ロバスト制御に基づいた多自由度ロボットの安定性 および作業空間での非干渉制御に関する一考察

正員 村上 俊之 (慶應大)

正員 大西 公平 (慶應大)

A Study of Stability and Workspace Decoupling Control Based on Robust Control in Multi-Degrees-of-Freedom Robot

Toshiyuki Murakami, Member, Kouhei Ohnishi, Member (Keio University)

The paper describes a workspace force controller based on disturbance observer. In the multi-degrees-of-freedom robot, either joint space or workspace is selected to construct the disturbance observer. In case the disturbance observer is constructed in the joint space, the total stability of motion controller is independent of the configuration of robot. In the workspace observer-based motion controller, however, the total stability depends on the configuration of robot.

In the paper, the differences between the joint space observer and the workspace observer are shown from a viewpoint of the stability. Furthermore, the decoupling control strategy is discussed in the workspace. First, the observer-based system is analyzed in one-degree-of-freedom system. Secondly, we explain a basic structure of workspace motion controller based on the joint space observer and the workspace observer. Then the stability of each motion controller is considered. Several numerical results are also shown to confirm the theoretical analysis of the observer-based motion controller.

キーワード：外乱オブザーバ、パラメータ変動、関節空間、作業空間、非干渉制御、力制御

1. はじめに

多自由度ロボットのモーションコントローラを実現する場合、コントローラを構成する空間としては二つ考えられる。一つは、ロボットを駆動するアクチュエータが存在する関節空間であり、ロボットに最終的な動作指令を与える場合に考慮すべき空間である。もう一つは、ロボット（ロボットアーム）の先端の運動を表す作業空間である。通常、ロボットの制御を行う場合、ユーザにとって認識しやすい作業空間上で動作指令を与えることが望ましい。従って、関節空間においてフィードバック制御系を構成した場合、作業空間での動作指令を各関節への動作指令へ変換する必要がある。一方、作業空間上でフィードバック制御系が構成された場合には、コントローラの操作量が関節空間へ

の指令に変換される。従って、作業空間上で動作指令を与える場合には、どちらの空間でフィードバック制御系を構成しても作業空間での動作指令あるいは操作量を関節空間へ変換する座標変換が必要となる。

この座標変換についてはロボットの運動学的な問題であり、実際に高精度な動作を実現するためにはロボットの動力学をも考慮に入れて制御系を構成する必要がある。周知のように、ロボットの各関節には干渉力を含めた様々な外乱トルクが作用する。従って、高精度なモーションコントローラを構成するには、これらの外乱トルクを積極的に抑圧することが要求される。最近では、外乱オブザーバ⁽¹⁾⁽²⁾や2自由度制御系⁽³⁾など、ロバスト制御技術に関して著しい進展が見られている。また、これらの手法はロボットの制御にも多く適用されており、その有効性は既に報告されている。

る⁽¹⁾⁽²⁾。ロバスト制御系は、座標変換などの運動学的な問題とは異なり、ロボットの動力学的な問題と直接関係している。しかも、関節空間および作業空間のどちらの空間でもその構成が可能であることが報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、各空間でロバスト制御系を構成した場合のコントローラの相違についての報告はされていない。そこで、本論文では関節空間および作業空間において外乱オブザーバを構成した場合の作業空間における力コントローラの相違について、コントローラ全体の安定性を含めた解析を行う。本論文では、関節空間で構成されたオブザーバを関節空間オブザーバ、作業空間で構成されたオブザーバを作業空間オブザーバと呼ぶことにする。

ロボットに存在する外乱トルクは基本的には関節に作用するため、関節空間で外乱オブザーバを構成した場合、ロボットの各関節は完全に非干渉化される。従って、作業空間で力コントローラを実現する場合には、ロボットの動力学はいっさい考慮に入れる必要はなく、運動学のみによってコントローラの特性は決まる。また、オブザーバのパラメータ変動に対する安定性は、主に負荷変動などの動力学要素によってのみ決まる。しかしながら、作業空間において非干渉力コントローラを実現するためには、第4章で述べるように同空間における等価質量行列を明確に知る必要がある。ここで、等価質量行列とはロボットの先端を質点と考えた場合に定義されるロボット先端の等価的な質量行列を表す。一方、作業空間で外乱オブザーバを構成した場合、第2章で述べるように作業空間で定義される外乱トルクに運動学関係式が含まれるため、コントローラを構成する際にロボットの運動学と動力学を分離して取扱うことはできない。しかしながら、作業空間における非干渉力コントローラは作業空間オブザーバに含まれる任意の質量行列を対角行列とすることで達成できる。ここで、オブザーバのパラメータ変動に対する安定性に関しては、作業空間における等価質量行列の変動が関係する。従って、関節空間および作業空間オブザーバでは、両者とも安定性および作業空間での非干渉性を議論する場合には等価質量行列が関与する。

上記の事項をふまえて、本論文では関節空間オブザーバおよび作業空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラの比較検討を行う。まず、第2章では多自由度ロボットの動力学方程式を作業空間および関節空間において示す。第3章では、外乱オブザーバに基づいたシステムのパラメータ変動に対する安定性について論じる。更に、第4章では関節空間および作

業空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラの安定性および非干渉性について述べる。

2. 多自由度ロボットの動力学方程式

本章では、外乱オブザーバを構成する際に必要な多自由度ロボットの動力学方程式を関節空間および作業空間において導出する。

〈2・1〉 関節空間での動力学方程式と外乱モデル

一般に、ロボットの動力学方程式はラグランジェ方程式から次式のような形で得られる。

$$\left. \begin{aligned} J(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) &= \tau \\ c(q, \dot{q}) &= J(q, \dot{q})\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \{ \dot{q}^T J(q) \dot{q} \} \\ &\dots\dots\dots (1) \end{aligned} \right\}$$

ここで、 $J(q)$ ：慣性行列、 $c(q, \dot{q})$ ：遠心力、コリオリ力の総和、 $g(q)$ ：重力の効果をそれぞれ表している。また、 τ は入力トルクである。加速トルク以外を干渉トルクとみなすと、(1)式は(2)式のように書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{diag } J(q)\ddot{q} &= \tau - T_{\text{int}} \\ T_{\text{int}} &= \{ J(q) - \text{diag } J(q) \} \dot{q} + J(q)\dot{q} \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \{ \dot{q}^T J(q) \dot{q} \} + g(q) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

各関節への入力トルク τ は、アクチュエータの発生トルク($K I_a^{\text{ref}}$)、外力である反作用トルク(T_{ext})および摩擦トルク($f_c + D\dot{q}$)を用いて次式のように表される。

$$\tau = K I_a^{\text{ref}} - T_{\text{ext}} - f_c - D\dot{q} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式において、 K および I_a^{ref} はアクチュエータのトルク係数および電流指令をそれぞれ表す。ここで、トルク係数はモータのロータ位置により変動する。また、関節の慣性モーメントは負荷に応じて変動する。そこで、これらの変動を表すため(4)式を導入する。同式において、 J_n および K_m は対角要素に各関節のノミナルな慣性モーメントおよびトルク係数をもつ対角行列である。

$$\left. \begin{aligned} \text{diag } J(q) &= J_n + \{ \text{diag } J(q) - J_n \} \\ &= J_n + \Delta J(q) \\ K_t &= K_m + \{ K_t - K_m \} \\ &= K_m + \Delta K_t \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

(3)、(4)式を(2)式へ代入することでロボットの関節空間での動力学方程式として(5)式が得られる。また、関節に作用する外乱トルクの総和は(6)式で与えられることになる。

 図 1 i 番目の関節のモデル

 Fig. 1. A model of i -th joint system.

$$\begin{aligned} J_n \ddot{q} &= K_{in} I_a^{ref} \\ &\quad - \{T_{int} + T_{ext} + f_c + D\dot{q} + \Delta J(q)\dot{q}\} \\ &\quad - \Delta K_t I_a^{ref} \} \\ &= \tau_n - T_{dis} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_{dis} &= T_{int} + T_{ext} + f_c + D\dot{q} \\ &\quad + \{\text{diag } J(q) - J_n\} \dot{q} + \{K_{in} - K_t\} I_a^{ref} \} \end{aligned} \quad (6)$$

(5), (6)式からロボットの i 番目の関節は図 1 に示すようなブロック線図で表される。

$\langle 2 \cdot 2 \rangle$ 作業空間での動力学方程式と外乱モデル

作業空間での動力学方程式は(5)式で示した関節空間での動力学方程式およびロボットの運動学関係式から導出される。ここで、関節空間の位置ベクトル q を用いて作業空間の位置ベクトル x を同次変換行列によって(7)式のように表す。また、速度および加速度ベクトルの関係式は(7)式を微分することによって(8), (9)式ようになる。

$$x = H(q) \quad (7)$$

$$\dot{x} = \frac{\partial H(q)}{\partial q} \dot{q} = J_{aco}(q) \dot{q} \quad (8)$$

$$\ddot{x} = J_{aco}(q) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} \quad (9)$$

(8), (9)式において、 $J_{aco}(q)$ はヤコビ行列を表す。更に、ヤコビ行列を用いることによって作業空間での力ベクトル F_n および関節空間でのトルクベクトル τ_n の関係も次式のように表せる。

$$\tau_n = J_{aco}(q)^T F_n \quad (10)$$

次に作業空間での等価質量行列の定義を行う。ここで、外乱トルクの影響を無視すると関節空間での運動エネルギーはノミルな慣性行列 J_n を用いて次式のように表される。

$$K_{joint} = \frac{1}{2} \dot{q}^T J_n \dot{q} \quad (11)$$

また、作業空間での質量行列を M とすると、同空間における運動エネルギーも次式ようになる。

$$K_{work} = \frac{1}{2} \dot{x}^T M \dot{x} \quad (12)$$

一般に、関節空間および作業空間での運動エネルギー

は等しいと考えることができるので、(8), (11)式および(12)式から作業空間での質量行列は等価的に次式のように定義できる。

$$M = J_{aco}(q)^{-T} J_n J_{aco}(q)^{-1} \quad (13)$$

(9), (10), (13)式を(5)式へ代入すると作業空間での動力学方程式として次式を得る。

$$\begin{aligned} M \ddot{x} &= F_n + M \dot{J}_{aco}(q) \dot{q} - M J_{aco}(q) J_n^{-1} T_{dis} \\ &\quad \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

(13)式からもわかるが、作業空間での等価質量行列はロボットの姿勢により変動する。そこで、ロボットの初期姿勢で決まる質量行列を M_n とし、姿勢による質量行列の変動 ΔM を次式のように分離して考える。

$$\begin{aligned} M &= M_n + (M - M_n) \\ &= M_n + \Delta M \end{aligned} \quad (15)$$

(15)式を用いることによって(14)式は次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} M_n \ddot{x} &= F_n - \Delta M \ddot{x} + M \dot{J}_{aco}(q) \dot{q} \\ &\quad - M J_{aco}(q) J_n^{-1} T_{dis} \\ &= F_n - F_{dis} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} F_{dis} &= \Delta M \ddot{x} - M \dot{J}_{aco}(q) \dot{q} + M J_{aco}(q) J_n^{-1} T_{dis} \\ &\quad \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

(16)式が作業空間でのロボットの動力学方程式となる。(5)式と(16)式を比較してわかるように、ロボットの動力学方程式は関節空間あるいは作業空間の区別に関係なく同一の形で表される。すなわち、指令入力と外乱の差が加速力となっている。ただし、定義される外乱の内容は異なる。

3. 外乱オブザーバに基づいたシステムの パラメータ変動に対する安定性

前章で示したように、ロボットの動力学方程式は関節空間あるいは作業空間の区別に関係なく同一の形となる。そこで、本章では1自由度系を仮定し、オブザーバが適用されたシステムのパラメータ変動(特に慣性変動)に対する安定性について考察する。取扱う制御対象のモデルは図1と同一となるが、1自由度系を仮定しているため、図1における各パラメータの添字 i は省略する。

$$\begin{aligned} \hat{T}_{dis} &= \frac{g}{s+g} (K_{in} I_a - J_n s \dot{q}) \\ I_a &= I_a^{ref} + I_{cmp} \\ I_{cmp} &= \frac{\hat{T}_{dis}}{K_{in}} \end{aligned} \quad (18)$$

1自由度系において外乱オブザーバを構成し、推定外乱トルクフィードバックを行った場合、全体のブロック

ク線図は図2のようになる。同図に示されるように、外乱トルクは(18)式により求められる。図2は図3の点線部分へ何ら近似を施さなく等価変換される。これより、推定外乱トルクがフィードバックされたシステムでは、外乱が感度関数 $G_S(s)$ を通した形で影響することがわかる。ここで、オブザーバのゲイン g を十分大きく選択することによって、感度関数 $G_S(s)$ はほぼ零となり、外乱の影響を遮断することができる。更に、前向きゲインとして、 J_n/K_{tn} を挿入することによって図3は加速度を指令入力とする加速度コントローラとなる。同コントローラを用いて位置コントローラを実現するため、加速度指令を次式のように設定する。

$$\ddot{q}^{\text{ref}} = \ddot{q}^{\text{cmd}} + K_v(\dot{q}^{\text{cmd}} - \dot{q}) + K_p(q^{\text{cmd}} - q) \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 K_v および K_p は速度フィードバックゲインおよび位置フィードバックゲインをそれぞれ表す。次に、(19)式を図3の加速度コントローラに適用した場合の位置コントローラ全体のパラメータ変動に対する安定性を解析する。ここで、位置指令から位置応答までの伝達特性をパラメータ変動を考慮に入れて求めると(20)式が得られる。ただし、解析を簡単にするためクーロン摩擦の影響は無視する。また、力制御を行わなければ1自由度系における干渉トルクおよび反作用トルクは零となり、外乱トルクは(21)式のようになる。

図2 オブザーバに基づいたシステム
Fig. 2. Observer-based system.

図3 加速度コントローラ
Fig. 3. Acceleration controller.

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{n(s)}{d(s)} q^{\text{cmd}} \\ n(s) &= (s^2 + K_v s + K_p) \left(\frac{K_t}{K_{tn}} s + g' \right) \\ d(s) &= \frac{J}{J_n} s^3 + \left(\frac{D}{J_n} + g' + \frac{K_t}{K_{tn}} K_v \right) s^2 \\ &\quad + \left(K_v g' + \frac{K_t}{K_{tn}} K_p \right) s + K_p g' \\ T_{\text{dis}} &= (J - J_n) \ddot{q} + (K_{tn} - K_t) I_a^{\text{ref}} + D \dot{q} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

(20)式からラウスの方法を用いてパラメータ変動に対する安定条件を求めると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{D}{J_n} \{ K_v g' + (1 - \beta) K_p \} + K_v g'^2 + (1 - \beta) K_v^2 g' \\ + K_v K_p (\beta - 1)^2 - (\alpha + \beta) K_p g' > 0 \\ \alpha = \frac{J}{J_n} - 1, \quad \beta = 1 - \frac{K_t}{K_{tn}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

(22)式より以下のことがいえる。ここで、 $P = K_t/J$, $P_n = K_{tn}/J_n$ である。

- (i) $\alpha + \beta < 0$, すなわち $PP_n^{-1} > 1$ ならばシステムは常に安定。
- (ii) $\alpha + \beta > 0$, すなわち $PP_n^{-1} < 1$ ならばシステムは常に安定とは限らない。

実際のロボットにおいては、トルク係数の変動は微小として無視することができるが、慣性変動に関しては無視することはできない。そこで、ノミナルな慣性モーメント J_n を可変ゲインとして(19)式の根軌跡を求めると図4が得られる。同図から、 $J/J_n = 12.27$ において根軌跡がベクトル軌跡上で右半平面に移行し、システム全体が不安定となることがわかる。表1にシミュレーションで用いたパラメータの値を示す。

図4 位置コントローラの根軌跡
Fig. 4. Root locus of position controller.

表 1 位置コントローラのパラメータ
Table 1. Parameters of position controller.

J : 3.76 kgm ²	D : 2.50 Nms/rad
K_r : 7.50 Nm/A	K_{rn} : 7.50 Nm/A
K_p : 900	K_v : 60
g : 100 rad/s	

上記の安定条件はオブザーバのゲイン g および位置コントローラのゲイン K_p, K_v によって異なるが、安定性を考慮に入れたオブザーバのノミナル値の設定に関して以下のことがいえる。

システムの安定性を保つためには、 P_n をできるだけ小さく設定することが好ましい。すなわち、 J_n はできるだけ大きく、 K_{rn} はできるだけ小さくすることになる。しかし、 J_n を大きく K_{rn} を小さく設定すると(18)式に示されるように、推定外乱トルク $\hat{T}_{dis}$ および補償電流 I_{cmp} に含まれるセンサからの観測雑音を強調してしまう結果となる。つまり、「安定性の向上」および「観測雑音の抑圧」に関して、 J_n および K_{rn} の選択にはあるトレードオフが存在する。また、実際のシステムにおいてはモータを駆動するパワーアップの限界値も考慮する必要がある。

4. 作業空間での力コントローラ

本章では、関節空間オブザーバあるいは作業空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラの安定性および非干渉性についての考察を行う。

〈4・1〉 関節空間オブザーバに基づいた力コントローラ 関節空間に外乱オブザーバが適用された場合、同空間での動力学方程式は図3から次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{q} &= \ddot{q}^{ref} - J_n^{-1} G_s(s) T_{dis} \\ \ddot{q}^{ref} &= J_v^{-1} J_{aco}(q)^T F_n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

関節空間オブザーバに基づいたシステムでは、(23)式からわかるように、慣性行列 J_n が任意の行列 J_v に置き換わる。従って、作業空間での等価質量行列も次式のように再定義される。

$$\left. \begin{aligned} M &= J_{aco}(q)^{-T} J_v J_{aco}(q)^{-1} \dots\dots\dots (24) \\ J_v &= J_{aco}(q)^T M_{vn} J_{aco}(q) \\ M &= J_{aco}(q)^{-T} \{ J_{aco}^T(q) M_{vn} J_{aco}(q) \} J_{aco}(q)^{-1} \\ &= M_{vn} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

(24)式において、任意の慣性行列 J_v を(25)式のように設定することで作業空間での等価質量行列は姿勢変動の影響を受けない任意の行列 M_{vn} に固定化される。(23)～(25)式から、(16)式は次式のように書き換えら

図 5 関節空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラ

Fig.5. Force controller based on joint space observer in workspace.

れる。

$$\begin{aligned} M_{vn} \ddot{x} &= F_n + M_{vn} J_{aco}(q) \ddot{q} \\ &\quad - M_{vn} J_{aco}(q) J_n^{-1} G_s(s) T_{dis} \end{aligned} \dots\dots\dots (26)$$

前章で述べたように、感度関数 $G_s(s)$ はほぼ零となるので、ロボットの動力学的効果が集約されている(26)式の第3項目は無視することができる。従って、(10)、(23)、(25)式より関節空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラの基本ブロック線図は図5のようになる。同図より、作業空間での力ベクトル $F^{ref} = F_n$ を等価質量行列 M_{vn} で加速度ベクトルに変換し、更にヤコビの逆行列によって各関節への角加速度指令とすることで、作業空間での質量行列は M_{vn} に固定化されることになる。

図5のコントローラにおいて注目すべき点は、等価質量行列 M_{vn} がマニピュレータの姿勢（あるいは初期姿勢）に関係なく任意に設定できることである。つまり、 M_{vn} を対角行列とすることで作業空間での各軸方向の力応答は完全に非干渉化される。また、 M_{vn} が固定化されていることから、(16)式における質量行列の変動も零となる。以上のことから、関節空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラに関して以下のことがいえる。

(i) ロボットの動力学と運動学が完全に分離されるため、作業空間での力コントローラは運動学的な考察のみで構成できる。

(ii) 作業空間での質量行列は任意の質量行列 M_{vn} に固定化され、同行列を対角行列とすることで作業空間での力応答は完全に非干渉化される。ただし、コントローラ内の座標変換としてヤコビの逆行列を用いる必要がある。

(iii) オブザーバのパラメータ変動に対する安定性はロボットの姿勢（運動学）とは無関係であり、動力学的な負荷変動のみに依存する。従って、関節空間オブザーバの安定解析に関しては、第3章で行った解析結果が応用できる。しかしながら、ヤコビの逆行列が

含まれていることから図5のカントローラは境界特異点においてパラメータ変動と関係なく不安定となる。

〈4・2〉 作業空間オブザーバに基づいた力コントローラ 作業空間オブザーバは(16)式に基づいて構成される。基本的な方程式の形は関節空間と同一であるから、作業空間でのオブザーバ構成も関節空間オブザーバと同一となる。従って、作業空間オブザーバの基本ブロック線図は図6のようになる。ここで、**LPF** および **G** は次式のように定義される。

$$\mathbf{LPF} = \begin{bmatrix} \frac{g}{s+g} & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \frac{g}{s+g} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g & 0 \\ & \ddots \\ 0 & g \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (27)$$

関節空間オブザーバ同様、図6は図7の点線部分へ等価変換される。図7は作業空間オブザーバが適用されたロボットの作業空間での等価的なブロック線図である。ここで、**HPF** は次式のように定義される。

$$\mathbf{HPF} = \begin{bmatrix} \frac{s}{s+g} & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \frac{s}{s+g} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (28)$$

図6 作業空間オブザーバに基づいた力コントローラ

Fig. 6. Force controller based on work-space observer.

図7 図6の等価変換図

Fig. 7. Equivalent transfer, ation of Fig. 6.

図7において、**HPF**に含まれるオブザーバのゲイン g を十分大きく選択することによってその対角要素はほぼ0となり、作業空間での外乱 F_{dis} の影響は遮断される。従って、作業空間オブザーバに基づいたロボットでは、作業空間での等価質量行列が外乱 F_{dis} の影響を受けずに固定化される。更に、前向きゲイン行列として、 $M_{vn}^{-1} M_n$ を挿入することで、 M_n は相殺され、力コントローラの質量行列は任意の行列 M_{vn} に置き換わる。また、作業空間での力応答の非干渉性はノミナルな質量行列 M_n を対角行列とすることで達成される。以上のことから、作業空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラに関して以下のことがいえる。

(i) 作業空間オブザーバは、ロボットの動力学的な外乱トルクのみならず姿勢変動による作業空間の質量行列の変動をも補償する。つまり、外乱補償に関しては動力学と運動学が分離されない。

(ii) 作業空間での質量行列はオブザーバのノミナルな質量行列 M_n に固定化される。従って、 M_n を対角行列とすることで作業空間での力応答は完全に非干渉化される。更に、前向きゲイン行列として $M_{vn}^{-1} M_n$ を挿入することで、力コントローラの質量行列は M_{vn} に置き換わる。ここで、コントローラ内の座標変換としてはヤコビの逆行列ではなく転置行列が用いられる。

(iii) 作業空間での外乱成分に質量行列の変動が含まれることから、オブザーバのパラメータ変動に対する安定性はロボットの姿勢に依存することになる。従って、姿勢が大きく変動する場合には、第3章で述べた結果からコントローラ全体が不安定となる可能性がある。この安定解析に関しては、干渉力を無視すると、(22)式において $K_m=1, J_n=($ 作業空間での各軸方向の等価質量) とすることで同式がそのまま適用できる。

5. シミュレーション結果

本章では、関節空間オブザーバおよび作業空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラに関し、その安定性および非干渉性について、シミュレーションにより検証を行う。シミュレーションでは、図8に示すような2リンクマニピュレータを仮定する。同図の各パラメータの値は表2に示されている。

シミュレーションでは、力指令 F^{ref} を(29)式のように生成する。また、同式の K_p, K_v および M_n, M_{vn} は(30), (31)式のように設定し、オブザーバのゲイン g は 100 rad/s とする。ここで、作業空間オブザーバ

図 8 シミュレーションで用いた 2 リンク マニピュレータ

Fig. 8. Tested two-link manipulator.

表 2 リンクマニピュレータのパラメータ
Table 2. Parameters of two-link manipulator.

$m_1 = 3.08 \text{ kgm}^2$, $m_2 = 0.15 \text{ kgm}^2$
$l_1 = l_2 = 0.3 \text{ m}$

のノミナルな質量行列 M_n は表 3 に示される姿勢 1 を基準にして決定している。

$$F^{\text{ref}} = K_p(x^{\text{cmd}} - x) + K_v(\dot{x}^{\text{cmd}} - \dot{x}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$K_p = \begin{pmatrix} 900 & 0 \\ 0 & 900 \end{pmatrix}, \quad K_v = \begin{pmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$M_{vn} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_n = \begin{pmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (31)$$

上記の設定で行ったシミュレーション結果を図 9 および図 10 に示す。シミュレーションでは表 3 に示す二つの初期姿勢で、マニピュレータの先端に関して y

表 3 マニピュレータ初期姿勢
Table 3. Initial configurations of manipulator.

姿勢 1 : $q_1 = 30^\circ$, $q_2 = 60^\circ$
姿勢 2 : $q_1 = 50^\circ$, $q_2 = 80^\circ$

(a) Configuration 1

(a) Configuration 1

(b) Configuration 2

x, y : 位置応答, $x^{\text{cmd}}, y^{\text{cmd}}$: 位置指令

図 9 シミュレーション結果 I (関節空間 オブザーバ)

Fig.9. Simulation results (joint space observer).

(b) Configuration 2

x, y : 位置応答, $x^{\text{cmd}}, y^{\text{cmd}}$: 位置指令

図 10 シミュレーション結果 II (作業空間 オブザーバ)

Fig.10. Simulation results (workspace observer).

表 4 質量行列の変動
Table 4. Variation of equivalent mass matrix.

	M_{xx}	M_{yy}	M_{xy}
姿勢 1 :	47.97	1.67	0.00
姿勢 2 :	22.74	16.38	-17.60

Fig. 11. Simulation results (workspace observer).
 $M_{nxx}=40$, $M_{nyy}=16$
 x, y : 位置応答, x^{cmd}, y^{cmd} : 位置指令
 図 11 シミュレーション結果Ⅲ (作業空間オブザーバ)

方向に 1.0 cm のステップ入力を与えた。両結果を比較してわかるように、関節空間オブザーバに基づいた力コントローラにおいては、ロボットの姿勢に関係なく安定でかつ非干渉化された応答が得られる。一方、作業空間オブザーバに基づいた力コントローラでは、非干渉化は行われているが、姿勢 2 において応答が多少不安定となりかけている。表 2 に示されているように y 方向の等価質量 M_{yy} は姿勢 1 と姿勢 2 でほぼ 10 倍変動しており、この変動がコントローラ全体の不安定化をまねいていると考えられる。しかしながら、表 4 に示される等価質量に応じてノミナルな質量行列を調整すると、図 11 に示されるような安定な応答が得られる。ここで、2 リンクマニピュレータの等価質量行列 M の各成分は (32) 式のように定義している。

$$M = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{xy} & M_{yy} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (32)$$

6. む す び

本論文では、関節空間オブザーバあるいは作業空間オブザーバに基づいた作業空間での力コントローラの安定性および非干渉性に関する比較検討を行った。こ

れより、以下のことがいえる。

(1) 関節空間オブザーバに基づいた力コントローラは、ロボットの姿勢が大きく変動したとしても、境界特異点以外ではコントローラの安定性は保たれる。しかしながら、作業空間でのモーションの非干渉化を行うには、座標変換としてヤコビの逆行列を用いる必要がある。

(2) 作業空間オブザーバに基づいた力コントローラは、ロボットの姿勢が大きく変動する動作指令に対しては不安定となる可能性がある。しかしながら、姿勢が大きく変動しない力制御などでは問題なく、座標変換としてヤコビの転置行列が用いられていることから、冗長ロボットにおいては座標変換による計算の省力化が期待できる。

(平成 4 年 7 月 20 日受付, 同 4 年 12 月 18 日再受付)

文 献

- (1) T. Murakami, et al.: "Advanced Motion Control in Mechatronics-A Tutorial", IEEE, Workshop on Intelligent Motion Control, Vol. 1, SL9~7 (1990)
- (2) 村上, 他: 「モーションのハイブリッドコントロール」, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91, Vol. B, p. 59 (平 3)
- (3) 金子, 他: 「2 自由度ロボタサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御」, ロボット学誌, 9, No. 7, 830 (平 3)
- (4) Komada, et al.: "Simplification of Inverse Kinematics Routine of Robot Manipulators Using Disturbance Observer in Task Space", IEEE, Int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 2, p. 1381 (1992)
- (5) 金子, 他: 「作業座標系におけるノミナルモデルに基づく運動制御」, 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92, Vol. A, p. 999 (平 4)

村 上 俊 之 (正員)

昭和 40 年 10 月 5 日生。平成 5 年 3 月慶應義塾大学大学院後期博士課程修了。同年 4 月同大学理工学部電気工学科助手。工学博士。現在、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)

昭和 27 年 7 月 25 日生。55 年東京大学大学院博士課程修了。現在、慶應義塾大学理工学部電気工学科助教授。工学博士。