

通信遅延を有するテレオペレーションの状態予測に基づく同調制御

吉田航瑛 滑川徹 (金沢大学)

State Predictor based Synchronization of Teleoperation with Communication Time Delay

K. Yoshida and T. Namerikawa (Kanazawa University)

Abstract— This paper deals with a predictive control for teleoperation with time delay. The control method is a combination of the synchronized control based on state predictors and the adaptive impedance control. To improve the performance of the system, we propose the new predictors. The prediction errors of the proposed predictor do not depend on past prediction errors. Using the Lyapunov stability method, it is proven that the position error and velocity error are bounded even in the presence of time delay. Experimental results show the effectiveness of proposed teleoperation.

Key Words: Teleoperation, State Predictor, Synchronization, Time Delay, 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 [1] ため、通信遅延に対する安定性を保証しつつ、良好な性能を達成する必要がある。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は、受動性に基づく制御 [2, 3] がよく知られている。しかし、文献 [2, 3] の手法では、遅延した情報を直接用いて PD 制御を行うことから、遅延の増大とともに操作性が劣化する。また、遅延による位置追従の遅れは基本的な避けられない。一方、文献 [4] 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化、遅延による性能の劣化の減少を実現しているが、多自由度系やロボットダイナミクスのパラメータの不確かさを扱っておらず、制御則に環境のモデルが必要であった。そこで文献 [5] では、環境のモデルを入手できない状況における多自由度系の制御を考え、適応インピーダンス制御による線形化 [6, 7] と予測器 [4] に基づく PD 制御を組み合わせた手法を提案している。しかし、[4, 5] で用いている予測器では、過去の予測偏差が現在の予測偏差へ影響を与える。そのため過去に大きな予測偏差が生じた場合、その後の予測偏差も大きくなる可能性がある。

本稿では、予測制御手法の性能を改善するために、システムの解軌道に基づく予測器を提案する。提案予測器では、過去の予測偏差が現在の予測偏差に影響を与えない。文献 [5] と同様に、提案する予測器を PD 制御則 (同調制御則 [2] と等価) に導入し、適応インピーダンス制御による線形化と組み合わせる。また、提案する制御手法を適用した際の安定性をリアプノフ法により示す。さらに、シミュレーションにより、提案する予測器と従来の予測器の性能比較を行う。また、実験により、提案する制御手法の位置追従性能や反力の伝達特性を検証する。

2 問題設定

2.1 制御対象

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。このダイナミクスは以下の特性を有する。

特性 1 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 [8]。

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i = Y_i(\ddot{q}_i, \dot{q}_i, q_i)\theta_i \quad (2) \quad (i = m, s)$$

通信遅延については本稿では定数とする。マスタからのスレーブへの情報伝達の遅延を T_{ms} とし、その逆方向の通信遅延を T_{sm} とする。さらに、次の仮定をおく。

仮定 1 通信遅延 T_{ms}, T_{sm} は既知である。

また、操縦者、環境から加わる力に関しては次のような仮定をおく。

仮定 2 加える力は有界で、次式を満たす c_{op_j}, c_{env_j} ($j = 1, \dots, n$) が存在する。

$$|\tau_{op_j}(t)| \leq c_{op_j}, \quad |\tau_{env_j}(t)| \leq c_{env_j} \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{op_j}, \tau_{env_j}$ は τ_{op}, τ_{env} の j 番目の要素である。また、時間経過による力の変化も有界であり、次式を満たす定数 $\rho_{op_j}, \rho_{env_j}$ ($j = 1, \dots, n$) が存在する。

$$\sup_{\theta \in [-T_{ms}, 0]} |\tau_{op_j}(t + \theta) - \tau_{op_j}(t)| \leq \rho_{op_j} \quad (j = 1, \dots, n) \quad (4)$$

$$\sup_{\theta \in [-T_{sm}, 0]} |\tau_{env_j}(t + \theta) - \tau_{env_j}(t)| \leq \rho_{env_j} \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5)$$

2.2 制御目的

本稿の制御目的を以下のように設定する.

- 1) 安定性: 位置誤差 $q_m(t) - q_s(t)$, 速度誤差 $\dot{q}_m(t) - \dot{q}_s(t)$ が有界となり, システムは安定となる.
- 2) 同調の達成: 以下のように位置誤差, 速度誤差が収束する.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_m(t) - q_s(t) = 0 \quad (6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_m(t) - \dot{q}_s(t) = 0 \quad (7)$$

- 3) 静的な反力の伝達: マスタとスレーブの速度, 加速度が0の時に $\tau_{op} = \tau_{env}$ が成り立つ. これは最低限の透明性の達成を表している [3].

3 制御則

3.1 適応インピーダンス制御による線形化

非線型系 (1) の制御問題を線形システムの制御問題として考えるために, まず適応インピーダンス制御による線形化 [6, 7] を行う. 次のような入力トルクとパラメータ更新則を考える.

$$\tau_m = -\tau_{op} + Y_m(\ddot{q}_{mr}, \dot{q}_m, \dot{q}_{mr}, q_m)\bar{\theta}_m - K_m r_m \quad (8)$$

$$\dot{\bar{\theta}}_m = -\Gamma_m Y_m^T(\ddot{q}_{mr}, \dot{q}_m, \dot{q}_{mr}, q_m)r_m \quad (9)$$

$$\tau_s = \tau_{env} + Y_s(\ddot{q}_{sr}, \dot{q}_s, \dot{q}_{sr}, q_s)\bar{\theta}_s - K_s r_s \quad (10)$$

$$\dot{\bar{\theta}}_s = -\Gamma_s Y_s^T(\ddot{q}_{sr}, \dot{q}_s, \dot{q}_{sr}, q_s)r_s \quad (11)$$

ここで, 各変数は次のように定義されている.

$$\dot{q}_{mr} = \dot{q}_{md} - \Lambda_m(q_m - q_{md}) \quad (12)$$

$$\dot{q}_{sr} = \dot{q}_{sd} - \Lambda_s(q_s - q_{sd}) \quad (13)$$

$$r_m = (\dot{q}_m - \dot{q}_{md}) + \Lambda_m(q_m - q_{md}) \quad (14)$$

$$r_s = (\dot{q}_s - \dot{q}_{sd}) + \Lambda_s(q_s - q_{sd}) \quad (15)$$

$\Lambda_m, \Lambda_s \in R^{n \times n}$ は正定対角な設計パラメータ, $\Gamma_m, \Gamma_s \in R^{m \times m}$ は正定な設計パラメータ, $\bar{\theta} \in R^{m \times 1}$ はパラメータ推定値, $q_{md}, \dot{q}_{md}, \ddot{q}_{md}, q_{sd}, \dot{q}_{sd}, \ddot{q}_{sd}$ は次式に従って計算されるトラジェクトリーである.

$$\bar{M}_m \ddot{q}_{md} = \tau_{md} + \tau_{op} \quad (16)$$

$$\bar{M}_s \ddot{q}_{sd} = \tau_{sd} - \tau_{env} \quad (17)$$

$$\dot{q}_{id}(0) = \dot{q}_i(0), q_{id}(0) = q_i(0) \quad (i = m, s)$$

ただし $\bar{M}_m, \bar{M}_s \in R^{n \times n}$ は慣性を表す正定対角行列である. $\tau_{md}, \tau_{sd} \in R^n$ は新たな制御入力である. 各ステップごとに $\tau_{md} + \tau_{op}$ から \ddot{q}_{md} を求め, それを積分して q_{md}, \dot{q}_{md} を求める. ここで次の補題が成り立つ.

補題 1 [6] 制御対象 (1) に制御則 (8)(9)(10)(11) を適用することを考える. $q_{id}, \dot{q}_{id}, \ddot{q}_{id} (i = m, s)$ が有界であるとき以下が成り立つ.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q_i - q_{id} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_i - \dot{q}_{id} = 0 \quad (i = m, s)$$

$q_{md}, q_{sd}, \dot{q}_{md}, \dot{q}_{sd}$ にマスタとスレーブは追従することから, マスタとスレーブ (1) の制御問題を, q_{md}, q_{sd} を生成する線形システム (16)(17) の制御問題と考えることができる.

3.2 予測値に基づく同調制御則

遅延のない同調を達成させることを目的として, 次のような予測値を含めた制御入力 τ_{md}, τ_{sd} を与える.

$$\tau_{md} = \bar{M}_m \Lambda \dot{q}_{md} + K(\hat{r}_{sd} - r_{md}) \quad (18)$$

$$\tau_{sd} = \bar{M}_s \Lambda \dot{q}_{sd} + K(\hat{r}_{md} - r_{sd}) \quad (19)$$

ここで, $K, \Lambda \in R^{n \times n}$ は正定対角な設計パラメータ, $r_{md} = \dot{q}_{md} + \Lambda q_{md}, r_{sd} = \dot{q}_{sd} + \Lambda q_{sd}$ である. $\hat{r}_{md}, \hat{r}_{sd}$ は r_{md}, r_{sd} の予測値で後述の予測器から出力される. この制御則は [2] の制御則に予測値を含めた形となっている. (18)(19) を (16)(17) に代入すると,

$$\bar{M}_m \dot{r}_{md} = K(\hat{r}_{sd} - r_{md}) + \tau_{op} \quad (20)$$

$$\bar{M}_s \dot{r}_{sd} = K(\hat{r}_{md} - r_{sd}) - \tau_{env} \quad (21)$$

が得られる. $\hat{r}_{md} = r_{md}, \hat{r}_{sd} = r_{sd}$ が成り立つ場合, 同調制御 [2] を遅延がない状況で適用した際のダイナミクスとなる.

4 予測器の設計

ここでは, $\hat{r}_{md}, \hat{r}_{sd}$ を出力する予測器の設計を行う. 予測は, システム (20)(21) の解軌道に基づいて行う. T_{ms}, T_{sm} 秒前の状態, 予測値, 力情報を用いてシステム (20)(21) の現時刻の状態 r_{md}, r_{sd} を表すと次式のようになる.

$$\begin{aligned} r_{md} = & e^{-\bar{M}_m^{-1} K T_{ms}} r_{md}(t - T_{ms}) \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} K \hat{r}_{sd}(t') dt' \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \tau_{op}(t') dt' \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} r_{sd} = & e^{-\bar{M}_s^{-1} K T_{sm}} r_{sd}(t - T_{sm}) \\ & + \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} K \hat{r}_{md}(t') dt' \\ & - \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} \tau_{env}(t') dt' \end{aligned} \quad (23)$$

(22)(23) の右辺第 1 項目と第 2 項目は, マスタ側とスレーブ側の両側で計算可能である. 第 1 項目は, 遅延した状態 $r_{md}(t - T_{ms}), r_{sd}(t - T_{sm})$ から計算され, $r_{md}(t - T_{ms})$ と $r_{sd}(t - T_{sm})$ は両側で入手可能である. また, 2 項目は区間 $[t - T_{ms}, t]$ の予測値 \hat{r}_{md} と区間 $[t - T_{sm}, t]$ の予測値 \hat{r}_{sd} から計算される. これらの情報を入手できるように予測器を設計すれば, 第 2 項目も計算可能である. 一方, (22)(23) の右辺第 3 項目は計算することは不可能である. (22)(23) の第 3 項目の計算には, 区間 $[t - T_{ms}, t]$ の τ_{op} と, 区間 $[t - T_{sm}, t]$ の τ_{env} が必要となるが, その両方を入手することはできないためである.

そこで, 第 3 項目の入手不可能な力情報の代わりに, 入手可能な力情報を用いて, 現時刻の状態 r_{md}, r_{sd} を予測することを考える. 本節では, 2 つの予測器を設計し, 従来の予測器と比較する.

4.1 予測器 1

ここで提案する予測器 1 は, 予測値の計算に区間 $[t - 2T_{ms}, t - T_{ms}]$ の τ_{op} と, 区間 $[t - 2T_{sm}, t - T_{sm}]$ の τ_{env} を用いる. 以下の 2 式 (24)(25) で構成される予測器をマスタ側とスレーブ側に設置して r_{md}, r_{sd} の予測値 $\hat{r}_{md}, \hat{r}_{sd}$ を計算する.

$$\begin{aligned} \hat{r}_{md} = & e^{-\bar{M}_m^{-1} K T_{ms}} r_{md}(t - T_{ms}) \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} K \hat{r}_{sd}(t') dt' \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \tau_{op}(t' - T_{ms}) dt' \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}\hat{r}_{sd} = & e^{-\bar{M}_s^{-1} K T_{sm}} r_{sd}(t - T_{sm}) \\ & + \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} K \hat{r}_{md}(t') dt' \\ & - \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} \tau_{env}(t' - T_{sm}) dt' \quad (25)\end{aligned}$$

予測偏差を $\tilde{r}_{md} = r_{md} - \hat{r}_{md}$, $\tilde{r}_{sd} = r_{sd} - \hat{r}_{sd}$ と定義し、予測値 (24) と実際の値 (22) の偏差をとると、以下が得られる。

$$\begin{aligned}\tilde{r}_{md} = & \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \{\tau_{op}(t') - \tau_{op}(t' - T_{ms})\} dt' \\ \tilde{r}_{sd} = & \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} \{\tau_{env}(t' - T_{sm}) - \tau_{env}(t')\} dt' \quad (26)\end{aligned}$$

このように予測偏差は、遅延時間の間における力の変化に依存する。ここで、以下の補題のように予測偏差の有界性がいえる。

補題 2 予測偏差は有界であり、次式を満たす。

$$\|\tilde{r}_{md}\| \leq \sqrt{\sum_{j=1}^n c_{m_j}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left\{ \rho_{op_j} \frac{1 - e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j T_{ms}}}{K_j} \right\}^2} \quad (27)$$

$$\|\tilde{r}_{sd}\| \leq \sqrt{\sum_{j=1}^n c_{s_j}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left\{ \rho_{env_j} \frac{1 - e^{-\bar{M}_s^{-1} K_j T_{sm}}}{K_j} \right\}^2} \quad (28)$$

ここで、 \bar{M}_{m_j} , \bar{M}_{s_j} , K_j は対角行列 \bar{M}_m , \bar{M}_s , K の j 番目の対角要素を表す。また、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを表す。上記のように定義される c_{m_j} , c_{s_j} は予測偏差 \tilde{r}_{md} , \tilde{r}_{sd} の j 番目の要素の最大値を表す。

proof : (26) と行列 \bar{M}_m , K の対角性より $\tilde{r}_{md} = [\tilde{r}_{md_1}, \dots, \tilde{r}_{md_n}]^T$ の j 番目の要素の式は次式となる。

$$\tilde{r}_{md_j} = \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \{\tau_{op_j}(t') - \tau_{op_j}(t' - T_{ms})\} dt' \quad (29)$$

予測偏差 (29) の絶対値をとると次のようになる。

$$\begin{aligned}|\tilde{r}_{md_j}| = & \left| \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \{\tau_{op_j}(t') - \tau_{op_j}(t' - T_{ms})\} dt' \right| \\ \leq & \int_{t-T_{ms}}^t \left| e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \{\tau_{op_j}(t') - \tau_{op_j}(t' - T_{ms})\} \right| dt'\end{aligned}$$

ここで、 $e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j(t-t')} \bar{M}_m^{-1} > 0$ なので

$$|\tilde{r}_{md_j}| \leq \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j(t-t')} \bar{M}_m^{-1} |\tau_{op_j}(t') - \tau_{op_j}(t' - T_{ms})| dt'$$

が得られる。さらに仮定 2 より次式が得られる。

$$\begin{aligned}|\tilde{r}_{md_j}| \leq & \rho_{op_j} \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j(t-t')} \bar{M}_m^{-1} dt' \\ = & \rho_{op_j} \frac{1 - e^{-\bar{M}_m^{-1} K_j T_{ms}}}{K_j} = c_{m_j} \quad (30)\end{aligned}$$

このことから (27) は容易に得られる。よって、予測偏差は有界となる。スレーブの状態の予測偏差についても同様に証明可能である。 \square

4.2 予測器 2

ここで提案する予測器 2 は、予測値の計算に時刻 $t - T_{ms}$ の τ_{op} と、時刻 $t - T_{sm}$ の τ_{env} のみを用いる。この場合、以下の 2 式で構成される予測器をマスタ側とスレーブ側に設置して r_{md} , r_{sd} の予測値 \hat{r}_{md} , \hat{r}_{sd} を計算する。

$$\begin{aligned}\hat{r}_{md} = & e^{-\bar{M}_m^{-1} K T_{ms}} r_{md}(t - T_{ms}) \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} K \hat{r}_{sd}(t') dt' \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \tau_{op}(t - T_{ms}) dt' \quad (31)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{r}_{sd} = & e^{-\bar{M}_s^{-1} K T_{sm}} r_{sd}(t - T_{sm}) \\ & + \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} K \hat{r}_{md}(t') dt' \\ & + \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} \tau_{env}(t - T_{sm}) dt' \quad (32)\end{aligned}$$

ここで、右辺 3 項目の τ_{op} , τ_{env} が (24)(25) の右辺 3 項目と異なり、積分変数と独立になっていることに注意されたい。この場合の予測偏差は以下となる。

$$\begin{aligned}\tilde{r}_{md} = & \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \{\tau_{op}(t') - \tau_{op}(t - T_{ms})\} dt' \\ \tilde{r}_{sd} = & \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} \{\tau_{env}(t - T_{sm}) - \tau_{env}(t')\} dt' \quad (33)\end{aligned}$$

この予測偏差の式から次のことが分かる。ある時刻 $t < t_0$ において τ_{op} , $\tau_{env} \neq 0$ 、時刻 $t \geq t_0$ で τ_{op} , $\tau_{env} = 0$ となる場合を考える。予測器 2 の場合は (33) から $\tilde{r}_{md}(t_0 + T_{ms}) = 0$ となり、予測器 1 の場合は (26) から $\tilde{r}_{md}(t_0 + T_{ms}) \neq 0$, $\tilde{r}_{md}(t_0 + 2T_{ms}) = 0$ となる。つまり、この場合の予測偏差の収束の速さは予測器 2 の方が速い。なお、従来法の場合は、次節で示すように過去の予測偏差が影響するため、さらに時間がかかる。

注意 1 予測器 2 を適用した場合にも補題 2 が成り立ち、上界は (27)(28) で与えられる。

4.3 従来予測器との比較

従来研究 [4, 5] と同じ形の予測器を用いた場合、現時刻の予測値は以下ようになる。

$$\begin{aligned}\hat{r}_{md} = & e^{-\bar{M}_m^{-1} K T_{ms}} \hat{r}_{md}(t - T_{ms}) \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} K \hat{r}_{sd}(t') dt' \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} \bar{M}_m^{-1} \tau_{op}(t' - T_{ms}) dt' \\ & + \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\bar{M}_m^{-1} K(t-t')} E_m \tilde{r}_m(t' - T_{ms}) dt' \quad (34)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{r}_{sd} = & e^{-\bar{M}_s^{-1} K T_{sm}} \hat{r}_{sd}(t - T_{sm}) \\ & + \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} K \hat{r}_{md}(t') dt' \\ & - \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} \bar{M}_s^{-1} \tau_{env}(t' - T_{sm}) dt' \\ & + \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\bar{M}_s^{-1} K(t-t')} E_s \tilde{r}_s(t' - T_{sm}) dt' \quad (35)\end{aligned}$$

ここで、 $E_m, E_s \in R^{n \times n}$ は [4] で与えられている条件を満たすように設計するゲインである。(22)(23) から

(34)(35) をひくと、予測偏差が以下のように得られる。

$$\begin{aligned}\tilde{r}_{md} &= e^{-\overline{M}_m^{-1} K T_{ms}} \tilde{r}_{md}(t - T_{ms}) \\ &+ \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\overline{M}_m^{-1} K(t-t')} \overline{M}_m^{-1} \{\tau_{op}(t') - \tau_{op}(t' - T_{ms})\} dt' \\ &+ \int_{t-T_{ms}}^t e^{-\overline{M}_m^{-1} K(t-t')} E_m \tilde{r}_m(t' - T_{ms}) dt' \quad (36)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{r}_{sd} &= e^{-\overline{M}_s^{-1} K T_{sm}} \tilde{r}_{sd}(t - T_{sm}) \\ &+ \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\overline{M}_s^{-1} K(t-t')} \overline{M}_s^{-1} \{\tau_{env}(t') - \tau_{env}(t' - T_{sm})\} dt' \\ &+ \int_{t-T_{sm}}^t e^{-\overline{M}_s^{-1} K(t-t')} E_s \tilde{r}_s(t' - T_{sm}) dt' \quad (37)\end{aligned}$$

(36)(37) の右辺第 2 項目は、予測器 1, 2 の予測偏差と同様に、予測に用いている力情報と実際のシステムに加わっている力との誤差に起因する項である。第 1, 3 項目は過去の予測偏差の影響を表している。このことから、(36)(37) の右辺 2 項目が 0 になるような状況になっても、過去の予測偏差の影響が残る。

5 安定性解析

ここでは、予測器 1, 2 を用いた制御則を適用した際の位置誤差、速度誤差、反力の伝達について述べる。

5.1 位置誤差と速度誤差の有界性

まず安定性解析を容易にするため、(20) から (21) を引き、 r_{md} と r_{sd} の偏差を $r_{syn} = r_{md} - r_{sd}$ と定義すると次式のような偏差系が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{r}_{syn} &= -(\overline{M}_m^{-1} + \overline{M}_s^{-1}) K r_{syn} + \overline{M}_m^{-1} \tau_{op} + \overline{M}_s^{-1} \tau_{env} \\ &+ \overline{M}_m^{-1} K \tilde{r}_{sd} - \overline{M}_s^{-1} K \tilde{r}_{md} \quad (38)\end{aligned}$$

(38) は安定なシステムに、有界な力 τ_{op}, τ_{env} と有界な予測偏差 $\tilde{r}_{md}, \tilde{r}_{sd}$ の影響が加わっていると考えることができ。ここで次の定理が成り立つ。

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を考える。ある正の定数 $\gamma_{opj}, \gamma_{envj}, \gamma_{mj}, \gamma_{sj}$ ($j = 1, \dots, n$) を与えたとき、以下の LMI を満たす正の定数 $p_j > 0$ ($j = 1, \dots, n$) が存在するとする。

$$\begin{bmatrix} -2K_j(\overline{M}_{m_j}^{-1} + \overline{M}_{s_j}^{-1})p_{j+1} & p_j \overline{M}_{m_j}^{-1} & p_j \overline{M}_{s_j}^{-1} & p_j \overline{M}_{m_j}^{-1} K_j & p_j \overline{M}_{s_j}^{-1} K_j \\ p_j \overline{M}_{m_j}^{-1} & -\gamma_{opj}^2 & 0 & 0 & 0 \\ p_j \overline{M}_{s_j}^{-1} & 0 & -\gamma_{envj}^2 & 0 & 0 \\ p_j \overline{M}_{m_j}^{-1} K_j & 0 & 0 & -\gamma_{mj}^2 & 0 \\ p_j \overline{M}_{s_j}^{-1} K_j & 0 & 0 & 0 & -\gamma_{sj}^2 \end{bmatrix} < 0$$

このとき、位置誤差と速度誤差は有界となり、制御目的 1) を達成する。また、 $r_{syn}(0) = 0$ を仮定すると、定常状態 $t \rightarrow \infty$ で以下が成り立つ。

$$\|q_m - q_s\| \leq \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{\lambda_j^2}}, \quad \|\dot{q}_m - \dot{q}_s\| \leq \sqrt{\sum_{j=1}^n 4C_j} \quad (39)$$

ここで、

$$C_j = \gamma_{opj}^2 c_{opj}^2 + \gamma_{envj}^2 c_{envj}^2 + \gamma_{mj}^2 c_{mj}^2 + \gamma_{sj}^2 c_{sj}^2 \quad (40)$$

である。ただし、 c_{opj}, c_{envj} は仮定 2 で定義した操縦者と環境の力の最大値で、 c_{mj}, c_{sj} は補題 2 で得られる予測偏差の最大値である。また、 λ_j は正定対角行列 Λ の j 番目の対角要素である。また、 $\tau_{op}, \tau_{env} = 0, r_{syn}(0) \neq 0$ の場合は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|q_m - q_s\|, \|\dot{q}_m - \dot{q}_s\| = 0 \quad (41)$$

が成り立ち、制御目的 2) が達成される。

proof: まず、 r_{syn} の有界性について証明する。まず、 $r_{syn} = [r_{syn_1} \dots r_{syn_n}]^T$ の j 番目の要素を r_{syn_j} と定義し、(38) を以下のように、各軸ごとに分解する。

$$\begin{aligned}\dot{r}_{syn_j} &= -(\overline{M}_{m_j}^{-1} + \overline{M}_{s_j}^{-1}) K_j r_{syn_j} + \overline{M}_{m_j}^{-1} \tau_{op_j} + \overline{M}_{s_j}^{-1} \tau_{env_j} \\ &+ \overline{M}_{m_j}^{-1} K_j \tilde{r}_{sd_j} - \overline{M}_{s_j}^{-1} K_j \tilde{r}_{md_j} \quad (42)\end{aligned}$$

この偏差系を考えて $V_j = r_{syn_j} p_j r_{syn_j}$ のような正定関数を考える。これを微分してまとめると以下のようになる。

$$\begin{aligned}\dot{V}_j &= -r_{syn_j} \{2K_j(\overline{M}_{m_j}^{-1} + \overline{M}_{s_j}^{-1})p_j\} r_{syn_j} \\ &+ 2\tau_{op_j} \overline{M}_{m_j}^{-1} p_j r_{syn_j} + 2\tau_{env_j} \overline{M}_{s_j}^{-1} p_j r_{syn_j} \\ &+ 2\tilde{r}_{sd_j} K_j \overline{M}_{m_j}^{-1} p_j r_{syn_j} + 2\tilde{r}_{md_j} K_j \overline{M}_{s_j}^{-1} p_j r_{syn_j}\end{aligned}$$

さらに、関係式 $2\epsilon_1 \epsilon_2 \leq \gamma^2 \epsilon_1^2 + \gamma^{-2} \epsilon_2^2$ を上式の 2, 3, 4, 5 項目に用いると、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}\dot{V}_j &\leq -r_{syn_j} N r_{syn_j} - r_{syn_j} r_{syn_j} \\ &+ \gamma_{op_j}^2 |\tau_{op_j}|^2 + \gamma_{env_j}^2 |\tau_{env_j}|^2 + \gamma_{m_j}^2 |\tilde{r}_{md_j}| + \gamma_{s_j}^2 |\tilde{r}_{sd_j}| \quad (43)\end{aligned}$$

ここで、 N の定義は

$$\begin{aligned}N &= 2K_j(\overline{M}_{m_j}^{-1} + \overline{M}_{s_j}^{-1})p_j - \gamma_{op_j}^2 p_j^2 \overline{M}_{m_j}^{-2} - \gamma_{env_j}^2 p_j^2 \overline{M}_{s_j}^{-2} \\ &- \gamma_{m_j}^2 p_j^2 \overline{M}_{m_j}^{-2} K_j^2 - \gamma_{s_j}^2 p_j^2 \overline{M}_{s_j}^{-2} K_j^2 - 1 \quad (44)\end{aligned}$$

である。上述の LMI が成立するとき $N > 0$ となることと、 $r_{syn_j}^2 = V_j/p_j$ の関係式、仮定 2 の力の有界性と補題 2 の予測偏差の有界性を用いて、以下の微分不等式が得られる。

$$\dot{V}_j \leq -\frac{V_j}{p_j} + \gamma_{op_j}^2 c_{op_j}^2 + \gamma_{env_j}^2 c_{env_j}^2 + \gamma_{m_j}^2 c_{m_j}^2 + \gamma_{s_j}^2 c_{s_j}^2$$

この微分不等式を解き、その解を $C_j = \gamma_{op_j}^2 c_{op_j}^2 + \gamma_{env_j}^2 c_{env_j}^2 + \gamma_{m_j}^2 c_{m_j}^2 + \gamma_{s_j}^2 c_{s_j}^2$ の定義を用いて表すと以下のようになる。

$$V_j(t) \leq V_j(0) e^{-\frac{t}{p_j}} + p_j C_j \{1 - e^{-\frac{t}{p_j}}\} \quad (45)$$

ここで、 $r_{syn}(0) = 0$ を仮定から $V_j \leq p_j C_j$ となる。よって V_j の定義から、 $|r_{syn_j}| \leq \sqrt{C_j}$ が得られる。さらに、 q_{md_j}, q_{sd_j} を q_{md}, q_{sd} の j 番目の要素とすると、 r_{syn} の定義から次式が成り立つ。

$$r_{syn_j} = \dot{q}_{md_j} - \dot{q}_{sd_j} + \lambda_j (q_{md_j} - q_{sd_j})$$

この式を $q_{md_j} - q_{sd_j}$ について解くと次式が得られる。

$$q_{md_j} - q_{sd_j} = e^{-\lambda_j t} \{q_{md_j}(0) - q_{sd_j}(0)\} + \int_0^t e^{-\lambda_j(t-t')} r_{syn_j} dt'$$

よって、上式と $|r_{syn_j}| \leq \sqrt{C_j}$ から、

$$|q_{md_j} - q_{sd_j}| \leq |e^{-\lambda_j t} \{q_{md_j}(0) - q_{sd_j}(0)\}| + \sqrt{C_j} \int_0^t e^{-\lambda_j(t-t')} dt'$$

が得られ、 $\lim_{t \rightarrow \infty} |q_{md_j} - q_{sd_j}| = \sqrt{C_j}/\lambda_j$ が成り立つ。さらに、 r_{syn} の定義から以下が成り立つ。

$$|\dot{q}_{md_j} - \dot{q}_{sd_j}| \leq \lambda_j |q_{md_j} - q_{sd_j}| + |r_{syn_j}|$$

よって、 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{q}_{md_j} - \dot{q}_{sd_j}| \leq 2\sqrt{C_j}$ となる。次に、位置誤差 $q_m - q_s$ 、速度誤差 $\dot{q}_m - \dot{q}_s$ について考える。 q_{m_j}, q_{s_j} を q_m, q_s の j 番目の要素とし、次の関係式

$$\begin{aligned}|q_m - q_s| &= |q_{m_j} - q_{md_j} + q_{md_j} - q_{sd_j} + q_{sd_j} - q_{s_j}| \\ &\leq |q_{m_j} - q_{md_j}| + |q_{md_j} - q_{sd_j}| + |q_{sd_j} - q_{s_j}|, \\ |\dot{q}_m - \dot{q}_s| &= |\dot{q}_{m_j} - \dot{q}_{md_j} + \dot{q}_{md_j} - \dot{q}_{sd_j} + \dot{q}_{sd_j} - \dot{q}_{s_j}| \\ &\leq |\dot{q}_{m_j} - \dot{q}_{md_j}| + |\dot{q}_{md_j} - \dot{q}_{sd_j}| + |\dot{q}_{sd_j} - \dot{q}_{s_j}|\end{aligned}$$

を考える. 上式の右辺の1項目と3項目は補題1より $t \rightarrow \infty$ で0に収束する. また, 2項目に関しては, $\lim_{t \rightarrow \infty} |q_{md_j} - q_{sd_j}| = \sqrt{C_j}/\lambda_j$, $\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{q}_{md_j} - \dot{q}_{sd_j}| \leq 2\sqrt{C_j}$ が成り立つ. よって以下が得られる.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |q_{m_j} - q_{s_j}| \leq \sqrt{C_j}/\lambda_j \quad (46)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{q}_{m_j} - \dot{q}_{s_j}| \leq 2\sqrt{C_j} \quad (47)$$

このことから (39) が成り立つ.

加える力が0の際には予測偏差も0となるので, 閉ループ系の式は $\dot{r}_{syn} = -(\overline{M}_m^{-1} + \overline{M}_s^{-1})K r_{syn}$ となる. このことを用いれば $\tau_{op}, \tau_{env} = 0, r_{syn}(0) \neq 0$ の場合に (41) が成り立つことを証明できる. \square

5.2 反力の伝達

反力の伝達を達成するための条件を以下に与える.

命題1 $\ddot{q}_{md} = \ddot{q}_{sd} = \dot{q}_{md} = \dot{q}_{sd} = 0$ かつ $\tilde{r}_{md}, \tilde{r}_{sd} = 0$ が成り立つ場合, $\tau_{op} = K(q_{md} - q_{sd}) = \tau_{env}$ のように反力が伝達される.

proof: (20)(21) 式に $\ddot{q}_{md} = \ddot{q}_{sd} = \dot{q}_{md} = \dot{q}_{sd} = 0$ と $\tilde{r}_{md}, \tilde{r}_{sd} = 0$ を代入することで証明できる. \square

補題1より $\ddot{q}_{md} = \ddot{q}_{sd} = \dot{q}_{md} = \dot{q}_{sd} = 0$ が成り立つとき $\ddot{q}_m = \ddot{q}_s = \dot{q}_m = \dot{q}_s = 0$ となるため, ロボットは静止している状態である. よって, 両ロボットが静止している状態で, 予測偏差が0となれば制御目的3)が達成される.

6 シミュレーションによる予測器の性能比較

ここでは, シミュレーションにより, 提案する予測器1,2と従来の予測器の性能比較を行う. シミュレーションには, 後述する制御実験で用いる2自由度DDアーム (Fig. 5) のモデルを用いた. パラメータは以下のように選んだ.

$$\begin{aligned} \overline{M}_i &= \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 7 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} \\ \Gamma_i &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K_i = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \Lambda_i = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \\ &(i = m, s) \end{aligned} \quad (48)$$

今までの議論から予測偏差の大きさは, 加える力によって大きく異なるので, シミュレーションでは同じ力を加える. シミュレーションでは, 環境とスレーブが接触しない状況についてのみ考え, 操縦者, 環境の力は以下のように与えた. 操縦者の力の波形を Fig. 1 に示す.

$$\tau_{op} = \begin{cases} [0 \ 0]^T & t < 1 \\ \begin{bmatrix} \sin(\frac{\pi}{2}(t-1)) \\ 0.5 \sin(\frac{\pi}{2}(t-1)) \end{bmatrix} & 1 < t < 5 \\ [0 \ 0]^T & 5 < t \end{cases} \quad (49)$$

$$\tau_{env} = [0 \ 0]^T \quad (50)$$

また, シミュレーションにおけるロボットダイナミクスのパラメータは正確に既知とした. 通信遅延の大きさは $T_{ms} = T_{sm} = 0.5[s]$ とした. 比較に用いる従来法の予測器のゲイン E_m, E_s を, [4] と同様の手順で設計し, 以下のように選んだ.

$$E_m = E_s = \begin{bmatrix} -0.2112 & 0 \\ 0 & -0.2773 \end{bmatrix}$$

なお, 以上のような τ_{op} を与えた際, $\rho_{op1} = 0.7654, \rho_{op2} = 0.3827, \rho_{env1} = \rho_{env2} = 0, c_{op1} = 1, c_{op2} = 0.5, c_{env1} = c_{env2} = 0$ となる. これらの値と, 補題2と定理1より, 予測偏差 $\|\tilde{r}_{md}\|$, 位置誤差 $\|q_m - q_s\|$, 速度誤差 $\|\dot{q}_m - \dot{q}_s\|$ の最大値を見積もるとそれぞれ, $\|\tilde{r}_{md}\| \leq 0.1146, \|q_m - q_s\| \leq 0.0874, \|\dot{q}_m - \dot{q}_s\| \leq 0.3043$ となる. Fig. 2 はシミュレーション中の予測誤差 $\|\tilde{r}_{md}\|$ を示しており, Figs. 3, 4 は従来の予測器, 予測器1, 予測器2それぞれを用いた場合のマスとスレーブの位置誤差 $\|q_m - q_s\|$, 速度誤差 $\|\dot{q}_m - \dot{q}_s\|$ を示している. 環境の力が0の場合は, $\tilde{r}_{sd} = 0$ であるので, マスの予測偏差 $\|\tilde{r}_{md}\|$ のみ評価している. 予測偏差, 位置誤差, 速度誤差ともに補題2と定理1によって見積もった最大値以下の値となっている. これらの図から予測偏差は, 予測器2,1, 従来の予測器の順で小さくなっていることが確認できる. また, 加える力が0となった5[s]から後における予測偏差の収束の速さは, 予測器2, 予測器1, 従来法の順で速い. マスとスレーブの位置誤差, 速度誤差は加える力が0となった後は, 0に収束している.

従来法では, 過去の予測偏差が現在の予測偏差へ影響を与えるので, 力の与え方によっては偶然過去の予測偏差が良い影響を与え, 応答も良くなる場合もある. しかし, 加える力を0とした際の予測偏差の収束の速さに関しては, 提案予測器では一定時間経過した後の収束を保証しているので従来法よりも提案法の方が収束が速い.

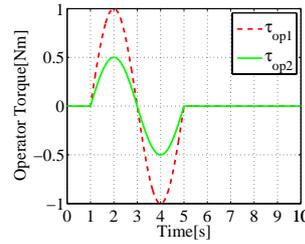


Fig. 1: τ_{op}

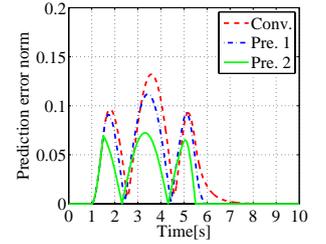


Fig. 2: $\|\tilde{r}_{md}\|$

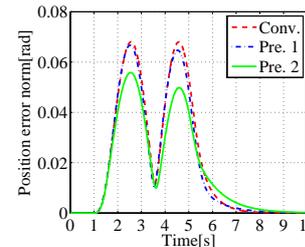


Fig. 3: $\|q_m - q_s\|$

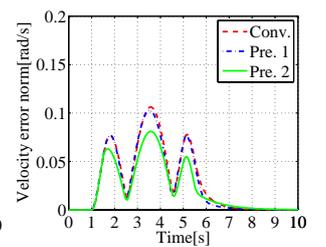


Fig. 4: $\|\dot{q}_m - \dot{q}_s\|$

7 制御実験

ここでは, 実験により提案法を用いた際の位置追従特性を評価し, 条件を満たすときの同調の達成, 反力の伝達について検証する. ただし, 提案法の予測器2を用いた場合についてのみの検証を行う. 実験は Fig. 5 の2台の2自由度DDアームを用い, 制御ボードとして DS1104 (dSPACE 社製) を用いた. 用いる設計パラメータはシミュレーションと同様の値 (48) を用いた. 遅延については, $T_{ms} = T_{sm} = 0.5[s]$ の通信遅延を制御ボードで仮想的に発生させた. 環境と操縦者のトルクは, 力覚センサによる計測値とヤコビアンから計算した. 環境は硬い壁とした. 実験は次の2つの場合につ



Fig. 5: Experimental setup

いて行った.

- Case 1: スレーブと環境の接触なし
- Case 2: スレーブと環境の接触あり

Case1 における, マスタとスレーブの位置を Fig. 6(a) に, 操縦者と環境の力を Fig. 6(b) に, 予測偏差 $\hat{r}_{md1}, \hat{r}_{sd1}$ を Fig. 6(c) に示している. なお, 結果は 1 軸についてのみ示す. 2 軸についても同じような結果が得られている. これらの図から, 位置誤差は有界となっている. 一方, 力が 0 の時は予測偏差, 位置誤差はともに 0 に収束し, 同調を達成していることが分かる. なお, 予測を行わない同調制御 [2] を用いた場合は, 遅延したマスタの軌道にスレーブが追従するが, Fig. 6(a) の 4[s]-6[s] に注目すると, そのような追従の遅れは軽減されていることに注意されたい.

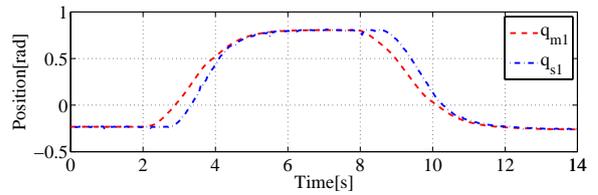
Case 2 における位置を Fig. 7(a) に, 操縦者と環境と力を Fig. 7(b) に, 予測偏差を Fig. 7(c) に示す. これらの図から, 環境と接触して静止しており, 予測偏差も小さくなっている 10[s]-20[s] において, 反力が適切に伝達されていることが分かる.

8 おわりに

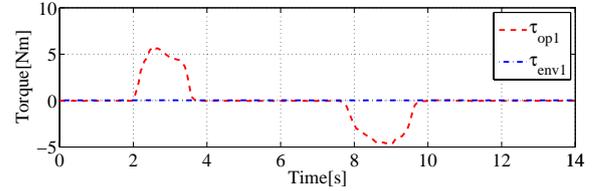
本稿では, 予測制御手法の性能を改善するために, システムの解軌道に基づく予測器を提案した. 提案する予測器では, 過去の予測偏差が現在の予測偏差に影響を与えない. 文献 [5] と同様に, 提案する予測器を PD 制御則に導入し, 適応インピーダンス制御による線形化と組み合わせた. また, 提案する制御手法を適用した際の安定性をリアプノフ法により示した. さらに, シミュレーションにより, 提案する予測器と従来の予測器の性能比較を行った. また, 実験により, 提案する制御手法の位置追従性能や反力の伝達特性を検証した. 今後の課題は時変の遅延への拡張である.

参考文献

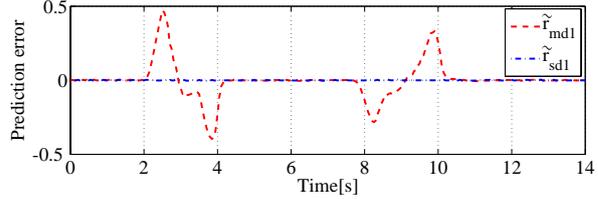
- [1] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: an historical survey," *Automatica*, Vol.42, No.12, pp. 2035-2057, 2006.
- [2] N. Chopra and M. W. Spong, "Adaptive synchronization of bilateral teleoperators with time Delay," *Advances in Telerobotics*, Springer, pp. 257-270, 2007.
- [3] D. Lee and M. W. Spong, "Passive bilateral teleoperation with constant time delay," *IEEE Trans. Robot.*, Vol.22, No.2, pp. 269-281, 2006.
- [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.*, Vol.10, No.6, pp. 1146-1162, 2006.
- [5] 吉田航瑛, 滑川徹, "通信遅延を有するテレオペレーションの予測型 PD 制御," 第 50 回自動制御連合講演会, 資料集, pp. 429-432, 2007.
- [6] W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance control with adaptation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol.7, No.3, pp. 408-415, 1991.



(a) Master and slave position

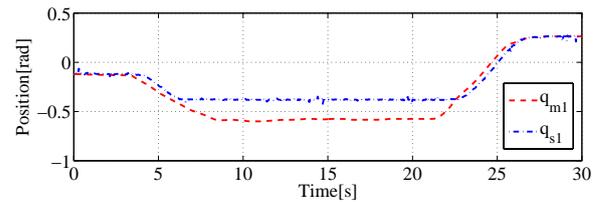


(b) Operator and environmental torque

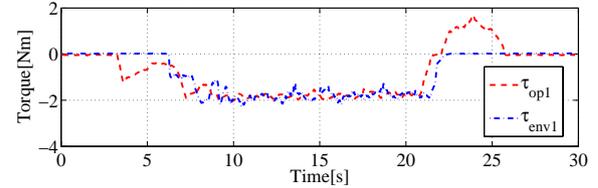


(c) Prediction error

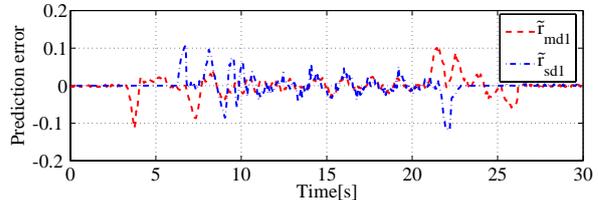
Fig. 6: Experimental results in case 1



(a) Master and slave position



(b) Operator and environmental torque



(c) Prediction error

Fig. 7: Experimental results in case 2

- [7] S. Sirouspur and A. Shahdi, "Model predictive control for transparent teleoperation under communication time delay," *IEEE Trans. Robot.*, Vol.22, No.6, pp. 1131-1145, 2006.
- [8] C. Canudas-de-Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds), *Theory of Robot Control*, Springer, 1996.
- [9] 阿部直人, 児島晃, むだ時間・分布定数系の制御, コロナ社, 2007.