

# 通信遅延を有するテレオペレーションの予測型 PD 制御

Predictive PD Control for Teleoperation with Communication Time Delay

吉田 航瑛 (金沢大学)

滑川 徹 (金沢大学)

Kouei YOSHIDA, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, JAPAN

Toru NAMERIKAWA, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa, JAPAN

This paper deals with a predictive control for teleoperation with time varying delay. The proposed method is a combination of the PD control based on predictors and the adaptive impedance control. These predictors are used to simultaneously estimate the master and slave dynamics, and thereby avoid the use of the delayed information. Thus, the performance degradation due to communication time delay can be alleviated. The proposed method do not require the environmental model and can treat a nonlinear multi-DOF teleoperation system with model parameter uncertainties. Using the Lyapunov stability method, it is proven that the proposed control structure is uniform ultimate stable even in the presense of time varying delay. Experimental results show the effectiveness of proposed teleoperation.

**Key Words:** Bilateral Teleoperation, Predictive PD Control, Multivariable System, Time Varying Delay, Model Parameter Uncertainty, Adaptive Impedance Control

## 1. はじめに

テレオペレーションと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様々な研究がなされている。テレオペレーションでは、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>ため、通信遅延に対する安定性を保証しつつ性能を改善する制御手法を適用する必要がある。また、インターネットを通信路とした場合などを想定すると、時変の通信遅延を扱う必要がある。

時変の通信遅延を有するテレオペレーションに対しては、スキャタリング変換を拡張した手法<sup>(2)</sup>が提案されているが、この手法は位置誤差の収束性、力の伝達に関して不十分な点がある。また、文献<sup>(3)</sup>では、時変の通信に対する漸近安定性と反力の伝達を保証した PD 制御則を提案している。この制御則では、通信遅延の最大値とその変化率の最大値の情報のみパラメータ決定のために必要であるが、アームのモデルや遅延の時間変化は既知である必要がない。ただし、これらの手法は遅延した信号をそのまま用いて制御されるために、遅延の影響で操作性や性能が劣化する。一方、文献<sup>(4)</sup>では予測器を導入したインピーダンス制御則を提案しており、時変の通信遅延に対する安定性、遅延による性能の劣化の減少を示している。ただし、マスタとスレーブとして 1 自由度の線形系しか扱っておらず、制御則に環境のモデルが必要であり、アームの不確かさを陽に考慮していない。通常、多自由度のロボットアームは非線形システムである。また、環境のモデルは未知である。さらに、実システムではモデルのパラメータの不確かさが存在するので、この影響を考える必要がある。

本稿では多自由度ロボットアームのテレオペレーションシステムに対して遅延の影響を減少させるための予測型 PD 制御則を提案する。提案手法は、適応インピーダンス制御<sup>(5)</sup>を用いたインピーダンス整形と文献<sup>(4)</sup>の予測器から出力される予測値に基づいた PD 制御則を組み合わせた手法である。この手法は、<sup>(4)</sup>と異なり環境のモデルが制御則に必要なく、非線形の多自由度アームに対して適用可能で、パラメータの不確かさが予測偏差に影響しないという利点がある。また、予測器のない PD 制御則<sup>(3)</sup>と異

なり、target system の応答に近づけることにより遅延の影響を減少させることが期待できる。リアプノフ法により、時変の通信遅延が存在する際にも、閉ループ系が安定であることを示す。さらに 2 台の 2 自由度アームを用いた実験を行い、有効性を示す。

## 2. 問題設定

### 2.1 制御対象のダイナミクス

一般的な  $n$  自由度ロボットのダイナミクスからマスタ及びスレーブは次のような非線形方程式で与えられる。

$$\begin{cases} M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = \tau_m + \tau_{op} \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s = \tau_s - \tau_{env} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、添え字  $m$  はマスタ、 $s$  はスレーブを表しており、 $q_m, q_s \in R^{n \times 1}$  は関節角度、 $\tau_m, \tau_s \in R^{n \times 1}$  は入力トルク、 $\tau_{op} \in R^{n \times 1}$  は操縦者からマスタロボットへ加えるトルク、 $\tau_{env} \in R^{n \times 1}$  は環境からの反力トルク、 $M_m(q_m), M_s(q_s) \in R^{n \times n}$  は慣性行列、 $C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m, C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s \in R^{n \times 1}$  はコリオリ力及び遠心力である。ロボットのダイナミクスの特性から、慣性項とコリオリ力・遠心力項は次のようにリグレッサ  $Y_m, Y_s \in R^{n \times m}$  とパラメータベクトル  $\theta_m, \theta_s \in R^{m \times 1}$  の積で表すことができる<sup>(6)</sup>。

$$\begin{cases} M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = Y_m(\ddot{q}_m, \dot{q}_m, q_m)\theta_m \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s = Y_s(\ddot{q}_s, \dot{q}_s, q_s)\theta_s \end{cases} \quad (2)$$

また、マスタとスレーブを結合する通信路で生じる遅延は次の仮定を満たすとする。

仮定 1 通信遅延  $T(t)$  は時変である。また、マスタからスレーブへの遅延とスレーブからマスタへの遅延は等しい ( 双方向の情報通信を同じ通信路で行う場合を想定する )。さらに、通信遅延とその微分は、次のように有界性を満たす。

$$0 \leq T(t) \leq T^* < \infty \quad (3)$$

$$|\dot{T}(t)| \leq T^+ < 1 \quad (4)$$

ここで、 $T^* \in R > 0$  は通信遅延の最大値、 $T^+ \in R > 0$  は通信遅延の変化率の最大値である。

仮定 2 通信遅延  $T(t)$  は計測可能である。

仮定 2 は, 仮定 1 が成り立つときに, マスタとスレーブの時刻を同期させ, タイムスタンプをデータにつけることにより成り立つ. さらに, 操縦者と環境が加える力に関して以下のような仮定をおく.

仮定 3  $\tau_{op}, \tau_{env}$  は有限逃避時間をもたない. つまり通信遅延時間の間の変化を考慮して次式が成り立つ.

$$|\tau_i(t - T(t)) - \tau_i(t)| < \rho_i \quad (i = op, env) \quad (5)$$

ここで  $\rho_i$  ( $i = op, env$ ) はある定数である. 操縦者や環境が非有界な変化をする力を与えることはないので妥当な仮定である.

## 2.2 制御目的

本稿の制御目的を以下のように設定する.

制御目的: マスタとスレーブの間の通信路に遅延が生じる場合にも, 次のような遅延のないダイナミクス (target system) を実現すること.

$$\begin{cases} \overline{M}_m \ddot{q}_m^r + \overline{B}_m \dot{q}_m^r = K_p \{q_s^r - q_m^r\} + K_d \{\dot{q}_s^r - \dot{q}_m^r\} + \tau_{op} \\ \overline{M}_s \ddot{q}_s^r + \overline{B}_s \dot{q}_s^r = K_p \{q_m^r - q_s^r\} + K_d \{\dot{q}_m^r - \dot{q}_s^r\} - \tau_{env} \end{cases} \quad (6)$$

ここで,  $q_m^r, q_s^r \in R^n$  は target system の応答を表している. また,  $\overline{M}_m, \overline{M}_s, \overline{B}_m, \overline{B}_s \in R^{n \times n}$  は望みの慣性と粘性を表す正定行列,  $K_p, K_d \in R^{n \times n}$  は正定な P ゲイン, D ゲインを表す. この target system(6) は望みの慣性と粘性を有するようにインピーダンス整形されたマスタ, スレーブが遅延なく PD 制御されときのダイナミクスである. この target system(6) の応答に関して, 位置誤差の収束と反力の伝達を表す補題が成り立つ.

補題 1 target system の応答に関して以下が成り立つ

1) (位置誤差の収束)  $\tau_{env} = \tau_{op} = 0$  を仮定する. このとき, 以下が成り立つ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_m^r - q_s^r = 0 \quad (7)$$

2) (静的な反力伝達)  $\ddot{q}_m^r = \ddot{q}_s^r = \dot{q}_m^r = \dot{q}_s^r = 0$  を仮定する. このとき, 以下が成り立つ

$$\tau_{op} = \tau_{env} \quad (8)$$

proof: 1) は, リアプノフ関数候補  $V_t = \dot{q}_m^{rT} \overline{M}_m \dot{q}_m^r + \dot{q}_s^{rT} \overline{M}_s \dot{q}_s^r + (q_m^r - q_s^r)^T K_p (q_m^r - q_s^r)$  を用いることで証明できる. 2) については  $\ddot{q}_m^r = \ddot{q}_s^r = \dot{q}_m^r = \dot{q}_s^r = 0$  をダイナミクス(6) に代入することで,  $\tau_{op} = K_p \{q_m^r - q_s^r\} = \tau_{env}$  が得られる. □

位置誤差の収束と静的な反力の伝達は遅延した情報を用いた PD 制御則を適用しても達成される<sup>(7)</sup>. しかし, 遅延した情報を用いた PD 制御則では通信遅延時間が大きい場合に, 性能や操作性が劣化するという問題がある. 一方, この target system には遅延が含まれていないため, この制御目的を達成させることにより遅延による性能劣化が減少することが期待される.

## 3. 制御則

### 3.1 制御構造

提案する制御手法の構造を Fig. 1 に示す. Fig. 1 のように, それぞれのコントローラは予測器 (Predictor), トラジェクトリー生成部 (Reference trajectory generator), 受動性に基づく適応

制御則 (Passivity-based adaptive control) の 3 つの要素で成り立っている.

トラジェクトリー生成部と受動性に基づく適応制御則の 2 つは適応インピーダンス制御の考え方に基いてインピーダンス整形と PD 制御を行っている. また, 予測器は遅延した情報の使用を避けるためにマスタ, スレーブのそれぞれの状態をスレーブ, マスタ側で予測する.

### 3.2 インピーダンス整形と予測型 PD 制御

適応インピーダンス制御とは, アームに加わる力情報などから望みのダイナミクスの応答を計算し, その計算された応答を目標値として適応制御則を行うことにより, 望みの慣性や粘性を有するシステムの応答を実現する手法である<sup>(5)</sup>. まずトラジェクトリー生成部で, 次式を満たす  $q_{id}, \dot{q}_{id}, \ddot{q}_{id}$  ( $i = m, s$ ) を計算する.

$$\begin{cases} \overline{M}_m \ddot{q}_{md} + \overline{B}_m \dot{q}_{md} = K_p \{\dot{q}_{sd} - \dot{q}_{md}\} + K_d \{\ddot{q}_{sd} - \ddot{q}_{md}\} + \tau_{op} \\ \overline{M}_s \ddot{q}_{sd} + \overline{B}_s \dot{q}_{sd} = K_p \{\dot{q}_{md} - \dot{q}_{sd}\} + K_d \{\ddot{q}_{md} - \ddot{q}_{sd}\} - \tau_{env} \end{cases} \quad (9)$$

ここで,  $\dot{q}_{md}, \dot{q}_{sd}, \ddot{q}_{md}, \ddot{q}_{sd}$  は  $\dot{q}_{md}, \dot{q}_{sd}, q_{md}, q_{sd}$  の予測値であり, 後述の予測器から得られる. このダイナミクス(9) は望みの慣性, 粘性を有するようにインピーダンス整形され, 予測型 PD 制御を適用されたダイナミクスとなっている.

次に, (9) から計算された  $q_{id}, \dot{q}_{id}, \ddot{q}_{id}$  ( $i = m, s$ ) を目標値として, 受動性に基づく適応制御則に従いマスタとスレーブに入力トルクを与える. その入力トルクは, 次のような追従誤差  $e_m, e_s$ , 補助変数  $q_{mr}, q_{sr}, r_m, r_s$  の定義

$$\begin{cases} e_m = q_m - q_{md} \\ e_s = q_s - q_{sd} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{q}_{mr} = \dot{q}_{md} - \Lambda_m e_m \\ \dot{q}_{sr} = \dot{q}_{sd} - \Lambda_s e_s \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} r_m = \dot{e}_m + \Lambda_m e_m \\ r_s = \dot{e}_s + \Lambda_s e_s \end{cases} \quad (12)$$

を用いて次式で与えられる.

$$\begin{cases} \tau_m = -\tau_{op} + Y_m(\ddot{q}_{mr}, \dot{q}_m, \dot{q}_{mr}, q_m) \overline{\theta}_m - K_m r_m \\ \tau_s = \tau_{env} + Y_s(\ddot{q}_{sr}, \dot{q}_s, \dot{q}_{sr}, q_s) \overline{\theta}_s - K_s r_s \end{cases} \quad (13)$$

ここで,  $K_m, K_s, \Lambda_m, \Lambda_s \in R^{n \times n}$  は正定対角な設計パラメータである.  $\overline{\theta} \in R^{m \times 1}$  はパラメータ推定値であり次のようなパラメータ適応則(14)に従い更新する.

$$\begin{cases} \dot{\overline{\theta}}_m = -\Gamma_m Y_m^T(\ddot{q}_{mr}, \dot{q}_m, \dot{q}_{mr}, q_m) r_m \\ \dot{\overline{\theta}}_s = -\Gamma_s Y_s^T(\ddot{q}_{sr}, \dot{q}_s, \dot{q}_{sr}, q_s) r_s \end{cases} \quad (14)$$

ここで,  $\Gamma_m, \Gamma_s \in R^{m \times m}$  は正定な設計パラメータである. 制御則(13)を(1)に代入してまとめると閉ループ系は次のようになる.

$$\begin{cases} M_m(q_m) \dot{r}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m) r_m + K_m r_m \\ = Y_m(\ddot{q}_{mr}, \dot{q}_m, \dot{q}_{mr}, q_m) \overline{\theta}_m \\ M_s(q_s) \dot{r}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s) r_s + K_s r_s \\ = Y_s(\ddot{q}_{sr}, \dot{q}_s, \dot{q}_{sr}, q_s) \overline{\theta}_s \end{cases} \quad (15)$$

$\tilde{\theta} = \overline{\theta} - \theta$  はパラメータの推定誤差である. この制御則はパラメータの不確かさの存在に関わらず位置誤差の収束を示すことが可能である<sup>(8)</sup>. このことは次の定理によって示される.

定理 1 制御対象(1)に制御則(13)(14)を適用したシステム(15)を考える. ここで,  $q_{id}, \dot{q}_{id}, \ddot{q}_{id}$  ( $i = m, s$ ) は有界であるとする. このとき追従誤差  $e_i = q_i - q_{id}$  ( $i = m, s$ ) に関して

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_m, \dot{e}_m, e_s, \dot{e}_s = 0 \quad (16)$$

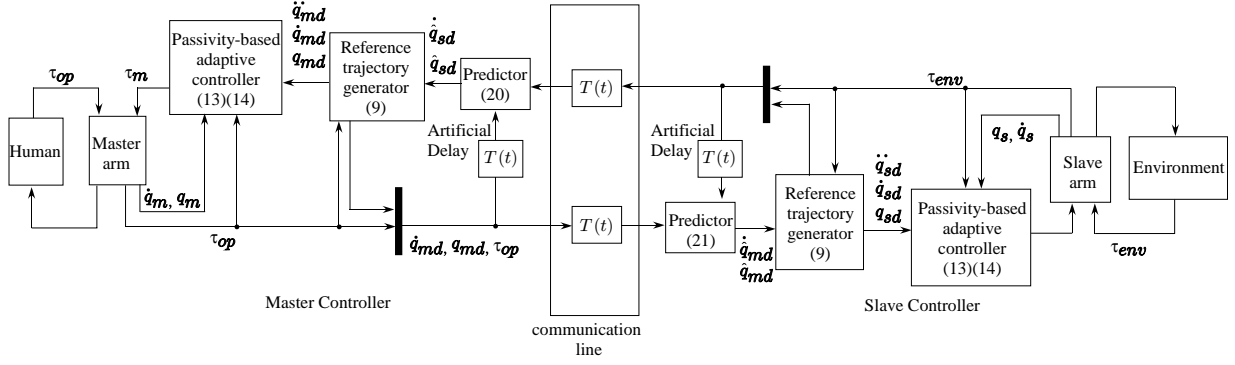


Fig. 1 Control structure

が成り立つ。すなわちダイナミクス (9) の応答にパラメータの不確かさの存在に関わらず収束する。

*proof*: リアプノフ関数候補

$$V_i = \frac{1}{2} r_i^T M_i r_i + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i \quad (i = m, s) \quad (17)$$

を考える。この時間微分は次のように整理出来る。

$$\dot{V}_i = -r_i^T K_i r_i \quad (i = m, s) \quad (18)$$

(18) は準負定であり、(18) から  $r_m, r_s \in L_2 \cap L_\infty$ ,  $\dot{r}_m, \dot{r}_s \in L_\infty$  であることは簡単に示せる。このことから、 $\lim_{t \rightarrow \infty} r_m, r_s = 0$  である。さらに、 $r_m, r_s$  から、 $e_m, e_s$  への伝達関数行列は厳密にプロパーで指数安定であることから  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_m, e_s = 0$  が言え、このことと  $\lim_{t \rightarrow \infty} r_m, r_s = 0$  から  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_m, \dot{e}_s = 0$  が成り立つ。□

以上のように、マスタとスレーブは  $q_{md}, q_{sd}, \dot{q}_{md}, \dot{q}_{sd}$  に追従し、その追従誤差は漸近的に収束することが保証される。ここで、予測値  $\hat{q}_{md}, \hat{q}_{sd}, \hat{q}_{md}, \hat{q}_{sd}$  が実際の値  $\dot{q}_{md}, \dot{q}_{sd}, q_{md}, q_{sd}$  と等しければ  $q_{md}, q_{sd}$  は target system の応答と等しくなるため、予測を適切に行うことにより target system の応答に近い応答にマスタとスレーブを追従させることができる。

### 3.3 予測器の設計

ここでは、マスタ側で  $\dot{q}_{sd}, q_{sd}$  を、スレーブ側で  $\dot{q}_{md}, q_{md}$  を予測する予測器を設計する。まず予測器の設計のために (9) を状態空間表現する。状態を

$$z_{md} = \begin{bmatrix} q_{md} \\ \dot{q}_{md} \end{bmatrix}, z_{sd} = \begin{bmatrix} q_{sd} \\ \dot{q}_{sd} \end{bmatrix}$$

のように定義し、(9) を状態空間表現すると次式が得られる。

$$\begin{cases} \dot{z}_{md} = A_m z_{md} + B_{m1} \tau_{op} + B_{m2} \dot{z}_{sd} \\ \dot{z}_{sd} = A_s z_{sd} + B_{s1} \tau_{env} + B_{s2} \dot{z}_{md} \end{cases} \quad (19)$$

ここで、各ベクトル、行列は次のように定義している。

$$\hat{z}_{md} = \begin{bmatrix} \hat{q}_{md} \\ \hat{\dot{q}}_{md} \end{bmatrix}, \hat{z}_{sd} = \begin{bmatrix} \hat{q}_{sd} \\ \hat{\dot{q}}_{sd} \end{bmatrix}$$

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\overline{M}_m^{-1} K_p & -\overline{M}_m^{-1} (\overline{B}_m + K_d) \end{bmatrix}$$

$$B_{m1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{M}_m^{-1} \end{bmatrix}, B_{m2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \overline{M}_m^{-1} K_p & \overline{M}_m^{-1} K_d \end{bmatrix}$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\overline{M}_s^{-1} K_p & -\overline{M}_s^{-1} (\overline{B}_s + K_d) \end{bmatrix}$$

$$B_{s1} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\overline{M}_s^{-1} \end{bmatrix}, B_{s2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \overline{M}_s^{-1} K_p & \overline{M}_s^{-1} K_d \end{bmatrix}$$

ここで、 $I$  は単位行列を表す。この  $A_m, A_s$  は予測偏差の有界性をいうために安定行列となるようにパラメータを設計する必要がある。この状態方程式 (19) を基に文献<sup>(4)</sup>と同様の形で設計した予測器は以下ようになる。

#### • Master 側の予測器

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_{md} = A_m \hat{z}_{md} + B_{m1} \tau_{op}(t - \overline{T}(t)) + B_{m2} \hat{z}_{sd} \\ \quad + E_m \{ \hat{z}_{md}(t - \overline{T}(t)) - z_{md}(t - \overline{T}(t)) \} \\ \dot{\hat{z}}_{sd} = A_s \hat{z}_{sd} + B_{s1} \tau_{env}(t - T(t)) + B_{s2} \hat{z}_{md} \\ \quad + E_s \{ \hat{z}_{sd}(t - \overline{T}(t)) - z_{sd}(t - T(t)) \} \end{cases} \quad (20)$$

#### • Slave 側の予測器

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_{md} = A_m \hat{z}_{md} + B_{m1} \tau_{op}(t - T(t)) + B_{m2} \hat{z}_{sd} \\ \quad + E_m \{ \hat{z}_{md}(t - \overline{T}(t)) - z_{md}(t - T(t)) \} \\ \dot{\hat{z}}_{sd} = A_s \hat{z}_{sd} + B_{s1} \tau_{env}(t - \overline{T}(t)) + B_{s2} \hat{z}_{md} \\ \quad + E_s \{ \hat{z}_{sd}(t - \overline{T}(t)) - z_{sd}(t - \overline{T}(t)) \} \end{cases} \quad (21)$$

ここで、 $E_m, E_s \in R^{2n \times 2n}$  は予測偏差の遅延フィードバックゲインである。(20)(21)において、 $(t - T(t))$  は通信路によって遅延した信号を表しており、 $(t - \overline{T}(t))$  は人工的に遅延させた信号を表している。ここで、人工的な遅延時間  $\overline{T}(t)$  は仮定 2 のもとで  $\overline{T}(t) = T(t)$  を満たすように決定する。仮定 1,2 のもとで (20)(21) は同じダイナミクスを有し、両サイドでの予測値が等しくなる。人工的な遅延を生じさせているのはマスタ側とスレーブ側の予測値を等価にするためである。

次に予測値と実際の応答の偏差を考える。仮定 3 より (20) と (21) のダイナミクスが等価とした上で、(20) から (19) を引き、次のような予測偏差ベクトルの定義

$$\tilde{z}_d = \begin{bmatrix} \hat{z}_{md} - z_{md} \\ \hat{z}_{sd} - z_{sd} \end{bmatrix} \quad (22)$$

を用いると次のような予測偏差のダイナミクスが得られる。

$$\dot{\tilde{z}}_d = A \tilde{z}_d + E \tilde{z}_d(t - T) + d(t) \quad (23)$$

ただし,

$$A = \begin{bmatrix} A_m & 0 \\ 0 & A_s \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} E_m & 0 \\ 0 & E_s \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$d = \begin{bmatrix} B_{m1}(\tau_{op}(t - T(t)) - \tau_{op}(t)) \\ B_{s1}(\tau_{env}(t - T(t)) - \tau_{env}(t)) \end{bmatrix}$$

としている. このように予測偏差のダイナミクスにおいて力の変化  $d(t)$  が予測偏差を引き起こす外乱に相当する. 仮定 3 が成り立つとき, (23) のダイナミクスの外乱項  $d$  について次の補題 2 がいえる.

補題 2 仮定 3 が成り立つとき, 外乱項は有界,  $d \in L_\infty$  となる.

$d$  が有界で,  $A$  が安定行列であることから,  $E = 0$  の場合でも (23) は安定である.  $E \neq 0$  のときの安定性と外乱  $d(t)$  から予測偏差  $\tilde{z}_d(t)$  への  $L_2$  ゲインに関して, 次の定理が成り立つ<sup>(4)</sup>.

定理 2 <sup>(4)</sup> 仮定 1,3 が成り立つとする.  $A + E$  が安定で,  $\gamma_p > 0$  を与えたとき次の条件を満たす  $P = P^T > 0, r_1 > 0, r_2 > 0$  が存在するとする.

$$\mathcal{L}_1 = \begin{bmatrix} \Xi & PE & PE & PE & P \\ E^T P & \psi_1 & 0 & 0 & 0 \\ E^T P & 0 & \psi_1 & 0 & 0 \\ E^T P & 0 & 0 & -\gamma^2 T^{*-1} & 0 \\ P & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

ただし,

$$\Xi = (A + E)^T P + P(A + E) + T^* r_1 A^T A + ((T^*)/(1 - T^+) + T^*) r_2 E^T E \quad (26)$$

$$\psi_1 = -r_1(1 - T^+)T^{*-1}I \quad (27)$$

$$\psi_2 = -r_2(1 - T^+)^2 T^{*-1}I \quad (28)$$

このとき, (23) は安定で, 次式が成り立つ.

$$\int_0^\infty \|\tilde{z}_d\|^2 dt \leq \gamma_p^2(1 + T^*) \int_0^\infty \|d\|^2 dt + \beta_p \quad (29)$$

さらに, 次式を満たす定数  $\rho_p$  が存在する.

$$\|\tilde{z}_d\| \leq \rho_p \quad (30)$$

この定理より  $E \neq 0$  のときの  $L_2$  ゲイン解析ができる.  $E$  を適切に設計すれば,  $\gamma_p$  を小さくでき, 外乱  $d(t)$  から予測偏差  $\tilde{z}_d$  までの  $L_2$  ゲインを  $E = 0$  の場合より, 小さく見積もることができることを<sup>(4)</sup>は示している. 本稿でも<sup>(4)</sup>と同様の手順で  $E$  を設計する.

定理 2 から予測偏差は  $d(t) = 0$  ならば零に収束する. もし  $d(t) \neq 0$  の際には収束しないが,  $\tilde{z}_d$  の  $L_2$  ノルムは  $E$  の適切な設計により減少させることができる.

注意 1 もし, 遅延が対称ではない場合は, 予測器 (20)(21) の遅延  $T(t), \bar{T}(t)$  が最大通信遅延  $T^*$  となるように人工的に遅らせればよい. これにより, 最大値のみ既知の場合にも同様の議論ができる.

#### 4. 安定性解析

ここでは, 提案するテレオペレーションシステムの応答と target system の応答の偏差が有界で, 閉ループ系は時変の通信遅延の存在する際にも安定であることを示す. まず, 安定性解析

を容易にするために, (6) と (9) を状態空間表現する. まず (6) の状態空間表現は以下ようになる.

$$\dot{X}_r = A_e X_r + B_e \tau \quad (31)$$

ここで,

$$X_r = \begin{bmatrix} \dot{q}_m^r \\ \dot{q}_s^r \\ q_m^r - q_s^r \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_{op} \\ -\tau_{env} \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} \bar{M}_m^{-1} & 0 \\ 0 & \bar{M}_s^{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_e = \begin{bmatrix} -\bar{M}_m^{-1} \bar{B}_m - \bar{M}_m^{-1} K_d & \bar{M}_m^{-1} K_d & -\bar{M}_m^{-1} K_p \\ \bar{M}_s^{-1} K_d & -\bar{M}_s^{-1} \bar{B}_s - \bar{M}_s^{-1} K_d & \bar{M}_s^{-1} K_p \\ I & -I & 0 \end{bmatrix}$$

である. 定義している状態は補題 1 より  $\tau_{op}, \tau_{env} = 0$  の際に 0 に収束する変数であるので,  $A_e$  は安定行列となると考えられる. さらに, ダイナミクス (9) を次のように状態空間表現する.

$$\dot{X}_d = A_e X_d + B_e \tau + D_e \tilde{z}_d \quad (32)$$

ただし,

$$X_d = \begin{bmatrix} \dot{q}_{md} \\ \dot{q}_{sd} \\ q_{md} - q_{sd} \end{bmatrix}, D_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{M}_m^{-1} K_p & \bar{M}_m^{-1} K_d \\ \bar{M}_s^{-1} K_p & \bar{M}_m^{-1} K_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

である. また,  $\tilde{X}_d = X_d - X_r$  のように  $\tilde{X}_d$  を定義し, (32) から (31) を引くと次のような  $\tilde{X}_d$  のダイナミクスが得られる.

$$\dot{\tilde{X}}_d = A_e \tilde{X}_d + D_e \tilde{z}_d \quad (33)$$

制御目的は target system の応答に追従することであるので, target system の状態とマスタとスレーブの状態の偏差を次のように定義する.

$$X = \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_s \\ q_m - q_s \end{bmatrix} \quad (34)$$

ここで,  $X$  はマスタとスレーブの状態で次のように定義される.

$$\tilde{X} = X - X^r \quad (35)$$

$\tilde{X}$  が有界であればシステムが安定で,  $\|\tilde{X}\|$  が小さいほど理想的である.

システムの安定性, target system の応答と実際の応答の偏差に関して次の定理 3 が成り立つ.

定理 3 提案制御則を適用したテレオペレーションシステムの応答と target system の応答の偏差 (35) を考える.  $A_e$  が安定行列であるとき,  $\tilde{X}$  のノルムは一様有界で, 次の集合  $B_r$  内に含まれる.

$$B_r = \left\{ \tilde{X} : \|\tilde{X}\| \leq \gamma_s \rho_p \sqrt{\frac{\lambda_{\max} P}{\lambda_{\min} P}} \right\} \quad (36)$$

ここで,  $\lambda_{\max} P, \lambda_{\min} P$  はそれぞれ  $P$  の最大, 最小固有値で,  $P \in R^{3n \times 3n}, P = P^T > 0$  は次の LMI に  $\gamma_s > 0$  を与えたときの解である.

$$\begin{bmatrix} A_e^T P + P A_e + I & P D_e \\ D_e^T P & -\gamma_s^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (37)$$

また,  $\rho_p > 0$  は定理 2 から得られる定数である.

proof: まず,  $\|\tilde{X}\|$  について考えると, ノルムの性質より次式が成り立つ.

$$\|\tilde{X}\| = \|X - X_d + X_d - X_r\| \leq \|X - X_d\| + \|\tilde{X}_d\| \quad (38)$$

右辺の 1 項目  $\|X - X_d\|$  は次のように  $e_m, \dot{e}_m, e_s, \dot{e}_s$  から構成される.

$$\|X - X_d\| = \sqrt{\|\dot{e}_m\|^2 + \|\dot{e}_s\|^2 + \|e_m - e_s\|^2} \quad (39)$$

定理 1 より,  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_m, \dot{e}_m, e_s, \dot{e}_s = 0$  であることから次式が成り立つ.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X - X_d\| = 0 \quad (40)$$

次に, (38) の右辺 2 項目  $\|\tilde{X}_d\|$  について考える. 次のようなリアプノフ関数候補を考える.

$$V = \tilde{X}_d^T P \tilde{X}_d \quad (41)$$

ここでダイナミクス (33) の解軌道に沿って  $V$  を微分すると以下のようになる.

$$\dot{V} = \tilde{X}_d^T (A_e P + P A_e + \gamma_s^{-2} P D_e D_e^T P + I) \tilde{X}_d - \tilde{X}_d^T \tilde{X}_d + \gamma_s^2 z_d^T z_d$$

ここで, (37) を満たす場合は  $A_e P + P A_e + \gamma_s^{-2} P D_e D_e^T P + I < 0$  を満たすことと, (30) の関係式を用いて,

$$\dot{V} \leq -\tilde{X}_d^T \tilde{X}_d + \gamma_s^2 z_d^T z_d \leq -\|\tilde{X}_d\|^2 + \gamma_s^2 \rho_p^2$$

となる. このことから, 次式が成り立つことは容易に示せる.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{X}_d\| \leq \gamma_s \rho_p \sqrt{\frac{\lambda_{\max} P}{\lambda_{\min} P}} \quad (42)$$

以上の (40)(42) から次式が得られる.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{X}\| \leq \gamma_s \rho_p \sqrt{\frac{\lambda_{\max} P}{\lambda_{\min} P}} \quad (43)$$

このことから定理 3 が証明される.  $\square$

注意 2 定理 3 から, 定常状態における target system との偏差  $\|\tilde{X}\|$  の上限は予測偏差の上限  $\rho_p$  に依存する. 予測偏差の上限  $\rho_p$  に依存する点は従来法<sup>(4)</sup>と同様であるが, 従来法ではモデルパラメータの不確かさが予測偏差のダイナミクスに影響を与える. 一方, 本手法では予測偏差のダイナミクスはモデルパラメータの不確かさとは独立である. このことから, 提案制御則はパラメータの不確かさの影響を受けない制御則であるといえる.

## 5. 実験結果

ここでは, 提案制御則によって遅延による追従の遅れを減少させることができ, target system の応答の特性である位置誤差の収束と静的な反力の伝達が達成されることを実験的に示す. Fig. 2 に示すような 2 台の DD アームを用いて実験を行った.

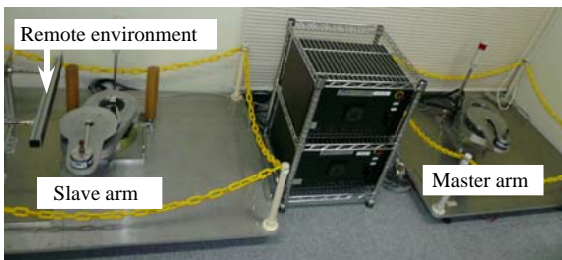


Fig. 2 Experimental setup

操縦者が加える力  $\tau_{op}$ , 環境へ加える力  $\tau_{env}$  は力覚センサで計測した手先に加わる力とヤコビアンからトルクを計算することで得た. ロボットの制御はサンプリング時間を 1[ms] として制御ボード (dSPACE 社製 DS1104) で行った. 通信遅延は  $T(t) = \bar{T}(t) = 0.25 + 0.1 \sin(t)[s]$  を制御ボード内で仮想的に発生させた. また, スレーブの接触実験を行うときに用いる環境は硬い壁 (Fig. 2 の Remote environment) とした.

コントローラ的设计パラメータは以下のように設定した.

$$\begin{aligned} \bar{M}_m = \bar{M}_s &= \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \bar{B}_m = \bar{B}_s = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \\ K_p &= \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, K_d = \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \\ \Gamma_m = \Gamma_s &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K_m = K_s = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix} \\ \Lambda_m = \Lambda_s &= \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (44)$$

予測器の遅延フィードバックゲイン  $E_m, E_s$  は<sup>(4)</sup>と同様の手順で設計し,

$$E_m = E_s = \begin{bmatrix} -0.3196 & 0 & 0.2615 & 0 \\ 0 & -0.3196 & 0 & 0.2615 \\ 0.2635 & 0 & -0.3031 & 0 \\ 0 & 0.2635 & 0 & -0.3031 \end{bmatrix}$$

とした. また, 以上のようにパラメータを選んだ場合, 行列  $A_m, A_s, A_e$  の固有値は負となる.

実験は次の 2 つの場合について実験を行う.

Case1: スレーブが環境と接触しない遠隔操作

Case2: スレーブが環境と接触する遠隔操作

ただし, Case1 については, 提案手法を適用した場合と, 予測値の代わりに遅延した情報を用いた場合 (つまり (9) の,  $\hat{q}_{md}, \hat{q}_{sd}, \dot{\hat{q}}_{md}, \dot{\hat{q}}_{sd}$  を  $q_{md}(t - T(t)), q_{sd}(t - T(t)), \dot{q}_{md}(t - T(t)), \dot{q}_{sd}(t - T(t))$  に置き換えた制御則) で比較を行う.

Case1 の実験結果を Figs. 5, 6 に示す. また, 予測器を用いない場合の Case1 の実験結果を Figs. 3, 4 に示す. Figs. 5, 3 は 1 軸の応答結果で, Figs. 6, 4 は 2 軸の応答結果である. それぞれの図において  $q_{m1}$  などの添え字の 1, 2 は 1 軸, 2 軸を表している. Figs. 3, 4 から, 予測器を用いない場合はスレーブの追従は通信遅延の影響で遅れるが, 提案法では, Fig. 5, 6 のように, 5-7[s], 10-18[s] で追従の遅れが減少していることがわかる. また, target system の特性である位置誤差の収束も達成している. 次に, Case2 の実験結果を, Figs. 7, 8 に示す. ここでは 2 軸のみの結果を示す. Fig. 7 は 2 軸の角度を表し, Fig. 8 は 2 軸に加わる操縦者のトルクと環境からの反力トルクを表す. 環境と接触している際に反力が適切に伝達されており, target system の特性である反力の伝達を達成している.

## 6. おわりに

本稿では通信遅延を有するロボットアームのテレオペレーションに対して遅延の影響を減少させるための予測型 PD 制御則を提案した. 文献<sup>(4)</sup>で提案されている予測型制御則と異なり, 提案手法では環境のモデルが制御則に不要で, 多自由度ロボットアームへ適用可能, モデルパラメータの不確かさの影響を受け

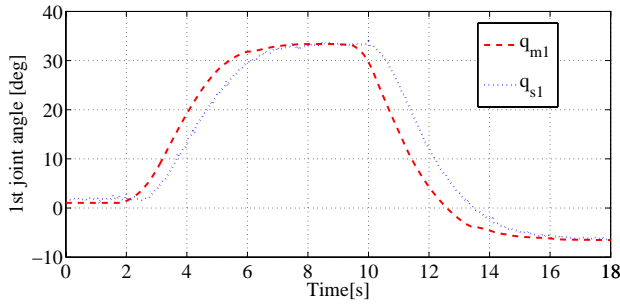


Fig. 3 Case1: 1st joint angle (without prediction)

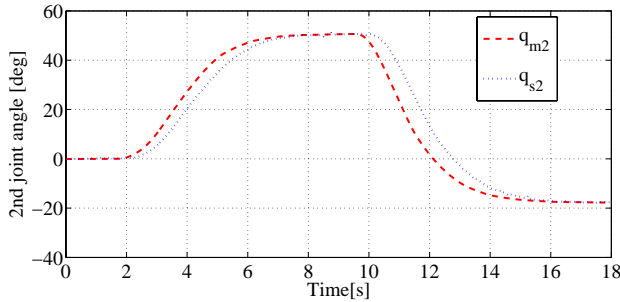


Fig. 4 Case1: 2nd joint angle (without prediction)

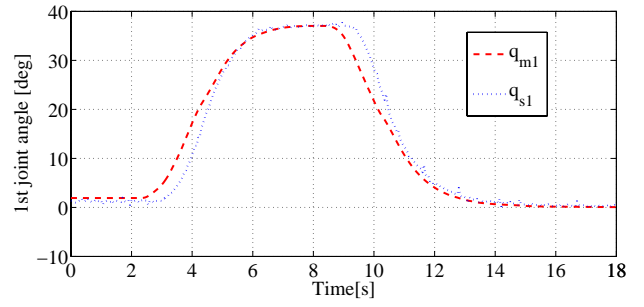


Fig. 5 Case1: 1st joint angle (proposed method)

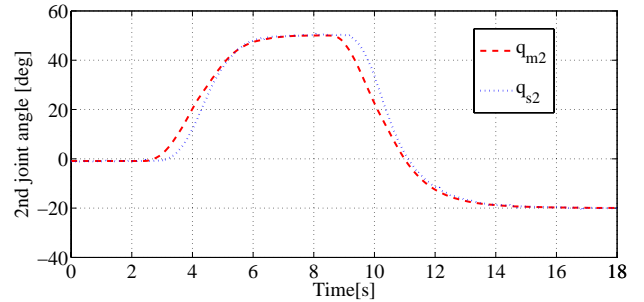


Fig. 6 Case1: 2nd joint angle (proposed method)

ないという利点がある。リアプノフ法により、提案するテレオペレーションが時変の通信遅延を有する際にも安定であることを示した。さらに、2台の2自由度アームを用いた実験により遅延の影響を減少させること、target systemの応答の特性である位置誤差の収束と静的な反力の伝達を達成することを確認した。今後の課題は、PD制御則以外の制御則に対する予測器の導入、パワースケーリングの考慮などである。

## 文献

- (1) P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: an historical survey," *Automatica* Vol. 42, No. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- (2) N. Chopra, M. W. Spong, S. Hirche and M. Buss, "Bilateral teleoperation over the internet," *Proc. of the 2003 American Control Conference*, pp. 155-160, 2003.
- (3) 河田久之輔, 滑川徹, "時変の通信遅延を有する非線形テレオペレーションのパラレル制御," 第36回計測自動制御学会 制御理論シンポジウム, 資料集, pp. 429-432, 2007.
- (4) 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. Autom.*, vol.10, no.6, pp1146-1162, 2006.
- (5) W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance control with adaptation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol.7, no.3, pp408-415, 1991.
- (6) C. Canudas-de-Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds), *Theory of Robot Control*, Springer, 1996.
- (7) D. Lee and M. W. Spong, "Passive Bilateral Teleoperation With Constant Time Delay," *IEEE Trans. Robot.*, vol.22, no.2, pp269-281, 2006.

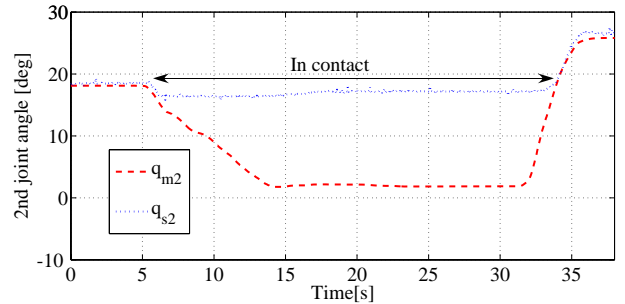


Fig. 7 Case2: 2nd joint angle (proposed method)

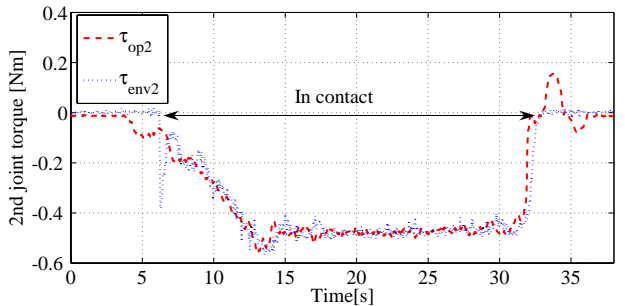


Fig. 8 Case2: 2nd joint torque (proposed method)

- (8) J. J. E. Slotine, W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators" *Int. J. Robotics Research*, vol.6, no.3, pp49-59, 1987.