

# 時変の通信遅延を有するテレオペレーションの 遅延の大きさに依存しない安定化

藤田裕之 滑川徹 (金沢大学)

## Delay-Independent Stabilization for Teleoperation with Time Varying Delay

\*H. Fujita and T. Namerikawa (Kanazawa University)

**Abstract**— This paper deals with stability for nonlinear teleoperation with time varying communication delay. The proposed method is passivity-based controller with time varying gains which depend on the rate of change of time varying delay. The delay-independent stability is shown via Lyapunov stability theorem. Experimental results show the effectiveness of our proposed teleoperation.

**Key Words:** Teleoperation, Time varying delay, Delay-independent stabilization

### 1 はじめに

テレオペレーションシステムとは、操縦者がマスタロボットを操作することにより、遠隔地にあるスレーブロボットを操作するシステムである。実用化されているテレオペレーションの多くは操縦者が操作対象の動画情報を元に操作するものが一般的であるが、スレーブロボットに加わる遠隔環境からの反力をマスタロボットを介して操縦者に伝達することで、操縦者の操作支援を行い直感的な操作を行うことができるため、作業の臨場感をさらに向上させることができる。このようなマスタ、スレーブの双方向の制御をバイラテラル制御と呼ぶ。このテレオペレーションシステムのバイラテラル制御に関して、宇宙空間や海底探査、遠隔手術など様々な状況下での活用を目的として古くから研究されている。近年では、インターネットをはじめとするデジタル情報通信技術の発展を背景として、安価に広範囲の通信路網を利用できることから、通信路に既存のネットワークを介したテレオペレーションの研究が盛んに行われている<sup>1)</sup>。これにより、製造分野における遠隔メンテナンスや遠隔体験型エンタテインメントなどの新しいサービスの展開が期待できる。しかし、このような通信路を利用した場合の問題として、時変の通信遅延が発生し、急激に通信遅延が増加することが挙げられる<sup>2)</sup>。これにより、性能の劣化やシステムの不安定化を招く可能性がある。

通信遅延を有するテレオペレーションの安定化に関しては、文献<sup>3, 4)</sup>のようなスキュアリング変換を用いた手法によって達成されている。また、スキュアリング変換を用いない手法としては文献<sup>5, 6, 7)</sup>がある。しかし、これらの文献では定数の通信遅延しか扱っておらず、インターネットを通信路とした場合に問題となる時変の通信遅延に対する安定性は保証されていない。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、時変ゲインを用いたスキュアリング変換による手法<sup>8)</sup>がある。また、文献<sup>9)</sup>では文献<sup>8)</sup>の手法に明示的な位置制御を追加することで位置追従性の向上を行っている。しかし、安定条件によって位置制御ゲインの上限がロボットの有する粘性摩擦係数によって制限されているため、位置制御ゲインを任意の値に設計することができないという問題がある。スキュアリング変換を用

いない手法としては文献<sup>10)</sup>がある。この文献では、位置協調や静的な反力の伝達が達成されているが、安定条件が最大往復遅延に依存しており、オフラインで遅延の大きさを測定しておき、その大きさにより設計パラメータを決定するという必要がある。しかし、インターネットのような通信路では輻輳等の影響によって最大往復遅延が想定した値より大きくなることが十分に考えられる。それにより、設計パラメータが安定条件を満たさなくなる場合が生じるという問題がある。

そこで、本稿では、時変の通信遅延を有するテレオペレーションシステムに対して、安定性が遅延の大きさや粘性摩擦に依存しない制御則を提案する。提案する制御則は定数遅延を扱っている文献<sup>11)</sup>の制御則において、文献<sup>8, 9)</sup>と同様な遅延の変化率に依存した時変ゲインを用いたものである。これにより、安定条件が遅延の大きさに依存しないテレオペレーションを実現し、予期しない急激な遅延の増加に対しても安定性が保証される。提案制御手法によってテレオペレーションシステム全体が安定となり、時変ゲインを介した出力信号の誤差の原点が漸近安定となることをリアプノフの安定定理に基づく安定性解析により示す。

最後に、2 台の直列リンク型平面 2 自由度ダイレクトドライブロボットを用いた検証実験を行い、提案法の有効性を示す。

### 2 テレオペレーションのダイナミクス

本稿では、2 つの非線形多自由度ロボットが、インターネットのような時変の遅延を有する通信路を介して結合しているテレオペレーションシステムの安定化問題を扱う。本研究で扱うマスタ、スレーブロボットの関節空間におけるダイナミクスは、一般的な  $n$  自由度ロボットとして以下の式で表されるとする。

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

ここで、添え字  $m$  はマスタロボット、 $s$  はスレーブロボットを表しており、 $q_i \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  ( $i = m, s$ ) は関節角度、 $\tau_i \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  ( $i = m, s$ ) は入力トルク、 $F_{op} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  は操縦者からマスタロボットの手先にかかる力、 $F_{env} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  はスレーブロボットの手先が遠隔環境へ加える力、 $M_i(q_i) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  ( $i = m, s$ ) は慣性行列、 $C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i \in$

$\mathcal{R}^{n \times 1}(i = m, s)$  はコリオリ力及び遠心力項,  $J_i(q_i) \in \mathcal{R}^{n \times n}(i = m, s)$  はヤコビアンである. このダイナミクスに関して, 次の特性を有していることが一般に知られている<sup>13)</sup>.

特性 1. 関節行列  $M(q)$  は正定対称な行列であり, 適当な定数  $\sigma_m > 0, \sigma_M > 0$  が存在して任意の  $q$  に関して次の関係が成立する.

$$0 < \sigma_m \leq \|M(q)\| \leq \sigma_M < \infty \quad (2)$$

特性 2. 行列  $N(q, \dot{q}) = \dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$  は歪対称行列となる.

特性 3. 行列  $C(q, \dot{q})$  はそれぞれ, 関節速度  $\dot{q}$  に関して有界である. つまり, 有界な正数  $k_c$  が存在し次式が成り立つ.

$$\|C(q, \dot{q})\| \leq k_c \|\dot{q}\| \quad (3)$$

次に, 操縦者と遠隔環境に対して文献<sup>11, 12)</sup>と同様に次のような仮定をおく.

仮定 1. 操縦者は受動的であり次式を満たす.

$$\int_0^t -F_{op}^T(\xi)r_m(\xi)d\xi \geq 0 \quad (4)$$

同様に, 遠隔環境は以下のように受動的である.

$$\int_0^t F_{env}^T(\xi)r_s(\xi)d\xi \geq 0 \quad (5)$$

ただし, ここで  $r_m, r_s \in \mathcal{R}^n$  はそれぞれ, 操縦者と環境への入力ベクトルである.

仮定 2. 操縦者がマスタに与える力  $F_{op}$  とスレーブが環境に与える力  $F_{env}$  は  $r_m, r_s$  の関数によって制限されており,  $r_m, r_s$  に関して有界である.

次に通信路に対しては, インターネット等を想定して時変の通信遅延が発生するとし, マスタからスレーブまでの通信遅延を  $T_m(t)$ , スレーブからマスタまでの通信遅延を  $T_s(t)$  とおく. ただし, パケットロス等の現象は扱わないものとする. また, この通信遅延に対して次の仮定をおく.

仮定 3. 通信遅延  $T_m(t), T_s(t)$  は時間に関して微分可能であり, 次式を満たすとする.

$$0 \leq T_i(t) < \infty, \quad |\dot{T}_i(t)| < 1, \quad |\ddot{T}_i(t)| < \infty \quad i = m, s$$

ただし,  $\dot{T}_i(t)$  は遅延の変化率である. また, 遅延の変化率  $\dot{T}_m(t)$  はスレーブ側で,  $\dot{T}_s(t)$  はマスタ側で測定可能であるとする. この片側方向の遅延の変化率の測定方法については文献<sup>10)</sup>で示されており, 容易に行うことができる.

また, 後述の安定性解析のために以下を仮定する.

仮定 4. 全ての信号は  $t < 0$  において零である.

仮定 5. 全ての信号は拡張  $\mathcal{L}_2$  空間に属している.

### 3 制御目的

本稿における制御目的はテレオペレーションの最も基本的な要求である安定性に関して次に示すように設定する.

制御目的 1. 仮定 1~4 を満たすとき, 時変の通信遅延を有するテレオペレーションシステム全体が通信遅延の大きさとは独立に安定となる.

### 4 制御則

#### 4.1 非線型フィードバックによる受動化

本節では, 次式のような入力トルクを与え, 非線型フィードバックによる信号の受動化を行う.

$$\begin{cases} \tau_m(t) = -M_m \Lambda \dot{q}_m(t) - C_m \Lambda q_m(t) + F_m(t) \\ \tau_s(t) = -M_s \Lambda \dot{q}_s(t) - C_s \Lambda q_s(t) + F_s(t) \end{cases} \quad (6)$$

ただし,  $\Lambda \in \mathcal{R}^{n \times n}$  は設計パラメータであり, 正定対角行列である. また,  $F_m, F_s$  は後述する同調制御則からの入力である. 非線型補償 (6) をダイナミクス (1) に代入して整理することで次式を得る.

$$\begin{cases} M_m \dot{r}_m(t) + C_m r_m(t) = F_{op} + F_m \\ M_s \dot{r}_s(t) + C_s r_s(t) = -F_{env} + F_s \end{cases} \quad (7)$$

ただし,  $r_m, r_s$  はマスタ及びスレーブの新しい出力変数であり, 次式のように位置と速度の線形結合で定義される.

$$\begin{cases} r_m = \dot{q}_m + \Lambda q_m \\ r_s = \dot{q}_s + \Lambda q_s \end{cases} \quad (8)$$

このような非線型フィードバックを行ったダイナミクス (7) に関して, 次の特性が成り立つことが知られている.

特性 4. 式 (7) に対して入力を  $F'_m = F_m + F_{op}, F'_s = F_s - F_{env}$  とし, 出力を  $r_m, r_s$  とする. このときのマスタ及びスレーブに関して次の受動性が成り立つ.

$$\int_0^t r_i^T(\xi)F'_i(\xi)d\xi \geq -\beta \quad i = m, s \quad (9)$$

ここで,  $\beta$  はある非負の定数である.

これは, 位置と速度の情報を含む新しい出力変数  $r_m, r_s$  に対して, マスタ, スレーブが受動的になることを示している. よって,  $r_m, r_s$  を用いることで位置と速度の信号に対して受動性に基づいた制御を行うことができることを意味している.

#### 4.2 時変の通信遅延を考慮した同調制御則

時変の通信遅延を考慮した同調制御則として, 制御入力  $F_m, F_s$  を次式のように与える.

$$\begin{cases} F_m(t) = K \{d_s(t)r_s(t - T_s(t)) - r_m(t)\} \\ F_s(t) = K \{d_m(t)r_m(t - T_m(t)) - r_s(t)\} \end{cases} \quad (10)$$

ここで,  $K \in \mathcal{R}^{n \times n}$  は設計パラメータであり, 正定対角行列である. また,  $d_m(t), d_s(t)$  は遅延の変化率  $\dot{T}_m(t),$

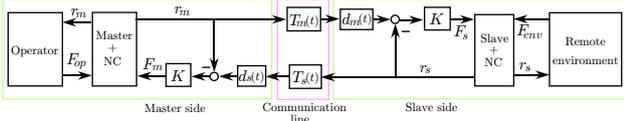


Fig. 1: Teleoperation System

$\dot{T}_s(t)$  に依存した時変ゲインであり、次式のように定義する.

$$\begin{cases} d_m(t) = \sqrt{1 - \dot{T}_m(t)} \cdot I \\ d_s(t) = \sqrt{1 - \dot{T}_s(t)} \cdot I \end{cases} \quad (11)$$

ただし,  $I \in \mathcal{R}^{n \times n}$  は単位行列である. この同調制御則を与えたテレオペレーションシステム全体を Fig. 1 に示す. 非線型フィードバックによる受動化を行ったダイナミクス (7) に時変の通信遅延を考慮した同調制御則 (10) を代入することにより, システムの閉ループ系は次式ようになる.

$$\begin{cases} M_m \dot{r}_m + C_m r_m = F_{op} + K \{d_s(t) r_s(t - T_s(t)) - r_m\} \\ M_s \dot{r}_s + C_s r_s = -F_{env} + K \{d_m(t) r_m(t - T_m(t)) - r_s\} \end{cases} \quad (12)$$

## 5 安定性解析

仮定 1- 5 が成り立つとき, 閉ループシステム (12) に対して次の定理が成り立つ.

**定理 1.** 時変の通信遅延を有するテレオペレーションシステム (12) を考える. このとき, 通信遅延の大きさとは独立に安定となり, 時変ゲインを介した出力信号の誤差の原点は漸近安定となる.

この定理より, 制御目的 1 が達成される.

*Proof.* 状態ベクトル  $x(t) = [r_m^T(t) \ r_s^T(t)]^T$  を用いて, システムの汎関数を次のように考える.

$$\begin{aligned} V(x, t) &= r_m^T(t) M_m r_m(t) + r_s^T(t) M_s r_s(t) \\ &+ \int_{t-T_m(t)}^t r_m^T(\xi) K r_m(\xi) d\xi + \int_{t-T_s(t)}^t r_s^T(\xi) K r_s(\xi) d\xi \\ &+ 2 \int_0^t \{F_{env}^T(\xi) r_s(\xi)\} d\xi + 2 \int_0^t \{-F_{op}^T(\xi) r_m(\xi)\} d\xi \end{aligned} \quad (13)$$

上式について, 特性 1 より 1, 2 項目は正定. 3, 4 項目は  $K$  が正定対角行列であるので正定. また, 5, 6 項目は仮定 1 より正定となる. よって,  $V$  は正定関数である.  $V$  を解軌道に沿って時間微分し, 特性 2 を用いることで次式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2d_s(t) r_m^T K r_s(t - T_s(t)) - 2r_m^T K r_m \\ &+ 2d_m(t) r_s^T K r_m(t - T_m(t)) - 2r_s^T K r_s \\ &+ r_m^T K r_m - (1 - \dot{T}_m(t)) r_m^T(t - T_m(t)) K r_m(t - T_m(t)) \\ &+ r_s^T K r_s - (1 - \dot{T}_s(t)) r_s^T(t - T_s(t)) K r_s(t - T_s(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで, 時変ゲイン  $d_m(t)$ ,  $d_s(t)$  に式 (11) を代入することで次式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2\sqrt{1 - \dot{T}_s(t)} r_m^T K r_s(t - T_s(t)) - 2r_m^T K r_m \\ &+ 2\sqrt{1 - \dot{T}_m(t)} r_s^T K r_m(t - T_m(t)) - 2r_s^T K r_s \\ &+ r_m^T K r_m - (1 - \dot{T}_m(t)) r_m^T(t - T_m(t)) K r_m(t - T_m(t)) \\ &+ r_s^T K r_s - (1 - \dot{T}_s(t)) r_s^T(t - T_s(t)) K r_s(t - T_s(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

簡単な変形により次式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\{r_m - d_s(t) r_s(t - T_s(t))\}^T K \{r_m - d_s(t) r_s(t - T_s(t))\} \\ &- \{r_s - d_m(t) r_m(t - T_m(t))\}^T K \{r_s - d_m(t) r_m(t - T_m(t))\} \end{aligned} \quad (16)$$

よって,  $r_m(t) - d_s(t) r_s(t - T_s(t))$ ,  $r_s(t) - d_m(t) r_m(t - T_m(t)) \in \mathcal{L}_2$  であることが分かる. また,  $\dot{V}$  は準負定であることから, リアプノフの安定定理より, システムの状態は  $r_m(t)$ ,  $r_s(t) \in \mathcal{L}_\infty$  である. また,  $r_i$  ( $i = m, s$ ) を入力として式 (8) のラプラス変換を行うと以下のような伝達関数が求まる.

$$Q_i(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+\lambda_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{s+\lambda_n} \end{bmatrix} R_i(s) \quad (17)$$

ただし,  $R_i(s)$  は  $r_i(t)$  を, また  $Q_i(s)$  は  $q_i(t)$  をラプラス変換したものである. 上式は厳密にプロパーで指数安定な伝達関数行列である. 従って,  $r_m(t)$ ,  $r_s(t) \in \mathcal{L}_\infty$  より  $\dot{q}_m(t)$ ,  $q_m(t)$ ,  $\dot{q}_s(t)$ ,  $q_s(t) \in \mathcal{L}_\infty$  であることが言える. よって, テレオペレーションシステム全体が安定となる.

また, 式 (10) から  $F_m$ ,  $F_s \in \mathcal{L}_\infty$  となることが分かる. さらに, 特性 1, 3 と式 (6), 式 (1) より  $\dot{q}_m$ ,  $\dot{q}_s \in \mathcal{L}_\infty$  である. よって,  $\dot{r}_m$ ,  $\dot{r}_s \in \mathcal{L}_\infty$  となる. 次に  $r_m(t) - d_s(t) r_s(t - T_s(t))$  の時間微分を計算すると次式のようになることが確認できる.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left\{ r_m(t) - \sqrt{1 - \dot{T}_s(t)} r_s(t - T_s(t)) \right\} \\ = \dot{r}_m(t) - \frac{1}{2} (1 - \dot{T}_s(t))^{-\frac{1}{2}} (-\ddot{T}_s(t)) r_s(t - T_s(t)) \\ - (1 - \dot{T}_s(t))^{\frac{3}{2}} \dot{r}_s(t - T_s(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

ここで, 仮定 3 と  $r_i, \dot{r}_i \in \mathcal{L}_\infty$  より

$\frac{d}{dt} \{r_m(t) - d_s(t) r_s(t - T_s(t))\} \in \mathcal{L}_\infty$ . 同様にして  $\frac{d}{dt} \{r_s(t) - d_m(t) r_m(t - T_m(t))\} \in \mathcal{L}_\infty$  が言えるので, 文献<sup>14)</sup>の補題を用いることで

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \{r_m(t) - d_s(t) r_s(t - T_s(t))\} \\ = \lim_{t \rightarrow \infty} \{r_s(t) - d_m(t) r_m(t - T_m(t))\} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

が成り立つ. これにより時変ゲインを介した出力信号の誤差の収束が言える.  $\square$

**注意 1.** 提案制御則では, 時変の通信遅延が通信路に存在する場合, 安定性は保証されているが, 位置誤差に



Fig. 2: Experimental setup



Fig. 3: Remote environment and slave

関しては式 (19) に示す出力信号に対する収束しか証明できていない。しかし、遅延が定数の場合には文献<sup>(11)</sup>と同様の制御則となり、マスタとスレーブの位置協調が達成され、静的な力伝達も達成される。つまり、本稿の結果は文献<sup>(11)</sup>に、さらに時変の通信遅延が存在する場合でもシステムが安定となることを付加したものとなっている。

注意 2. 提案制御則は文献<sup>(9, 10)</sup>と異なり設計パラメータがロボットの粘性摩擦や遅延の大きさに依存しない。よってこれらの値に依らず任意の値に設計することができるという利点がある。

注意 3. 文献<sup>(10)</sup>での安定条件を満たさないような遅延や設計パラメータを用いてシミュレーションや実験を行ったが、不安定となることは確認できなかった。しかし、本稿の提案制御則では、遅延の大きさに安定性が依存しないことが理論的に保証されていることに注意されたい。

注意 4. 提案制御則では文献<sup>(10)</sup>と異なり時変ゲインによって速度情報だけでなく位置情報についてもスケールリングされている。そのため、通信遅延が激しく変化するような状況では操作性や位置追従性が悪化することが考えられる。この問題は今後の課題とする。

## 6 制御実験による検証

本稿では Fig. 2 に示すような 2 台の直列リンク型平面 2 自由度ダイレクトドライブロボットを用いた制御実験により、提案制御則の有効性を検証する。制御則に用いるロボットのモデルとパラメータは以下の値を用いた。ただし、パラメータは同定実験によって得られた値である。また、動摩擦や重力の影響は無視できる

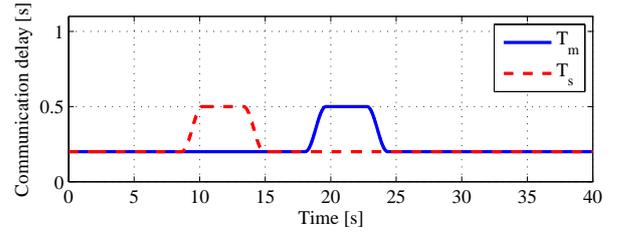


Fig. 4: Small time delay

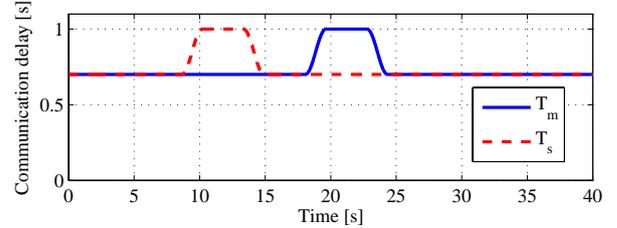


Fig. 5: Large time delay

ものとし補償は行っていない。

$$M_m = M_s = \begin{bmatrix} \theta_1 + 2\theta_3 \cos(q_2) & \theta_2 + \theta_3 \cos(q_2) \\ \theta_2 + \theta_3 \cos(q_2) & \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$C_m = C_s = \begin{bmatrix} -\theta_3 \sin(q_2) \dot{q}_2 & -\theta_3 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \theta_3 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = 0.366[\text{kgm}^2], \theta_2 = -0.0291[\text{kgm}^2], \theta_3 = 0.0227[\text{kgm}^2]$$

操縦者が加える力  $F_{op}$  と環境へ加える力  $F_{env}$  は力覚センサで直接計測する。また、スレーブの接触実験を行うときに用いる環境は Fig. 3 に示すように硬い壁を用いた。ロボットの制御はサンプリング時間を 2.5[ms] として制御ボード (dSPACE 社製 DS1104) を用いて行う。遅延の大きさと性能の関係について検証するために、遅延が小さい場合と大きい場合の 2 つの場合を考え、それぞれ Figs. 4, 5 のような遅延を制御ボード内に仮想的に与える。仮想的に与えた遅延が 9-15[s], 18-24[s] 付近で一時的に増加しているのは、インターネットのような通信路を用いた場合に、輻輳等によって通信遅延が想定した値より一時的に大きくなることを考慮したためである。

このとき、時変ゲイン  $d_m(t)$ ,  $d_s(t)$  は遅延が小さい場合、大きい場合とも Fig. 6 のようになる。

コントローラの設計パラメータは試行錯誤によって次のように設定した。

$$K = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 1.3 \end{bmatrix}, \Lambda = \begin{bmatrix} 5.7 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

制御実験の状況として以下の 2 通りを考える

Case 1 スレーブが環境と接触しない場合

Case 2 スレーブが環境と接触する場合

Fig. 4 の遅延を与えた場合の Case 1 の実験結果を Figs. 7, 8 に、Fig. 5 の遅延を与えた場合の Case 1 の実験結果を Figs. 11, 12 に示す。ただし、それぞれの図において、上図はマスタとスレーブの関節角度の時間応答を表しており、下図は操縦者によってマスタに与え

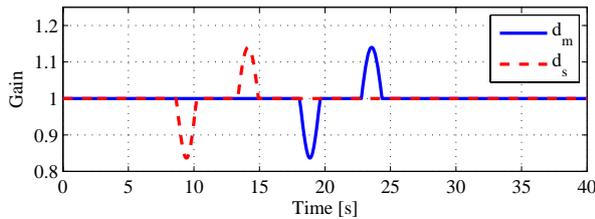


Fig. 6: Time varying gains

られるトルクの時間応答を表している。これらの図より遅延が小さい場合、大きい場合に関わらず安定となることが分かる。通信遅延が急激に増加するところにおいても安全に操作できていることが分かる。また、マスタの関節角度にスレーブの関節角度がほぼ追従していることも確認できる。これは文献<sup>11)</sup>に示されているように、通信遅延が定数となるところでは位置協調が達成されるためであると考えられる。しかし、Fig. 7とFig. 11, Fig. 8とFig. 12を比較すると、同様な軌道で操作しているにも関わらず、明らかに遅延が大きい場合の方が操縦者が加えるトルクが大きいことが分かる。これは通信遅延が大きい場合にはマスタの操作に大きな力が必要となり、操作性が劣化することを意味している。つまり、本稿の制御則は安定性は遅延の大きさに依存しないが、性能は大きく依存しており、通信遅延が大きい場合には性能が劣化してしまう。

次に、Fig. 4の遅延を与えた場合のCase 2の実験結果をFigs. 9, 10に、Fig. 5の遅延を与えた場合のCase 2の実験結果をFigs. 13, 14に示す。これらの結果より、遅延が小さい場合、大きい場合ともに環境と接触しても安定となることが分かる。また、操縦者がマスタに与えるトルクとスレーブが環境に与えるトルクがほぼ一致していることが分かる。これは、遅延が定数となっているところでは文献<sup>11)</sup>で示されているように静的な反力の伝達が実現されるためであると考えられる。

## 7 おわりに

本稿では時変の通信遅延を有するテレオペレーションに対して、遅延の大きさやロボットの粘性摩擦に依存しない制御則を提案した。提案した手法は定数遅延を扱っている文献<sup>11)</sup>の制御則において文献<sup>8, 9)</sup>と同様な遅延の変化率に依存した時変ゲインを用いたものである。これによって、安定条件が遅延の大きさに依存しないテレオペレーションを実現し、予期しない遅延の増加に対してもシステム全体が安定となる。提案した制御手法によってテレオペレーションシステム全体が安定となり、時変ゲインを介した出力信号の誤差の原点は漸近安定となることをリアプノフの安定定理に基づく安定性解析により示した。

さらに、2台の平面2自由度ダイレクトドライブロボットを用いた検証実験を行い、提案法の有効性を検証した。

## 参考文献

1) P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Trans. on Automatica*, Vol. 42, No. 12, pp. 2035-2057, 2006.

2) 汐月哲夫, "インターネットを介した双方向遠隔制御における伝達遅延問題," 計測と制御, Vol. 41, No. 7, pp. 507-512, 2002.

3) R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501, 1989.

4) T. Namerikawa and H. Kawada, "Symmetric Impedance Matched Teleoperation with Position Tracking," *Proc. of IEEE Conference on Decision & Control*, pp. 4496-4501, 2006.

5) 小菅一弘, 伊藤友孝, 難波入三, 福田敏男, "通信遅れを有するテレマニピュレーションシステムの受動性に基づく安定なパワースケーリング手法," 日本機械学会論文集, C編, Vol. 64, No. 621, pp. 304-309, 1998.

6) T. Inaida, Y. Yokokohji, T. Doi, M. Oda and T. Yoshikawa, "Ground-Space Bilateral Teleoperation of ETS-VII Robot Arm by Direct Bilateral Coupling Under 7-s Time Delay Condition," *Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 3, 2004.

7) D. Lee and M. W. Spong, "Passive Bilateral Teleoperation with Constant Time Delay," *Trans. on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 269-281, 2006.

8) R. Lozano, N. Chopra and M. W. Spong, "Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay," *Mechatronics'02*, 2002.

9) N. Chopra, M. W. Spong, S. Hirche and M. Buss, "Bilateral Teleoperation over the Internet: the Time Varying Problem," *Proc. of the 2003 American Control Conference*, pp.1443-1448, 2003.

10) H. Kawada and T. Namerikawa, "Bilateral Control of Nonlinear Teleoperation with Time Varying Communication Delays," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 189-194, 2008.

11) N. Chopra and M. W. Spong, "On Synchronization of Networked Passive Systems with Time Delays and Application to Bilateral Teleoperation," *Proc. of SICE An. Conf.*, pp. 3424-3429, 2005.

12) Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling - Formulation and Experiment," *Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, 1994.

13) C. Candas de Wit, B. Sciliano and G. Bastin, *Theory of Robot Control*, Springer, 1996.

14) G. Tao, "A Simple Alternative to the Barbalat Lemma," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 42, No. 5, pp. 698, 1994.

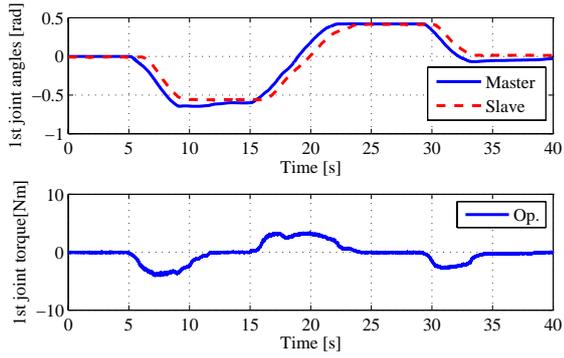


Fig. 7: Time responses at 1st joint in Case 1 (small time delays)

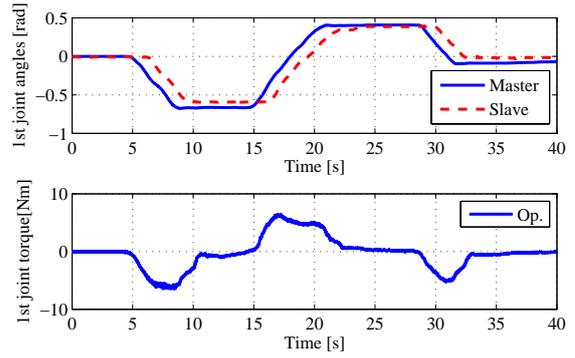


Fig. 11: Time responses at 1st joint in Case 1 (large time delays)

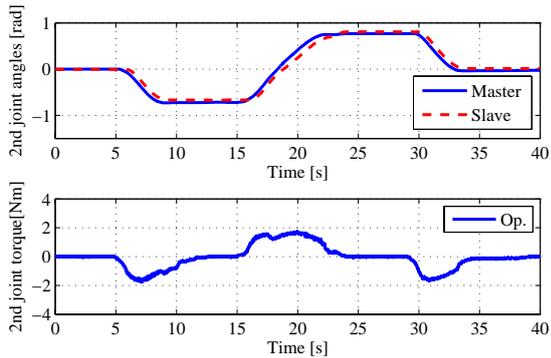


Fig. 8: Time responses at 2nd joint in Case 1 (small time delays)

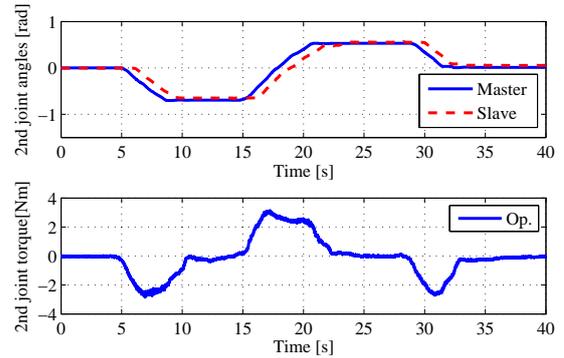


Fig. 12: Time responses at 2nd joint in Case 1 (large time delays)

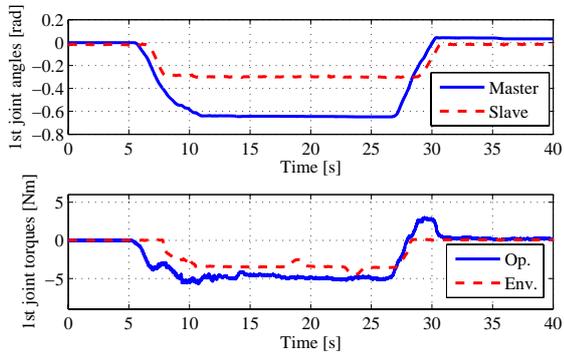


Fig. 9: Time responses at 1st joint in Case 2 (small time delays)

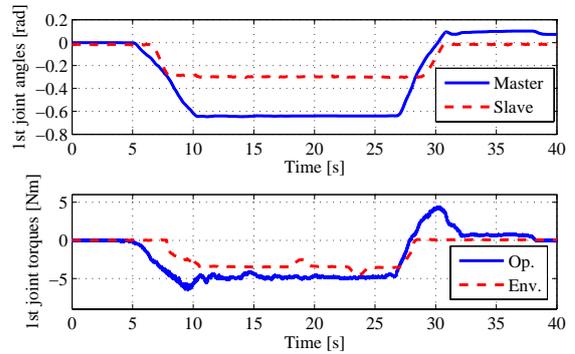


Fig. 13: Time responses at 1st joint in Case 2 (large time delays)

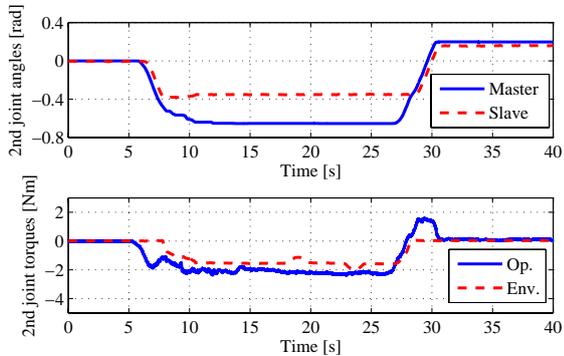


Fig. 10: Time responses at 2nd joint in Case 2 (small time delays)

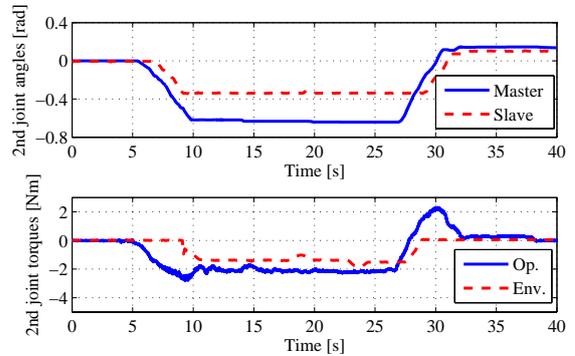


Fig. 14: Time responses at 2nd joint in Case 2 (large time delays)