

# 通信遅延を有するテレオペレーションの 適応予測に基づくバイラテラル制御

吉田航瑛 滑川徹 (金沢大学)

## Bilateral Control with Adaptive Prediction for Teleoperation with Communication Time Delay

\*K. Yoshida and T. Namerikawa (Kanazawa University)

**Abstract**— This paper deals with an environment estimation based predictive control for teleoperation with communication time delay. In this predictive control framework, the delayed position tracking and non-delayed force reflection are attempted. The goal of this paper is to propose a new control method which guarantees the stability, the convergence of position tracking error to zero and the small force tracking error theoretically. The proposed structure is the 3ch architecture with environment estimation based force prediction. In this proposed method, the master controller implements force control with environmental force prediction while the slave controller implements position and force control. The theoretical analysis shows the stability, the convergence of position error to zero and the small force tracking error. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

**Key Words:** Bilateral teleoperation, Transparency, Predictive control, Environment estimation, 3ch architecture, Communication time delay.

### 1 はじめに

テレオペレーションは人間の操作能力や感覚を遠隔地へ拡張するロボットシステムであり、遠隔地での作業や危険な環境下での作業などを目的として研究がなされている。このシステムでは、通信路で生じる通信遅延が不安定化や性能の劣化を招く<sup>1)</sup>。そこで、通信遅延に対する安定性を保証しつつ良好な性能を実現する必要があり、様々な制御手法が提案されている<sup>2)</sup>。

通信遅延を有するテレオペレーションに対する安定な制御手法として受動性に基づく制御<sup>1, 3)</sup>が提案されており、この枠組みにおける位置追従性能の改善や、時変の通信遅延への拡張などがなされてきた<sup>2, 4)–6)</sup>。これらの手法では、位置情報のみを双方向で通信する 2ch architecture の枠組みにおける通信遅延に対する安定化を実現している。一方、位置・力を双方向で通信する 4ch architecture<sup>7)</sup> や、その拡張である 3ch architecture<sup>9, 10)</sup> は、通信遅延がない状況で 2ch architecture よりも性能が良く<sup>8)</sup>、それら枠組みにおいても通信遅延に対するロバスト性が解析されている<sup>9)</sup>。また文献<sup>11)</sup>では、<sup>3)</sup>の波理論を応用した 4ch, 3ch architecture の安定化を提案しており、従来の 2ch architecture に対する安定化よりも設計の幅が広がることを示されている。以上の文献では安定性を保証しつつ遅延した位置追従や反力伝達を試みるが、情報の予測を行っていないため、遅延のない位置追従や遅延のない反力伝達は不可能である。

そこで文献<sup>12)–16)</sup>では、現時刻または未来の位置または力情報を予測する予測制御手法が提案されている。文献<sup>12)–14)</sup>では、状態予測によって遅延のないシステムの応答または遅延のない位置、力追従を試みている。ただしこれらの手法では、操縦者や環境のモデルの不確かさが操作中の予測誤差を生じさせ、予測誤差は位置追従や反力伝達の誤差を増加させる。一方、文献<sup>15, 16)</sup>では、環境の不確かさを扱うために、環境推定に基づく予測制御を提案している。文献<sup>15)</sup>では、<sup>3)</sup>の波理論に適応予測を導入し、マスタ側での遅延の影響をなくそうと

試みている。また、文献<sup>16)</sup>では、スレーブの遅延した位置追従と、マスタ側での遅延のない反力伝達が Neural Network に基づく環境の力予測によって試みられている。これにより遅延した反力伝達を行う場合と比較して作業が行いやすくなることが実験により示されている。これらの手法<sup>15, 16)</sup>における位置・力追従誤差の収束性は理論的に解析されていない。これらは基本的に 2ch architecture の構造となっているため、位置・力追従には誤差が生じると考えられる。また、<sup>17)</sup>でも環境推定を含む制御則が提案されているが、安定性は理論的に保証されていない。

そこで本稿では、環境推定に基づく予測制御手法の枠組み<sup>16)</sup>において、位置追従誤差の収束、小さな力追従誤差を理論的に保証した制御手法を提案することを目的とする。提案する制御構造は、文献<sup>16)</sup>の枠組みに力制御を追加したもので、3ch architecture<sup>10)</sup>に反力の予測を組み合わせた形となっている。仮定の下でシステムは安定、位置誤差は収束することを示し、力の追従誤差がゲインの値によっては小さくなることを示す。最後に実験により有効性を検証する。

### 2 問題設定

#### 2.1 制御対象

本稿では、1 自由度ロボットで構成されるテレオペレーションシステムを考える。1 自由度のマスタ及びスレーブのダイナミクスは次式で与えられる。

$$M_m \ddot{x}_m = F_m + F_{op} \quad (1)$$

$$M_s \ddot{x}_s = F_s - F_{env} \quad (2)$$

ここで、 $M_m, M_s \in \mathcal{R}$  はマスタ、スレーブの慣性、 $x_m, x_s \in \mathcal{R}$  はマスタ、スレーブの位置、また、 $F_m, F_s \in \mathcal{R}$  はマスタ、スレーブの制御入力である。 $F_{op}, F_{env} \in \mathcal{R}$  は操縦者が加える力と、スレーブが環境へ加える力を表し、以下の仮定を満たすものを扱う。

仮定 1. 操縦者の力  $F_{op}$  は有界。

仮定 2. スレーブは以下のような定数のパラメータを有するバネ・ダンパ系と接触する.

$$F_{env} = B_{env}\dot{x}_s + K_{env}(x_s - x_0) = \mathbf{W}^T \boldsymbol{\theta}_{env} \quad (3)$$

$$\mathbf{W} = [x_s \ \dot{x}_s \ 1]^T, \boldsymbol{\theta}_{env} = [K_{env} \ B_{env} \ -K_{env}x_0]^T$$

$K_{env}, B_{env}, x_0 \in \mathcal{R}$  はそれぞれ, バネ定数, 粘性摩擦係数, 平衡点を表す.

注意 1. 実際の遠隔環境は時変の非線形システムであることが多い. 文献<sup>16)</sup>では非線形の環境も扱えるが, 本稿は位置追従誤差, 力追従誤差の収束性の解析に焦点を絞っているため, 扱いが簡単な環境を仮定し, 扱える環境のクラスを広げることは今後の課題とする.

今回はこの遠隔環境のパラメータ  $\boldsymbol{\theta}_{env}$  を最小二乗法<sup>18, 19)</sup>によってオンライン推定する. この手法でパラメータ推定誤差が収束するためには  $\mathbf{W}$  が persistently exciting である必要がある<sup>18)</sup>. 今回はこれを満たす状況を考え, 以下の仮定をおく.

仮定 3. スレーブの位置と速度から構成されるベクトル  $\mathbf{W}$  は次式を満たす.

$$\lambda_{min} \left\{ \int_0^t \mathbf{W} \mathbf{W}^T dt' \right\} \rightarrow \infty \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (4)$$

注意 2. 5節の実験検証では  $\lambda_{min} \left\{ \int_0^t \mathbf{W} \mathbf{W}^T dt' \right\}$  が増加していくことが確認されている.

通信遅延については時変のものを扱い, マスタからスレーブへ情報伝達の通信遅延は  $T_m(t) \in \mathcal{R}$  とし, スレーブからマスタへ情報伝達の通信遅延は  $T_s(t) \in \mathcal{R}$  とする.

## 2.2 制御目的

テレオペレーションに対する一般的な制御目的は安定性と透明性の実現である<sup>2)</sup>. そこで, 制御目的 1 を以下のように定義する.

制御目的 1. システムは安定で, マスタとスレーブの位置, 速度は有界となる.

また, 透明性の達成とは操縦者が遠隔環境と直接接触しているような感覚で作業することである<sup>20)</sup>. このことは, 位置誤差と力追従誤差が零であること ( $x_m(t) = x_s(t)$ ,  $F_{op}(t) = F_{env}(t)$ ) と等価である. しかし, 遅延が生じる場合は, 遅延した情報しか入手することはできないのでこのような遅延のない位置, 力追従は難しい. 特にスレーブがマスタの動作に遅延なく追従することは, モデルの推定が難しい操縦者に操作されるマスタの動作を予測する必要があるので非常に困難である. しかし反力の伝達に関しては, 接触する環境によって推定によって力を予測できるので, 任意の時刻の反力を操縦者へ伝えられる可能性がある.

本稿で扱う予測制御の枠組みでは環境のオンライン推定により, 操縦者は遠隔環境がマスタ側にもありそれを直接接触する感覚で操作し, その操縦者の動作にスレーブは  $T_m(t)[s]$  遅れて追従することを制御目的とする. この制御目的は, 次式のような制御目的 1, 2 が達成されることと等価である.

$$\text{制御目的 1: } x_m(t - T_m(t)) - x_s(t) = 0 \quad (5)$$

$$\text{制御目的 2: } F_{op}(t - T_m(t)) - F_{env}(t) = 0 \quad (6)$$

なお, (6) は  $F_{op}(t) = F_{env}(t + T_m(t))$  と書けるため,  $T_m(t)[s]$  未来の環境の力を操縦者に伝えることと等価である.

## 3 制御則

### 3.1 制御構造

提案する制御構造を Fig. 1 に示す. この制御構造は 3ch architecture<sup>10)</sup> と環境の推定に基づく反力予測を組み合わせた構造となっている. スレーブ側は 3ch architecture と同様に, 遅延したマスタの位置, 操縦者の力を用いた制御を行っている. 一方マスタ側では, 予測のない 3ch architecture と異なり, 時刻  $t + T_m(t)$  の環境の力を, 推定された環境のパラメータ  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{env}(t - T_s(t))$  から予測しマスタの制御に用いている.

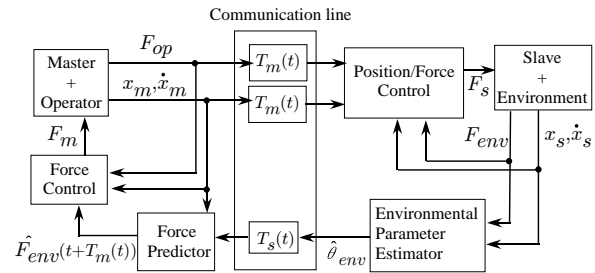


Fig. 1: Control structure

### 3.2 環境推定に基づく予測制御

次のような, 予測値を含む制御則を考える.

$$F_m = (K_f - 1)F_{op} - K_f \hat{F}_{env}(t + T_m(t)) - B\dot{x}_m \quad (7)$$

$$F_s = F_{env} + \rho \{ K_p(x_m(t - T_m(t)) - x_s) + K_d(\dot{x}_m(t - T_m(t)) - \dot{x}_s) + K_f(F_{op}(t - T_m(t)) - F_{env}) - B\dot{x}_s \} \quad (8)$$

ここで,  $K_f, K_p, K_d, B \in \mathcal{R}$  はそれぞれ, カゲイン, Pゲイン, Dゲイン, ダンピングである.  $\rho$  は  $\rho = M_s/M_m$  のように定義され, 慣性比を表し, 文献<sup>21)</sup>を参考に位置誤差の収束させるために導入した.  $\hat{F}_{env}(t + T_m(t))$  は時刻  $t + T_m(t)$  の環境の力の予測値で以下のように計算される.

$$\hat{F}_{env}(t + T_m(t)) = \hat{B}_{env}(t - T_s(t))\dot{x}_m(t) + \hat{K}_{env}(t - T_s(t))x_m(t) + \hat{C}(t - T_s(t)) \quad (9)$$

ここで,  $\hat{B}_{env}, \hat{K}_{env}, \hat{C}$  はそれぞれ環境パラメータ  $B_{env}, K_{env}, -K_{env}x_0$  の推定値で, 次式のように最小二乗法によって推定される.

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_{env} = -\mathbf{P}\mathbf{W} \{ \mathbf{W}^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_{env} - F_{env} \} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P}^{-1} = \mathbf{W}\mathbf{W}^T, \mathbf{P}(0) = p_0 \mathbf{I} \quad (11)$$

$$(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{env} = [\hat{K}_{env} \ \hat{B}_{env} \ \hat{C}]^T) \quad (12)$$

ここで,  $p_0$  は  $\mathbf{P}(t)$  の初期値を表す. 制御則 (7)(8) をマスタ, スレーブのダイナミクス (1)(2) に代入すると以

下の閉ループ系が得られる.

$$M_m \ddot{x}_m = -(K_f B_{env} + B) \dot{x}_m - K_f K_{env} x_m \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & -K_f C + K_f F_{op} \\ & -K_f \tilde{B}_{env} \dot{x}_m - K_f \tilde{K}_{env} x_m - K_f \tilde{C} \end{aligned} \quad (14)$$

$$M_m \dot{x}_s = -B \dot{x}_s + K_p (x_m(t - T_m(t)) - x_s) + K_d (\dot{x}_m(t - T_m(t)) - \dot{x}_s) + K_f (F_{op}(t - T_m(t)) - F_{env})$$

ここで,  $\tilde{K}_{env}, \tilde{B}_{env}, \tilde{C}$  は以下のように定義される推定パラメータ誤差である.

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{env} &= \hat{K}_{env}(t - T_s(t)) - K_{env} \\ \tilde{B}_{env} &= \hat{B}_{env}(t - T_s(t)) - B_{env} \\ \tilde{C} &= \hat{C}(t - T_s(t)) + K_{env} x_0 \end{aligned} \quad (15)$$

次節では, この閉ループ系 (13)(14) とパラメータ更新式 (10)(11) を考え, 安定性と性能の解析を行う.

#### 4 安定性・性能解析

本節では, 安定性と位置, 反力伝達特性について解析する. まず, 本節での解析のため, 以下の環境パラメータ推定誤差の収束に関する補題を考える.

補題 1. <sup>18)</sup> パラメータ推定則 (10)(11) を考える. この時パラメータ推定誤差  $\tilde{\theta}_{env} = \hat{\theta}_{env}(t) - \theta_{env}$  に関して次式が成り立ち, パラメータ推定誤差は有界となる.

$$\|\tilde{\theta}_{env}\| \leq \left\{ \lambda_{\min} \left( I + p_0 \int_0^t W W^T dt' \right) \right\}^{-\frac{1}{2}} \|\tilde{\theta}_{env}(0)\|$$

さらに仮定 3 を満たせば, 次式が成り立つ.

$$\|\tilde{\theta}_{env}\| \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (16)$$

このパラメータ推定誤差に関する補題を用いると, マスタの状態の有界性に関する次の補題が成り立つ.

補題 2. (マスタの状態の有界性) マスタシステム (7) とパラメータ更新則 (10)(11) を考える. 仮定 1-3 が成り立つとき, マスタの位置と速度  $x_m, \dot{x}_m$  は有界となる.

*Proof.* マスタの閉ループ系を状態空間表現は次式のようになる.

$$\dot{X}_m = (A_m + \tilde{A}_m) X_m + d \quad (17)$$

$$\begin{aligned} X_m &= \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ M_m^{-1} \{K_f F_{op} - K_f \hat{C}(t - T_s(t))\} \end{bmatrix}, \\ A_m &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M_m^{-1} K_f K_{env} & -M_m^{-1} (K_f B_{env} + B) \end{bmatrix}, \\ \tilde{A}_m &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -M_m^{-1} K_f \tilde{K}_{env} & -M_m^{-1} K_f \tilde{B}_{env} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで,  $A_m$  は  $B_{env} > 0, K_{env} > 0$  であれば安定となる. このように, マスタは環境のパラメータ推定値に依存した線形時変システムとみることができる. 補題 1 から,  $d$  を構成する  $\hat{C}$  は有界で, さらに,  $F_{op}$  は仮定 1 より有界であるので,  $d$  は有界となり, 次式を満たす定数  $\epsilon_d$  が存在する.

$$\|d\| \leq \epsilon_d \quad (19)$$

また, 補題 1 より  $\tilde{A}_m$  を構成する要素は有界かつ, 0 に収束するので, 次式を満たす変数  $\alpha(t)$  が存在する.

$$\tilde{A}_m^T(t) \tilde{A}_m(t) \leq \alpha(t) I, \alpha(t) \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (20)$$

次にリアプノフ法を用いる.  $A_m$  が安定であるため次式を満たす定数  $P_1 > 0, \gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$  が存在する.

$$A_m P_1 + P_1 A_m + \gamma_1^{-1} P_1 P_1 + \gamma_2^{-1} P_1 P_1 + I < 0 \quad (21)$$

この式の解  $P_1$  を用いて, リアプノフ関数候補  $V_1 = X_m^T P_1 X_m$  を考える. この関数を微分すると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= X_m^T \{A_m^T P_1 + P_1 A_m\} X_m \\ &+ X_m^T \tilde{A}_m^T P_1 X_m + X_m^T P_1 \tilde{A}_m X_m \\ &+ d^T P_1 X_m + X_m^T P_1 d \end{aligned} \quad (22)$$

ここで, ベクトルの関係式

$$a^T b + b^T a \leq \gamma a^T a + \gamma^{-1} b^T b, (\gamma > 0) \quad (23)$$

を用いると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq X_m^T \{A_m P_1 + P_1 A_m + \gamma_1^{-1} P_1 P_1 \\ &+ \gamma_2^{-1} P_1 P_1 + I\} X_m + \gamma_1 X_m^T \tilde{A}_m^T \tilde{A}_m X_m \\ &+ \gamma_2 d^T d - X_m^T X_m \end{aligned} \quad (24)$$

ここで, (21) より, 次式が成り立つ.

$$\dot{V}_1 \leq \gamma_1 X_m^T \tilde{A}_m^T \tilde{A}_m X_m + \gamma_2 d^T d - X_m^T X_m \quad (25)$$

ここで, (20), (19) の関係式を考えると次式が得られる.

$$\dot{V}_1 \leq -(1 - \gamma_1 \alpha(t)) \|X_m\|^2 + \gamma_2 \epsilon_d^2 \quad (26)$$

ここで  $\alpha(t)$  は  $\tilde{A}_m^T \tilde{A}_m$  の最大固有値であるため次式が成り立つ.

$$\alpha(t) = \left( \frac{K_f}{M_m} \right)^2 \{ \tilde{K}_{env}^2 + \tilde{B}_{env}^2 \} \leq \left( \frac{K_f}{M_m} \right)^2 \|\tilde{\theta}_{env}(t - T_s)\|^2$$

$\|\tilde{\theta}_{env}(t - T_s)\|$  は補題 1 のように減少するため, 従ってある定数  $1 > \epsilon_1 > 0$  に対して次式を満たす有限な時刻  $T_0$  が存在する.

$$(1 - \gamma_1 \alpha(t)) \geq \epsilon_1 > 0, \forall t \geq T_0 \quad (27)$$

また時刻  $t < T_0$  では,  $(1 - \gamma_1 \alpha(t)) \leq 0$  となる可能性があるが,  $\gamma_1 \alpha(t)$  の有界性から, 次式を満たす有界な定数  $\epsilon_2 > 0$  が存在する.

$$(1 - \gamma_1 \alpha(t)) \geq -\epsilon_2 > -\infty, \forall t < T_0 \quad (28)$$

これらの式 (27)(28) から, 次式が得られる.

$$\dot{V}_1 \leq \epsilon_2 \|X_m\|^2 + \gamma_2 \epsilon_d^2, \forall t < T_0 \quad (29)$$

$$\dot{V}_1 \leq -\epsilon_1 \|X_m\|^2 + \gamma_2 \epsilon_d^2, \forall t \geq T_0 \quad (30)$$

この式と  $V_1$  の定義から,  $V_1$  に関する微分不等式が得られる.

$$\dot{V}_1 \leq \frac{\epsilon_2}{\lambda_{\min}(P_1)} V_1 + \gamma_2 \epsilon_d^2, \forall t < T_0 \quad (31)$$

$$\dot{V}_1 \leq \frac{-\epsilon_1}{\lambda_{\max}(P_1)} V_1 + \gamma_2 \epsilon_d^2, \forall t \geq T_0 \quad (32)$$

この解は以下ようになる。

$$V_1(t) \leq V_1(0)e^{\frac{\epsilon_2 t}{\lambda_{\min}(P_1)}} + \frac{\gamma_2 \epsilon_d^2 \lambda_{\min}(P_1)}{\epsilon_2} (1 - e^{\frac{\epsilon_2 t}{\lambda_{\min}(P_1)}}), \forall t < T_0 \quad (33)$$

$$V_1(t) \leq V_1(T_0)e^{\frac{-\epsilon_1(t-T_0)}{\lambda_{\max}(P_1)}} + \frac{\gamma_2 \epsilon_d^2 \lambda_{\max}(P_1)}{\epsilon_1} (1 - e^{\frac{-\epsilon_1(t-T_0)}{\lambda_{\max}(P_1)}}), \forall t \geq T_0 \quad (34)$$

この解と  $T_0$  の有界性から  $V_1$  は常に有界となる。さらに  $V_1$  の定義から、 $X_m$  も有界となる。□

次に、位置誤差について考える。位置誤差は以下の補題 3 のように 0 に収束する。

**補題 3.** (位置追従) 閉ループ系 (10)(11)(13)(14) を考える。仮定 1-3 が成り立つとき位置誤差  $e_p = x_m - x_s(t + T_m(t))$ , 速度誤差  $\dot{e}_p = \dot{x}_m - \dot{x}_s(t + T_m(t))$  は零に収束する。

*Proof.* まず、スレーブの閉ループ系を  $T_m(t)[s]$  シフトし、次式のように書きなおす。

$$M_m \ddot{x}_s(t + T_m(t)) = -B \dot{x}_s(t + T_m(t)) + K_p(x_m - x_s(t + T_m(t))) + K_d(\dot{x}_m - \dot{x}_s(t + T_m(t))) + K_f(F_{op}(t) - F_{env}(t + T_m(t))) \quad (35)$$

ここで、 $F_{env}$  の式を代入すると次式のようになる。

$$M_m \ddot{x}_s(t + T_m(t)) = K_p(x_m - x_s(t + T_m(t))) + K_d(\dot{x}_m - \dot{x}_s(t + T_m(t))) + K_f F_{op} - (K_f B_{env} + B) \dot{x}_s(t + T_m(t)) - K_f K_{env} x_s(t + T_m(t)) + K_f K_{env} x_0 \quad (36)$$

(13) から (36) を引き、位置誤差  $e_p$  の定義を用いると、以下の偏差系が得られる。

$$M_m \ddot{e}_p + \{K_d + K_f B_{env} + B\} \dot{e}_p + \{K_p + K_f K_{env}\} e_p = d_p \quad (d_p = -K_f \tilde{B}_{env} \dot{x}_m - K_f \tilde{K}_{env} x_m + K_f \tilde{C}) \quad (37)$$

ここで、変数  $d_p$  について考える。仮定 1-3 が成り立つとき、補題 2 からマスタの位置、速度  $x_m, \dot{x}_m$  は有界である。また補題 1 から、推定パラメータ誤差  $\tilde{B}_{env}, \tilde{K}_{env}, \tilde{C}$  も 0 に収束する。従って、 $d_p$  は以下のように 0 に収束する項で構成される。

$$d_p = -K_f \underbrace{\tilde{B}_{env}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\dot{x}_m}_{\text{bounded}} - K_f \underbrace{\tilde{K}_{env}}_{\rightarrow 0} \underbrace{x_m}_{\text{bounded}} + K_f \underbrace{\tilde{C}}_{\rightarrow 0} \quad (38)$$

従って、 $\lim_{t \rightarrow \infty} d_p \rightarrow 0$  である。ここで、入力を  $d_p$  とし、出力を  $[e_p \ \dot{e}_p]^T$  とすると、その伝達関数行列  $G(s)$  は以下ようになる。

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{M_m^{-1}}{s^2 + M_m^{-1}\{K_d + K_f B_{env} + B\}s + M_m^{-1}\{K_p + K_f K_{env}\}} \\ \frac{M_m^{-1}s}{s^2 + M_m^{-1}\{K_d + K_f B_{env} + B\}s + M_m^{-1}\{K_p + K_f K_{env}\}} \end{bmatrix}$$

この伝達関数行列は安定となる。このように、0 に収束する入力  $d_p$  から出力 (位置誤差, 速度誤差) への伝達関数行列が安定であるので、線形システムの入出力安定性<sup>22)</sup> から、位置、速度誤差  $e_p, \dot{e}_p$  は 0 に収束する。□

次に、力の追従誤差に関して以下の補題が成り立つ。

**補題 4.** (力追従) 閉ループ系 (10)(11)(13)(14) と仮定 1-3 を考える。このとき、力の追従誤差  $F_{op} - F_{env}(t + T_m(t))$  は次式を満たす。

$$F_{op} - F_{env}(t + T_m(t)) = (\hat{F}_{env}(t + T_m(t)) - F_{env}(t + T_m(t))) + K_f^{-1} M_m \ddot{x}_m + K_f^{-1} B \dot{x}_m \quad (39)$$

さらに、予測誤差の項 ( $\hat{F}_{env}(t + T_m(t)) - F_{env}(t + T_m(t))$ ) は 0 に収束する。

*Proof.* (39) はマスタのダイナミクスを変形することで得られる。1 項目の力予測誤差の項については以下のように 0 に収束する項で構成される。

$$\begin{aligned} & \hat{F}_{env}(t + T_m(t)) - F_{env}(t + T_m(t)) \\ &= B_{env} \underbrace{\dot{e}_p}_{\rightarrow 0} + K_{env} \underbrace{e_p}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\tilde{B}_{env}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\dot{x}_m(t)}_{\text{bounded}} \\ & \quad + \underbrace{\tilde{K}_{env}}_{\rightarrow 0} \underbrace{x_m(t)}_{\text{bounded}} + \underbrace{\tilde{C}}_{\rightarrow 0} \end{aligned}$$

ここで  $\tilde{K}_{env}, \tilde{B}_{env}, \tilde{C}$  の収束性には補題 1,  $x_m, \dot{x}_m$  の有界性には補題 2,  $e_p, \dot{e}_p$  の収束性には補題 3 を用いている。この式より、 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{F}_{env}(t + T_m(t)) - F_{env}(t + T_m(t)) = 0$  がいえる。□

以上の補題 1-4 から、制御目的の達成に関する以下の定理がいえる。

**定理 1.** 提案制御則を適用したテレオペレーションシステム (10)(11)(13)(14) と仮定 1-3 を考える。このとき、制御目的の達成に関して以下が成り立つ。

- 1) マスタとスレーブの位置、速度は有界で制御目的 1 を達成。
- 2) 位置誤差は収束し、定常状態で制御目的 2 を達成。
- 3) 定常状態における力誤差は以下のようになる。

$$F_{op} - F_{env}(t + T_m) = K_f^{-1} M_m \ddot{x}_m + K_f^{-1} B \dot{x}_m$$

従って、制御目的 2 が達成されるには  $\ddot{x}_m, \dot{x}_m = 0$  が必要であるが、 $K_f$  が大きい、または  $M_m, B$  が小さければ、良好な力追従を実現する。

*Proof.* 補題 1-4 から明らか。□

**注意 3.** 以上の定理 1 は、以下のように操縦者を LTI モデル<sup>9, 14, 20)</sup> と考えても同様に成り立つ。

$$F_{op} = -M_{op} \ddot{x}_m - B_{op} \dot{x}_m - K_{op} x_m + F_{op}^* \quad (40)$$

ここで、 $M_{op}, B_{op}, K_{op} \in \mathcal{R}$  は操縦者の特性を表す正のパラメータで、 $F_{op}^* \in \mathcal{R}$  は有界な筋力である。環境と接触していない状態 ( $K_{env} = 0, B_{env} = 0$ ) では  $A_m$  が安定行列とならないため、仮定 1 のみではマスタ状態の有界性が言えない。しかし、(40) のモデルを用いて解析すれば  $K_{env} = 0, B_{env} = 0$  でも定理 1 と同様の結果が得られる。



Fig. 2: Experimental setup

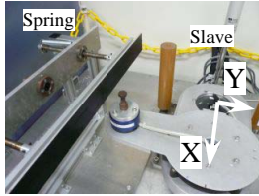


Fig. 3: Remote environment

## 5 実験検証

本節では、定理で示された位置・力追従性能を制御実験により検証する。制御実験は、Fig. 2 に示す 2 自由度ロボットアームで構成されるテレオペレーションシステムを用いて制御実験を行った。制御ボードとして DS1104(dSPACE 社製) を用いた。遠隔環境は Fig. 3 に示すようなバネ系を用いた。バネは  $y$  方向にのみ設置する。バネ係数の値は未知である。遅延については、 $T_m = T_s = 1[s]$  を制御ボードで仮想的に発生させた。環境と操縦者の力は、力覚センサから計測した。本稿では、1 自由度の線形システムを扱っているが、制御実験で用いるロボットは多自由度で、非線形システムである。そこで、文献<sup>13, 14)</sup>と同様に、適応インピーダンス制御<sup>23)</sup>による線形化・非干渉化を作業空間において行い  $x, y$  方向それぞれに対して独立にコントローラ的设计を行った。実験の際の具体的な制御入力、設計パラメータは付録に示してある。

実験結果を Fig. 4-10 に示す。この結果はロボットとバネが常に接触する状態で  $y$  方向にのみ動かした際の結果で、 $y$  方向のみのデータを示す。Fig. 4 は実験中の環境のパラメータ推定値を表し、約 12[s] からは推定された環境のパラメータがほぼ一定値となっていることがわかる。Fig. 5 は仮定 3 の妥当性を検証するために  $\lambda_{\min} \left\{ \int_0^t W_y W_y^T dt' \right\}$  を示したものである ( $W_y$  の定義は付録参照)。 $\lambda_{\min} \left\{ \int_0^t W_y W_y^T dt' \right\}$  は操作中に増加傾向にあるので、パラメータ推定値の真値への収束の条件である仮定 3 が満たされると考えられる。マスタとスレーブの位置・力データを Figs. 6, 8 に示す。また、それらの図のマスタのデータを  $T_m[s]$  シフトして表示した図を Figs. 7, 9 に示す。Figs. 6-9 から、パラメータ推定値がほぼ一定値となる 12[s] より以前は大きな位置誤差、力誤差が生じるが、12[s] より後は遅延したマスタの位置がスレーブの位置とほぼ一致しており、遅延した操縦者の力と環境の力が一致している。また、Fig. 10 は環境の力の予測値と真値の比較であり、12[s] より後は予測誤差が小さくなっている。一部で位置誤差、力誤差が生じているが、これは摩擦などの外乱やロボットや環境のモデル化されていないダイナミクスの影響であると考えられる。また、力誤差に関しては、慣性や粘性の影響もあると考えられる。

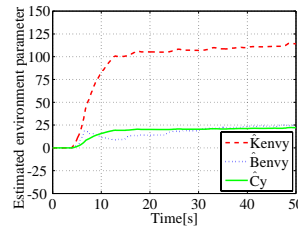


Fig. 4: Estimation of environment parameter

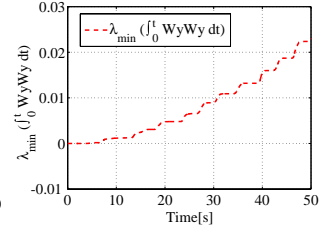


Fig. 5: Confirmation of persistently excitation

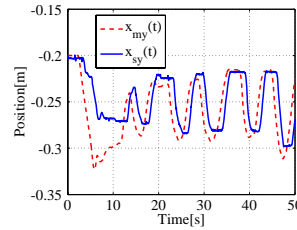


Fig. 6: Master and slave position

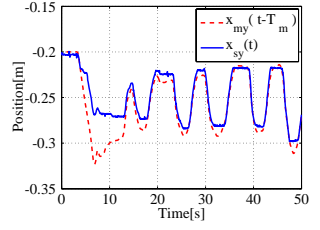


Fig. 7: Master and slave position (shifted)

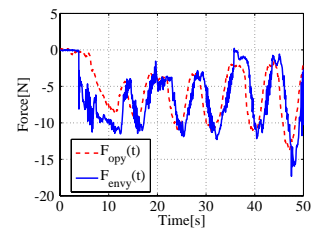


Fig. 8: Operator and environmental force

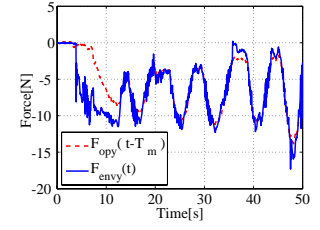


Fig. 9: Operator and environmental force (shifted)

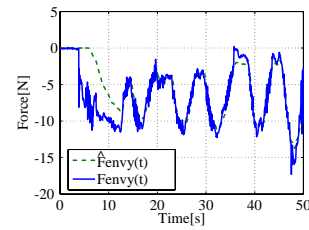


Fig. 10: Predicted and true values of environmental force

## 6 おわりに

本稿では、環境推定に基づく予測制御手法の枠組み<sup>16)</sup>における安定性、位置追従誤差の収束、小さな力誤差を理論的に保証した制御手法を提案することを目的とし、3ch architecture に環境推定に基づく力予測を組み合わせた制御則を提案した。環境推定に基づく予測制御手法の枠組みにおける従来研究では安定性や追従性能が解析されていなかったが、本研究は、システムが安定となること、位置誤差が零に収束することが理論的に保証されることが特徴であり、力の追従誤差もゲインの値によっては小さくなることも示した。最後に 2 自由度ロボット 2 台とバネ系の遠隔環境を用いた実験により有効性を検証した。今後の課題は、扱える環境のクラスを広げることである。

## 参考文献

- 1) R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time Delay," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, 1989.
- 2) P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- 3) G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 152-162, 1991.
- 4) N. Chopra and M. W. Spong, "Adaptive synchronization of bilateral teleoperators with time delay," *Advances in Telerobotics*, Springer, pp. 257-270, 2007.
- 5) N. Chopra, M. W. Spong, S. Hirche and M. Buss, "Bilateral teleoperation over the internet," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, pp. 155-160, 2003.
- 6) H. Kawada and T. Namerikawa, "Bilateral Control of Non-linear Teleoperation with Time Varying Communication Delays," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, pp. 189-194, 2008.
- 7) D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol.9, no.5, pp. 624-637, 1993.
- 8) I. Aliaga, A. Rubio and E. Sanchez, "Experimental quantitative comparison of different control architectures for master-slave teleoperation," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol.12, no.1, pp. 2-11, 2004.
- 9) K. Hashtrudi-Zaad, S. E. Salcudean, "Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol.18, no.1, pp. 108-114, 2002.
- 10) R. Kubo, N. Iiyama, K. Natori, K. Ohnishi, H. Furukawa, "Performance analysis of a three-channel control architecture for bilateral teleoperation with time delay," *IEEE Trans. IA*, vol. 127, no.12, pp. 1224-1230, 2007.
- 11) A. Aziminejad, M. Tavakoli, R. V. Patel and M. Moallem, "Transparent time-delayed bilateral teleoperation using wave variables," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 548-555, 2008.
- 12) Y. J. Pan, C. Canudas-de-Wit and O. Sename, "A new predictive approach for bilateral teleoperation with applications to drive-by-wire systems," *IEEE Trans. Robot.*, vol.10, no.6, pp. 1146-1162, 2006.
- 13) K. Yoshida, T. Namerikawa, "Predictive PD Control for Teleoperation with Communication Time Delay," in *Proc. 17th IFAC World Congr.*, pp. 12703-12708, 2008.
- 14) S. Sirouspour, A. Shahdi, "Model predictive control for transparent teleoperation under communication time delay," *IEEE Trans. Robot.*, vol.22, no.6, pp. 1131-1145, 2006.
- 15) H. Ching, W.J. Book, "Internet-based bilateral teleoperation based on wave variable with semi-adaptive predictor and direct drift control" *J. Dyn. Syst. Measure. Contr.*, vol. 128, pp. 86-93, 2006.
- 16) A. C. Smith and K. Hashtrudi-Zaad, "Adaptive teleoperation using neural network-based predictive control," in *Proc. Conf. Contr. Appl.*, pp. 1269-1274, 2005.
- 17) K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2, pp. 1369-1374, 1996.
- 18) J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice-Hall, 1991.
- 19) L. Biagotti and C. Melchiorri, "Environment estimation in teleoperation systems," *Advances in Telerobotics*, Springer, pp. 212-230, 2007.
- 20) Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling - formulation and experiment," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol.10, no.5, pp 605-619, 1994.
- 21) J. M. Azorin, R. Aracil, J. M. Sabater, C. Perez and N. M. Garcia, "Transparent bilateral control architecture by state convergence for telerobotics," in *Proc. 17th IFAC World Congr.*, pp. 12721-12726, 2008.
- 22) 井村順一, "システム制御のための安定論" コロナ社, 2000.
- 23) W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance control with adaptation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol.7, no.3, pp. 408-415, 1991.

## 付録 実験検証に用いたコントローラの詳細

制御実験では、適応インピーダンス制御による線形化<sup>13, 14, 23)</sup>を組み込んだ制御則を用いた。ここでは、その制御入力と設計パラメータを与える。実験に用いたロボットのダイナミクスは以下のように表わされる。

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = \tau_m + J_m^T F_{op} \quad (41)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s = \tau_s - J_s^T F_{env} \quad (42)$$

添え字の  $m, s$  はマスタとスレーブを表し、以下の議論の添え字  $i$  は  $i = m, s$  とする。  $q_i \in \mathcal{R}^2$  は関節角度、  $M_i \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$ 、  $C_i q_i \in \mathcal{R}^2$  は慣性行列と、遠心力・コリオリ力項を表す。  $J_i \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$  はヤコビアン、  $\tau_m, \tau_s \in \mathcal{R}^2$  は入力トルク、  $F_{op}, F_{env} \in \mathcal{R}^2$  は操縦者および環境の力を表す。 (41)(42) の左辺はパラメータの線形性から  $M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i = Y_i(\ddot{q}_i, \dot{q}_i, q_i)\theta_i$  と書ける。ここで  $Y_i \in \mathcal{R}^{2 \times 3}$  はリグレッサ、  $\theta_i \in \mathcal{R}^3$  はロボットダイナミクスのパラメータベクトルである。実験で用いた制御入力は以下のように表される。

$$\tau_m = Y_m(\ddot{q}_{rm}, \dot{q}_{rm}, q_{rm})\hat{\theta}_m - K_m s_m - J_m^T F_{op}$$

$$\tau_s = Y_s(\ddot{q}_{rs}, \dot{q}_{rs}, q_s)\hat{\theta}_s - K_s s_s + J_s^T F_{env}$$

$$\dot{\hat{\theta}}_i = -\Gamma_i^{-1} Y_i(\ddot{q}_{ri}, \dot{q}_{ri}, q_i) s_i,$$

$$\dot{q}_{ri} = J_i^{-1} \{\dot{x}_{id} - \Lambda_i(x_i - x_{id})\}, s_i = \dot{q}_i - \dot{q}_{ri}$$

$x_i = [x_{ix}, x_{iy}]^T$  は  $x, y$  平面における手先位置を表す。  $x_{id}, \dot{x}_{id}, \ddot{x}_{id}$  は目標とする線形ダイナミクスの応答を表し、次式による  $\ddot{x}_{md}, \ddot{x}_{sd}$  の計算とその積分で求める。

$$\bar{M}_m \ddot{x}_{md} = F_m + F_{op}, \bar{M}_s \ddot{x}_{sd} = F_s - F_{env} \quad (43)$$

ここで、  $F_m, F_s$  は以下のように与えた。

$$F_m = (K_f - I)F_{op} - K_f \hat{F}_{env}(t + T_m) - Bx_{md} \quad (44)$$

$$F_s = F_{env} + \rho \{K_p(x_{md}(t - T_m) - x_{sd}) + K_d(\dot{x}_{md}(t - T_m) - \dot{x}_{sd}) + K_f(F_{op}(t - T_m) - F_{env}) - Bx_{sd}\}$$

$$\hat{F}_{env}(t + T_m) = \hat{B}_{env}(t - T_s)\dot{x}_{md} + \hat{K}_{env}(t - T_s)x_{md} + \hat{C}(t - T_s) \quad (46)$$

なお、推定値  $\hat{B}_{env} = \text{diag}\{\hat{B}_{envx}, \hat{B}_{envy}\}$ 、  $\hat{K}_{env} = \text{diag}\{\hat{K}_{envx}, \hat{K}_{envy}\}$ 、  $\hat{C} = \text{diag}\{\hat{C}_x, \hat{C}_y\}$  の計算には次式を用いた。

$$\dot{\hat{\theta}}_{envk} = -P_k W_k \{W_k^T \hat{\theta}_{envk} - F_{envk}\} \quad (47)$$

$$\frac{d}{dt} P_k^{-1} = W_k W_k^T, P_k(0) = p_0 I$$

$$\hat{\theta}_{envk} = [\hat{K}_{envk} \hat{B}_{envk} \hat{C}_k]^T$$

$$W_k = [x_{sk} \ \dot{x}_{sk} \ 1]^T, \quad (k = x, y) \quad (48)$$

これらの式において、  $\bar{M}_i, K_i, \Lambda_i, \Gamma_i, \rho, K_f, K_p, K_d$  は設計パラメータで以下のように設定した。

$$\bar{M}_i = \text{diag}\{0.7, 0.7\}, B = \text{diag}\{2, 2\}, K_i = \text{diag}\{10, 10\}$$

$$\Lambda_i = \text{diag}\{3, 3\}, \Gamma_i = \text{diag}\{0.1, 0.1, 0.1\}, \rho = I, p_0 = 100,$$

$$K_f = \text{diag}\{0.2, 0.2\}, K_p = \text{diag}\{40, 40\}, K_d = \text{diag}\{15, 15\}$$

以上の制御則を用いた際、  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i - x_{id}, \dot{x}_i - \dot{x}_{id} \rightarrow 0$  がいえる<sup>14, 18, 23)</sup>。従って、(43)(44)(45)の応答  $x_{md}, x_{sd}$  に追従するため、マスタとスレーブは線形システムのように振舞う。この事実とダイナミクス(43)(44)(45)(47)、仮定1-3を考えると、定理1と似た議論が成り立つ。