質量(一定値)

p_i : i 軸のマニピュレータ手先位置

F_i^{ref} : i 軸の指令力

F_{extin} : i 軸のノミナル外力

行列表現を用いると、式(2)および図 1 は、式(3)、図 2 となる。

$$M_n s^2 \mathbf{p} = \mathbf{F}^{ref} - \mathbf{F}_{extn} \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで、

M_n : ノミナル仮想質量行列 ($N \times N$)

$\mathbf{p}$: マニピュレータ手先位置ベクトル ($N \times 1$)

$\mathbf{F}^{ref}$: 指令力ベクトル ($N \times 1$)

$\mathbf{F}_{extn}$: ノミナル外力ベクトル ($N \times 1$)

式(3)において、ノミナル仮想質量行列 M_n は式(4)に示すような対角行列となる。 M_n の各要素は、各座標軸のノミナル質量(一定値)に対応する。

$$M_n = \text{diag}(M_{11n}, \cdots, M_{iin}, \cdots, M_{NNn}) \quad \cdots \cdots (4)$$

作業空間におけるマニピュレータのダイナミクスが式(3)、(4)で表され、各 i 軸の質量 M_{iin} が既知であれば、システムの安定性を損なうことなく、各座標軸の位置、速度、加速度フィードバックを自由に付加することができ、1 自由度のときと同様に種々の形態の制御が容易に実現可能になる。このような理由により、式(3)、(4)を作業空間におけるノミナルモデルと定義する。

3. 作業座標系における外乱オブザーバ

本章では、作業座標空間に作用する外乱ベクトル ($N \times 1$) を補償することにより実現される作業座標系におけるノミナルモデルの構築法について説明する。最初に、作業空間における外乱力ベクトルについて考える。次に、この外乱力ベクトルを補償し、ノミナルモデルを構築するための作業座標系における外乱オブザーバを提案する。

3.1 作業座標における外乱ベクトルの定義 作業座標におけるマニピュレータのダイナミクスは次式で表される。

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}(\mathbf{p}) s^2 \mathbf{p} + \mathbf{C}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) + \mathbf{G}_{rav}(\mathbf{p}) \\ & = \mathbf{F}^{ref} - \mathbf{F}_{ext} \quad \cdots \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

ここで、

$\mathbf{M}(\mathbf{p})$: 等価質量行列 ($N \times N$)

$\mathbf{C}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$: コリオリ力と遠心力の影響により発生する力ベクトル ($N \times 1$)

$\mathbf{G}_{rav}(\mathbf{p})$: 重力ベクトル ($N \times 1$)

$\mathbf{F}_{ext}$: 外力ベクトル ($N \times 1$)

明らかに、式(3)のノミナルモデルから得られる応答と式(5)の実システムの応答には差が生じる。ここで、この差は作業空間に作用する外乱力ベクトル ($N \times 1$) に起因すると考え、それを $\mathbf{F}_{dis}$ と定義する。このとき、実システムはノミナルモデルと外乱力ベクトルを用いて式(6)のように書くことができる。

$$M_n s^2 \mathbf{p} = \mathbf{F}^{ref} - \mathbf{F}_{extn} - \mathbf{F}_{dis} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここで、式(5)および(6)は両式とも同じ実システムを表す式である。したがって、この両式を等価にする作業座標系における外乱力ベクトル $\mathbf{F}_{dis}$ ($N \times 1$) は、式(5)と(6)の両式の差をとることで次式のように定義することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{dis} &= [\mathbf{M}(\mathbf{p}) - M_n] s^2 \mathbf{p} + \mathbf{C}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) \\ &+ \mathbf{G}_{rav}(\mathbf{p}) + [\mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{extn}] \quad \cdots \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{F}_{dis}$ の意味について考えてみる。第 1 項は質量行列変動力ベクトルであり、その要素は各座標軸の質量変動力および各座標間の干渉力である。第 2 項目はコリオリ力と遠心力の影響により発生する力ベクトルである。第 3 項、第 4 項目は、重力ベクトル、外力変動力ベクトルである。この外乱力ベクトルは、マニピュレータの制御性能を劣化させるため補償されるべきであり、その補償法を 3.2 節で取り上げる。

3.2 作業座標系における外乱オブザーバ この節では、作業座標系における外乱力ベクトルを推定し補償する作業座標系における外乱オブザーバを提案する。また、これにより作業座標系におけるノミナルモデルが構築されることを説明する。

式(6)から外乱力ベクトルは式(8)のように書くこともできる。

$$\mathbf{F}_{dis} = \mathbf{F}^{ref} - M_n s^2 \mathbf{p} - \mathbf{F}_{extn} \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

この式より、指令力ベクトル $\mathbf{F}^{ref}$ 、マニピュレータ手先加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{p}}$ 、ノミナル外力ベクトル $\mathbf{F}_{extn}$ がわかれば、式(7)で定義した外乱力ベクトル $\mathbf{F}_{dis}$ は計算可能であることがわかる。一般に、指令力ベクトル $\mathbf{F}^{ref}$ は計算機内のコントローラにより作り出されるので既知な量である。また、マニピュレータの手先加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{p}}$ は手先位置ベクトル $\mathbf{p}$ の 2 回微分により計算可能である。手先位置ベクトル $\mathbf{p}$ の検出センサがない場合は、マニピュレータの関節角センサにより検出される関節角ベクトル $\mathbf{q}$ と式(9)の順運動学から手先位置ベクトル $\mathbf{p}$ を求めることができ、その

図3 作業座標系における外乱オブザーバにより補償されたシステム

2回微分により手先加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{p}}$ を求めることができる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}(\mathbf{q}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ノミナル外力ベクトル $\mathbf{F}_{extn}$ はマニピュレータの手先に取り付けた力センサにより検出可能である。さらに、ノミナル仮想質量行列 $\mathbf{M}_n$ は4章の解析で示すように任意に設定可能である。

したがって、外乱力ベクトルは算出可能であることがわかるが、微分演算により得られた手先加速度ベクトルは、フィードバック信号としては質のよい信号であるとはいえない。そこで、高域のノイズを低減せしめるため式(10)の2次のローパスフィルタ $LF(s)$ を演算過程に設ける。そのブロック線図を図3に示す。

$$LF(s) = \frac{g_2}{s^2 + g_1s + g_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

図3では、下記の関節空間におけるパラメータが用いられている。

$\mathbf{I}_{ner}(\mathbf{q})$: 慣性行列 ($L \times L$)

$\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: コリオリ力と遠心力の影響により発生するトルクベクトル ($L \times 1$)

$\mathbf{g}_{grav}(\mathbf{q})$: 重力の影響により発生するトルクベクトル ($L \times 1$)

$\mathbf{T}_{ext}$: 外力の影響により発生するトルクベクトル ($L \times 1$)

$\mathbf{K}_t$: トルク定数行列 ($L \times L$ の対角行列)

$\mathbf{K}_{tn}$: ノミナルトルク定数行列 ($L \times L$ の対角行列)

また、図3中の外乱力ベクトル $\mathbf{F}_{dis}$ は、式(8)の指令力ベクトル $\mathbf{F}^{ref}$ を入力力ベクトル $\mathbf{F} (N \times 1)$ に置き換えた式(11)より計算している。

$$\mathbf{F}_{dis} = \mathbf{F} - \mathbf{M}_n s^2 \mathbf{p} - \mathbf{F}_{extn} \quad \dots\dots\dots (11)$$

推定外乱力ベクトルは次式で表される。

$$\hat{\mathbf{F}}_{dis} = LF(s) [\mathbf{F} - \mathbf{M}_n s^2 \mathbf{p} - \mathbf{F}_{extn}] \quad \dots\dots\dots (12 \cdot a)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{dis} = LF(s) \mathbf{F}_{dis} \quad \dots\dots\dots (12 \cdot b)$$

図4 図3の等価図

図3においては、直列微分演算子 s^2 が表記されているが、実際のシステムでは斜線で囲まれた部分を部分分数展開を行い、直列微分演算子を用いずにオブザーバを構成している⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。

この推定された外乱力ベクトル $\hat{\mathbf{F}}_{dis}$ を図3のようにフィードバックすることで、外乱力ベクトル $\mathbf{F}_{dis}$ に対してロバストなシステムを構築することができる。ただし、マニピュレータを動かす場合、その動力は関節空間のトルクで得なくてはならない。そこで、作業空間の指令力ベクトル $\mathbf{F}^{ref}$ と推定外乱力ベクトル $\hat{\mathbf{F}}_{dis}$ の和である入力力ベクトル $\mathbf{F} (N \times 1)$ を、式(13)に示すようにヤコビ行列 $\mathbf{J}_{aco}(\mathbf{q}) (N \times L)$ の転置行列を用いて、関節空間の入力トルクベクトル $\mathbf{T} (L \times 1)$ に変換する。

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}_{aco}(\mathbf{q})^T \mathbf{F} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし、

$$\mathbf{J}_{aco}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

図3は何ら近似を施すことなく図4のように等価変換することができる。この作業座標系における外乱オブザーバを適用したマニピュレータの作業空間におけるダイナミクスは式(15)のように書ける。

$$\mathbf{M}_n s^2 \mathbf{p} = \mathbf{F}^{ref} - \mathbf{F}_{extn} - G_s \mathbf{F}_{dis} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 G_s は外乱力ベクトル $\mathbf{F}_{dis}$ からシステムまでの伝達関数であり、一種の感度関数である。その周波数特性は式(16)に示されるように外乱オブザーバの極に依存する。

$$G_s(s) = 1 - LF(s) \quad \dots\dots\dots (16)$$

外乱オブザーバのカットオフ周波数を大きくすればするほど、外乱力ベクトル F_{dis} の影響を除去することができる。一般にロボットの動作周波数帯域をおおように外乱オブザーバのカットオフ周波数を十分大きな値に設定することができるので、外乱力ベクトル F_{dis} の影響は除去される。したがって、動作周波数帯域において G_s は零とみなすことができるので、式(15)は式(3)となる。すなわち、作業座標系における外乱オブザーバを適用したシステムは外乱力ベクトル F_{dis} の影響がなく、マニピュレータの運動が指令力ベクトル F^{ref} 、ノミナルな外力ベクトル F_{extn} 、ノミナルな仮想質量行列 M_n により決定されるというノミナルモデルに固定化できる。

4. 作業座標系における外乱オブザーバと安定性

この章では、図5に示すような平面2自由度マニピュレータを用いて、作業座標系における外乱オブザーバを適用したシステムの安定性を考察する。

図3から、指令力ベクトル F^{ref} からマニピュレータの手先加速度ベクトル $\ddot{p}$ までの伝達関数は式(17)と書ける。

$$\begin{aligned} \ddot{p}(F^{ref})^{-1} &= [1 - LF]^{-1} \\ &\{I + LF[1 - LF]^{-1}M(p)^{-1}M_n\}^{-1}M(p)^{-1} \\ &\dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

式(10)を式(17)に代入して、特性方程式を求めると次式となる。

$$\det[(s^2 + g_1s)I + g_2M(p)^{-1}M_n] = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、等価質量行列 $M(p)$ (2×2) とノミナル仮想質量行列 M_n (2×2) を次のように定義する。

$$M(p) = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{xy} & M_{yy} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$M_n = \begin{bmatrix} M_{xxn} & 0 \\ 0 & M_{yy n} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、等価質量行列 $M(p)$ の物理的拘束条件は式

図5 実験モデル

(21)～(24)のように書ける。

$$M_{xx}M_{yy} - M_{xy}M_{yx} > 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$M_{xx} > 0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$M_{yy} > 0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$M_{xy} = M_{yx} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式(18)～(24)を用いてラウスの安定判別法により安定解析を行うと、結果として提案するシステムの安定条件は式(25)となる。

$$M_{xxn} > 0 \text{ and } M_{yy n} > 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

すなわち、各座標軸のノミナル質量を任意に設定できることがわかる。

5. 評価実験

5.1 実験システム 提案する制御手法の有効性を確認するため実験を行った。図6に実験システムの構造図を示す。実験に用いたマニピュレータは水平面内に2関節、2自由度をもち、各関節はダイレクトドライブモータにより駆動されている。各モータの回転角は内蔵された200 000 Pulse/Rev.のエンコーダにより検出される。また、提案する手法(作業座標系における外乱オブザーバ)の計算はDSP(Digital Signal Processor: μ PD77230)を介してソフトウェアサーボで行った。一方、マイクロプロセッサi80386は、センサ、アンプとのデータの交換(I/O, D/A, A/D)や、タイマを管理している。ソフトウェアサーボのサンプリング時間は1 msである。

5.2 実験方法 実験は作業座標系において位置制御実験を行った。3章でも述べたように、提案する作業座標系における外乱オブザーバを適用したシステ

図6 実験システムの構造図

ムでは、そのダイナミクスを式(3)のノミナルモデルに固定化することができる。すなわち、各座標軸の質量はノミナル値に固定化されており、また各座標軸は非干渉化されていることになる。したがって、位置制御器が作り出す指令力ベクトル F^{ref} として次式を与えた。

$$F^{ref} = M_n \{ K_p (\dot{p}^{ref} - \dot{p}) - K_v \dot{p} \} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここで、

K_p : マニピュレータ手先位置フィードバック
ゲイン行列 (2×2 の対角行列)

K_v : マニピュレータ手先速度フィードバック
ゲイン行列 (2×2 の対角行列)

$p^{ref} = (x^{ref}, y^{ref})^T$: マニピュレータ手先位置指令ベクトル (2×1)

このとき、マニピュレータの手先位置ベクトル p の理想的な応答は次式となる。

$$p = (s^2 + K_v s + K_p)^{-1} K_p p^{ref} \quad \dots\dots\dots (27)$$

まず最初に、マニピュレータ手先位置指令ベクトルとして、

$$(0.25m, 0.19m)^T \rightarrow (0.25m, 0.21m)^T$$

の y 軸方向のステップ指令を与えた。このとき、スタート位置の関節角度は $(\theta_1, \theta_2) = (-0.242, 1.784)$ rad, 目標位置の関節角度は $(-0.161, 1.719)$ rad となる。位置制御系のパラメータとしては、各軸とも固有周波数が 10 rad/sec, 減衰係数が 1 となるように与えた。このとき、 y 軸の応答が理想とする応答に近い応答をしているかで、ノミナルモデルの構築が行われているか判断ができる。

次に、マニピュレータ手先位置指令ベクトルとして、

$$(0.1875m, 0.25m)^T \rightarrow (0.3125m, 0.25m)^T$$

の x 軸方向のステップ指令を与えた。このとき、スタート位置の関節角度は $(\theta_1, \theta_2) = (0.0316, 1.791)$ rad, 目標位置の関節角度は $(0.0318, 1.286)$ rad となる。位置制御系のパラメータとしては、各軸とも固有周波数が 5 rad/s, 減衰係数が 0.6 となるように与えた。このとき、提案する作業座標系における外乱オブザーバを適用しないで位置制御を行った結果も測定し、両者を比較検討した。具体的には、定常偏差が除去できているか (= 摩擦力を補償できているか)、 y 軸方向の運動が観測されないか (= 各座標軸間の干渉力を補償できているか) を比較することで、提案する外乱オブザーバが有効に外乱を補償できているかどうかの評価を行うことができる。

5.3 実験結果および考察 図 7, 8 に、 y 軸方向のステップ指令に対する応答の実験結果 (x 軸応答、

図 7 y 軸方向のステップ応答実験結果

図 8 所望とした y 軸方向の応答(固有周波数: 10 rad/s, 減衰係数: 1)

y 軸応答)、 y 軸方向の理想とする二次システムの応答(固有周波数: 10 rad/s, 減衰係数: 1)を示す。本実験では 5.2 節でも指摘したように、提案する作業座標系における外乱オブザーバでノミナルなシステムが構築されていれば、その応答は理想とする応答(式(27)のような二次システムの応答)に一致することになる。図 7 の結果は、ダイレクトドライブモータのコミュニケーション調節の若干のずれから生じるとされる応答のきこちなさがあるものの、理想とする応答(図 8 の応答)とほぼ一致している。すなわち、提案する作業座標系における外乱オブザーバを適用することにより、ノミナルモデルが構築されていることがわかる。

次に、 x 軸方向のステップ指令に対する応答の実験結果を図 9 に示す。図 9 (a) は作業座標系におけるノミナルモデルを適用しないで、式(26)の位置制御器のみで制御 (PD 制御) したときの結果である。一方、図 9 (b) は作業座標系における外乱オブザーバを適用してノミナルモデルを構築し、式(26)の位置制御器で制御を行ったときの結果である。本実験では 5.2 節でも指摘したように、定常偏差の有無、 y 軸方向の運動の有無、理想とする曲線との整合性が重要な点である。図 9 (a) の結果、 x 軸、 y 軸とも、摩擦力の影響により定常偏差が生じている。また、 x 軸方向のステップ指令にもかかわらず、 x 軸- y 軸の干渉の影響により y 軸方向にも運動が生じている。一方、今回提案した作業座標系における外乱オブザーバを適用して作業座標系におけるノミナルモデルを構築した後、位置制御を行ったシステムでは、 x 軸方向の応答において、最初の 350 ms の間、第 2 関節のサーボアンプの飽和によ

(a) PD 制御の場合

(b) ノミナルモデルに基づく制御の場合

図 9 x 軸方向のステップ応答実験結果

図 10 所望とした x 軸方向の応答(固有周波数: 5 rad/s, 減衰係数: 0.6)

り理想とする曲線(図 10 の応答)からずれているものの、その後の応答は一致し、定常偏差もなく、y 軸方向の運動も一定値のままであり、提案する外乱オブザーバは外乱力を有効に補償することがわかる。

ここで、図 9 (b) の x 軸方向の立上りの遅れについて考察を行う。x 軸方向のステップ指令に対応して、関節角 (θ_1, θ_2) が、 $(0.0316, 1.791) \text{ rad} \rightarrow (0, \pi/2) \text{ rad} \rightarrow (0.0318, 1.286) \text{ rad}$ と変化する。この姿勢状態では、x 軸 - 方向、y 軸 ± 方向の運動は両関節のアクチュエータが関与するものの、x 軸 + 方向はおもに第 2 関節が関与し、第 1 関節はほとんど関与できないことがわかる。すなわち、第 2 関節のサーボアンプの飽和による y 軸 ± 方向の運動誤差は第 1 関節の動きで補えるものの、x 軸 + 方向は補えることができず、x 軸方向の立上りの遅れが生じたと考えられる。

6. む す び

本論文は、作業座標系におけるノミナルモデルを構

築する手法を提案した。ノミナルモデルの構築に当たり、作業座標系における外乱力を推定・補償する外乱オブザーバを提案した。この作業座標系における外乱力を推定・補償する外乱オブザーバは、非常にシンプルなアルゴリズムで、機械システムの正確なパラメータがわからない場合においてもノミナルモデルを構築できる特徴を有する。本手法の有効性を、平面 2 自由度ダイレクトドライブマニピュレータを用いた実験により確認した。

研究遂行に際しご支援いただいた機械技術研究所ロボット工学部元部長大山尚武氏並びに、有益な助言、助力をいただいた機械技術研究所ロボット工学部バイオロボティクス課荒井裕彦氏に謝意を表する。

文 献

- (1) Freund, E., *Int. J. Rob. Res.*, 1-1(1982), 65.
- (2) Luh, J. Y. S., ほか 2 名, *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. AC-25, No. 3(1980), 468.
- (3) An, C. H., ほか 2 名, *Model-Based Control of a Robot Manipulator*, (1988), The MIT Press.
- (4) Atkeson, C. G., ほか 2 名, *Int. J. Rob. Res.*, 5-3(1986), 101.
- (5) Dubowsky, S. and DesForges, D. T., *ASME Trans., J. Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol. 101 (1979), 193.
- (6) Landau, I. D. and 富塚, 適応制御システムの理論と実際, (1981), オーム社.
- (7) 竹垣・有本, 計自論, 17-4(1981), 467.
- (8) Nakao, M., ほか 2 名, *Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Auto.*, 1(1987), 326.
- (9) Hsia, T. C., ほか 2 名, *Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Auto.*, 3(1988), 1329.
- (10) Hsia, T. C. and Gao, L. S., *Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Auto.*, 3(1990), 2070.
- (11) Komada, S. and Ohnishi, K., *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 37-1(1990), 6.
- (12) Murakami, T. and Ohnishi, K., *Proc. IEEE IECON'91*, 2(1991), 1043.
- (13) Vaccaro, R. J. and Hill, S. D., *IEEE J. Rob. and Auto.*, 4-1(1988), 70.
- (14) Chen-Yuan Kou and Shay-Ping T. Wang, *IEEE Trans. Rob. and Auto.*, 7-5(1991), 653.
- (15) Whitney, D. E., *IEEE Trans. Man Machine Syst.*, Vol. MMS-10, No. 2(1969), 47.
- (16) Khatib, O., *IEEE J. Rob. and Auto.*, Vol. RA-3, No. 1 (1987), 43.
- (17) Slotine, J. J. E., ほか 2 名, *Int. J. Rob. Auto.*, 3-1(1988), 28.
- (18) 申・ほか 3 名, 第 9 回日本ロボット学会学術講演会, 3 (1991), 817.
- (19) Asada, H. and Lim, S. K., *Proc. of 1985 ASME Winter Annual Meeting, Robots and Manufacturing Auto. Symp.*, (1985), 277.
- (20) Kaneko, K., ほか 3 名, *Proc. 2nd IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, (1992), 216.
- (21) 金子・ほか 3 名, 機論, 58-546, C(1992), 484.