通信遅延の変化率に依存しないテレオペレーション制御

滑川 徹　河田 久之輔　藤田 裕之　(金沢大学)

Bilateral Control of Teleoperation with Time Varying Delay : Independent of Rate of Time Delay Change

T. Namerikawa, H. Kawada and H. Fujita (Kanazawa University)

Abstract– This paper describes a bilateral control of nonlinear teleoperation with time varying communication delay. The proposed method are simple PD-type controllers which are independent of the rate of time delay change and depend on the upper bound of round-trip delay. The proposed control strategy is independent of parameter uncertainties of the model of the robots and the operator and remote environment. The delay-dependent stability of the origin is shown via Lyapunov stability Theorem. Furthermore the proposed strategy also achieves master-slave position coordination and bilateral static force reflection. Several experimental results show the effectiveness of our proposed strategy.

Key Words: Teleoperation, Time varying delay, Bilateral PD control, Rate of change of time varying delays

1　はじめに

テレオペレーションシステムとは, オペレータがマスタアームを操作することにより, 遠隔地のスレーブアームを操作するロボットシステムである．特に遠隔環境からスレーブに加わる力覚・触覚情報をマスタ側へ伝達することで，オペレータの操作支援をする制御法をバイラテラル制御という．テレオペレーションのバイラテラル制御に関しては極限環境での応用を目指して古くから研究されているが，近年のインターネットなどのデジタル情報通信技術の浸透を背景に，情報インフラを活用するテレオペレーションの理論・実験研究が更に精力的に行われている [1, 2].

制御理論の観点からは，この問題は一般に通信遅延を含む非線形フィードバック系の安定化問題として扱われ，定数遅延を考慮したテレオペレーションのバイラテラル制御については多くの結果が報告されている [3, 4]．一方通信遅延の変動を考慮した結果についても幾つかの報告があるが [5, 6]，まだ多くの課題がある．

文献 [5] では時変の通信遅延を考慮した時変ゲインを用いた制御則の提案と安定性解析が示されている．しかし, 遅延の変化率に対する制約が厳しいことと，時変ゲインの計算には遅延の変化率を直接計測する必要があり，現実的でない．文献 [6] では時変の通信遅延を考慮した定数ゲインを用いた制御則の提案が行われた．この方法は遅延の変化率を必要としないため，比較的実用的であるが，遅延の変化率に対する制約は依然として [5] と同様に厳しい．

そこで本稿では任意の遅延の変化率に対して安定性を保持する制御則を提案する．提案する制御則は文献 [6] の制御則において速度情報の交換を無くしたものであり，これにより，通信遅延の変化率に依存しないテレオペレーション制御を実現する．また提案制御則は通信遅延の大きさには依存し，最大往復遅延が制御則における比例ゲインの上限を規定する合理的な構造を有している．

さらにワイヤレス LAN を用いたバイラテラルテレオペレーションシステムを構築し, 制御実験により提案制御法の有効性を検証する．

2　テレオペレーションのダイナミクス

本研究では，Fig.1 に示すような 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通信遅延を有する通信路を介して結合しているシステムの安定化問題を扱う．

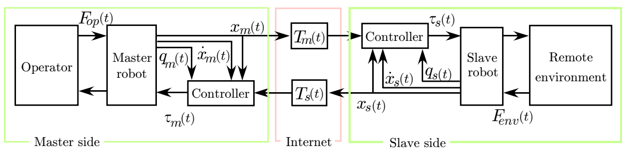


Fig. 1: Teleoperation System

本研究で扱うマスタロボット及びスレーブロボットのダイナミクスは，一般的な n 自由度を有するロボットとして，以下の式で表されるとする．

$$\begin{cases} \boldsymbol{M_m}(\boldsymbol{q_m})\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}} + \boldsymbol{C_m}(\boldsymbol{q_m}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}} + \boldsymbol{g_m}(\boldsymbol{q_m}) = \boldsymbol{\tau_m} + \boldsymbol{J_m^T F_{op}} \\ \boldsymbol{M_s}(\boldsymbol{q_s})\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{C_s}(\boldsymbol{q_s}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{g_s}(\boldsymbol{q_s}) = \boldsymbol{\tau_s} - \boldsymbol{J_s^T F_{env}} \end{cases} \tag{1}$$

ここで, 添え字 m はマスタ, s はスレーブロボットを表しており, $\boldsymbol{q_i}$ $(i = m, s)$ は関節角度, $\boldsymbol{\tau_i}$ $(i = m, s)$ は入力トルク, $\boldsymbol{F_{op}}$ は操縦者からマスタロボットの手先にかかる力, $\boldsymbol{F_{env}}$ はスレーブロボットの手先が環境へ加える力, $\boldsymbol{M_i}(\boldsymbol{q_i})$ $(i = m, s)$ は慣性行列, $\boldsymbol{C_i}(\boldsymbol{q_i}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}$ $(i = m, s)$ はコリオリ力及び遠心力項, $\boldsymbol{g_i}(\boldsymbol{q_i})$ $(i = m, s)$ は重力項, $\boldsymbol{J_i}(\boldsymbol{q_i})$ $(i = m, s)$ はヤコビアンである．ここで, ヤコビアンについて以下の仮定をおく．

仮定 1. ヤコビアン $\boldsymbol{J_i}(i = m, s)$ は正則である．

ロボットの関節角度 $\boldsymbol{q_i}$ $(i = m, s)$ と手先位置 $\boldsymbol{x_i}$ $(i = m, s)$ の間には次の関係があることが知られている．

$$\boldsymbol{x_i} = \boldsymbol{f_i}(\boldsymbol{q_i}) \quad (\boldsymbol{f_i}\text{はある関数}) \tag{2}$$

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{J_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} \tag{3}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{J_i}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{i}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} \quad (i = m, s) \tag{4}$$

この関係式を用いて式 (1) の関節空間におけるロボットダイナミクスを作業空間におけるダイナミクスに変換する．また以降では $\boldsymbol{q_i}$, $\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}$ の関数であることを表す $(\boldsymbol{q_i}), (\boldsymbol{q_i}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}})$ は省略する．

$$\boldsymbol{M_{em}} = \boldsymbol{J_m^{-T} M_m J_m^{-1}} \quad (5)$$
$$\boldsymbol{M_{es}} = \boldsymbol{J_s^{-T} M_s J_s^{-1}} \quad (6)$$
$$\boldsymbol{C_{em}} = \boldsymbol{J_m^{-T}(C_m - M_m J_m^{-1} \dot{J}_m) J_m^{-1}} \quad (7)$$
$$\boldsymbol{C_{es}} = \boldsymbol{J_s^{-T}(C_s - M_s J_s^{-1} \dot{J}_s) J_s^{-1}} \quad (8)$$
$$\boldsymbol{g_{em}} = \boldsymbol{J_m^{-T} g_m} \quad (9)$$
$$\boldsymbol{g_{es}} = \boldsymbol{J_s^{-T} g_s} \quad (10)$$

作業空間におけるロボットのダイナミクスは次式となる.

$$\begin{cases} \boldsymbol{M_{em}\ddot{x}_m + C_{em}\dot{x}_m + g_{em} = J_m^{-T}\tau_m + F_{op}} \\ \boldsymbol{M_{es}\ddot{x}_s + C_{es}\dot{x}_s + g_{es} = J_s^{-T}\tau_s - F_{env}} \end{cases} \quad (11)$$

上式のロボットダイナミクスは次の特性を有することが知られている [7].

特性 1. $\boldsymbol{M_{ei}}$ $(i = m, s)$ は正定行列となる.

特性 2. $\boldsymbol{N_{ei}} = \dot{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{ei}} - 2\boldsymbol{C_{ei}}$ $(i = m, s)$ は歪対称行列となる.

特性 3. 適当な定数 m_{1em}, m_{2em}, m_{1es}, m_{2es}, c_{em},c_{es}, g_{em}, g_{es} が存在して, 次の関係が成立する.

$$0 < m_{1ei} \leq \| \boldsymbol{M_{ei}} \| \leq m_{2ei} < \infty \quad (12)$$
$$\| \boldsymbol{C_{ei}} \| \leq c_{ei} \| \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} \| \quad (13)$$
$$\| \boldsymbol{g_{ei}} \| \leq g_{ei} \ (i = m, s) \quad (14)$$

次に, 操縦者は一定の力を与え続けるとして以下のような定数入力とする.

$$\boldsymbol{F_{op}}(t) = \bar{\boldsymbol{F}}_{\boldsymbol{op}} \quad (15)$$

ここで $\bar{\boldsymbol{F}}_{\boldsymbol{op}} \in \mathcal{R}^{n\times n}$ であり有限であるとする. 次に遠隔環境は次式で表されるような線形システムとする.

$$\boldsymbol{F_{env}}(t) = \boldsymbol{B_e}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t) + \boldsymbol{K_e x_s}(t) \quad (16)$$

ここで, $\boldsymbol{B_e}$, $\boldsymbol{K_e} \in \mathcal{R}^{n\times n}$ は正定対称行列で, それぞれ遠隔環境の粘性摩擦係数と剛性係数である.

マスタとスレーブ間の通信路については時変な遅延が発生するものとし, マスタからスレーブまでの遅延を $T_m(t)$, スレーブからマスタまでの遅延を $T_s(t)$ とする. ただし, パケットロス等の現象は扱わないとする. この遅延時間 $T_m(t)$, $T_s(t)$ に対して以下を仮定する.

仮定 2. 通信遅延 $T_m(t)$, $T_s(t)$ は時間に関して微分可能な連続関数であり, 次式を満たす.

$$0 \leq T_i(t) \leq T_i^+ < \infty \quad i = m, s \quad (17)$$

ここで, $T_i^+ \in \mathcal{R}$ は遅延の最大値であり定数であるとする. また, 通信路の最大往復時間 $T_{ms}^+ = T_m^+ + T_s^+$ は既知であるとする.

仮定 3. 全ての信号は拡張 $\mathcal{L}_2$ 空間に属している.

仮定 4. マスタとスレーブの速度は $t < 0$ において $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} = \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0$ である.

3 制御目的

制御目的を以下のように設定する.

制御目的 1. 任意の時変の通信遅延に対して安定である.

制御目的 2. 定常状態 $t \to \infty$ において操縦者が力を加えず, 環境との接触がないとき位置誤差 $\boldsymbol{x_e}(t)$ が零となる.

$$\boldsymbol{x_e}(t) = \boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{x_s} \to 0 \quad as \quad t \to \infty, \quad (18)$$

制御目的 3. 定常状態 $t \to \infty$ において環境からの反力が操縦者に正確に伝達される.

$$\boldsymbol{F_{op}} = \boldsymbol{F_{env}} \quad (19)$$

4 制御則

制御目的の達成のため, 次の制御則を考える.

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau_m} = \boldsymbol{J_m^T}[-\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} + \boldsymbol{K_p}\{\boldsymbol{x_s}(t - T_s(t)) - \boldsymbol{x_m}\} + \boldsymbol{g_{em}}] \\ \boldsymbol{\tau_s} = \boldsymbol{J_s^T}[-\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{K_p}\{\boldsymbol{x_m}(t - T_m(t)) - \boldsymbol{x_s}\} + \boldsymbol{g_{es}}] \end{cases} \quad (20)$$

ただし, $\boldsymbol{D_p}$, $\boldsymbol{K_p} \in \mathcal{R}^{n\times n}$ は正定対角行列である. ここで右辺の括弧内第 1 項は安定化のためのダンピングであり, 第 2 項は位置制御則, 第 3 項は重力補償のための要素である.

5 安定性解析

安定性解析を容易にするためにマスタロボット, スレーブロボットの位置の平衡点 $\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$, $\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ を任意の定数として次式のように定義する.

$$\bar{\boldsymbol{F}}_{\boldsymbol{op}} = \boldsymbol{K_p}(\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}) \quad (21)$$
$$0 = \boldsymbol{K_e}\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} - \boldsymbol{K_p}(\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{s}) \quad (22)$$

次にこの平衡点が原点となるような新しい位置の変数を次式のように定義する.

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t) = \boldsymbol{x_m}(t) - \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} \quad (23)$$
$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t) = \boldsymbol{x_s}(t) - \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \quad (24)$$

作業空間におけるテレオペレーションのダイナミクスの式 (11) に式 (15), (16), (21), (22), 式 (23), (24) を代入, 整理すると次式の閉ループシステムを得る.

$$\begin{cases} \boldsymbol{M_{em}\ddot{x}_m + C_{em}\dot{x}_m} \\ \quad = -\boldsymbol{D_p}\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_{\boldsymbol{m}} + \boldsymbol{K_p}\{\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t - T_s(t)) - \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}\} \\ \boldsymbol{M_{es}\ddot{x}_s + C_{es}\dot{x}_s} \\ \quad = -\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{K_p}\{\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t - T_m(t)) - \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}\} \\ \quad\quad - \boldsymbol{B_e}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} - \boldsymbol{K_e}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \end{cases} \quad (25)$$

ここで, 次の定理が成り立つ.

定理 1. 式 *(25)* に示されたテレオペレーションシステムを考える. **仮定** *1~4* が成立しゲイン $\boldsymbol{K_p}$ が次式を満たすとする.

$$\boldsymbol{K_p} < \frac{2}{T_{ms}^+}\boldsymbol{D_p} \quad (26)$$

このとき $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}$, $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$, $\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}$, $\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ は平衡点において漸近安定となる.

上述の定理では遅延の変化率に依存しない. そのため任意の変化率の遅延に対して安定となる. つまり, **制御目的** *1* が達成される.

Proof. 状態 $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}, \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ を用いてシステムのリアプノフ関数候補を次式のように定義する.

$$\begin{aligned} V_{ms}(x,t) &= \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}^T(t)\boldsymbol{M_{em}}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t) + \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^T(t)\boldsymbol{M_{es}}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t) \\ &+ \{\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t) - \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t)\}^T\boldsymbol{K_p}\{\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t) - \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t)\} \\ &+ \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^T(t)\boldsymbol{K_e}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t) \end{aligned} \tag{27}$$

特性 1 より $\boldsymbol{M_{em}}, \boldsymbol{M_{es}}, \boldsymbol{K_p}, \boldsymbol{K_e}$ は正定であり，関数 V_{ms} は正定である.

次に, システム (25) の解軌道に沿って V_{ms} を時間微分し**特性 2** を用いて整理すると次式となる.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} &= -2\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} - 2\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} - 2\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{B_e}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \\ &-2\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K_p}\int_0^{T_s(t)}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t-\xi)d\xi \\ &-2\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K_p}\int_0^{T_m(t)}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t-\xi)d\xi \end{aligned} \tag{28}$$

両辺を $[0, t_f]$ で積分すると次式となる.

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f}\dot{V}_{ms}d\tau &= -2\int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}d\tau - 2\int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{D_p}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}d\tau \\ &-2\int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{B_e}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}d\tau \\ &-2\int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K_p}\int_0^{T_s(\tau)}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(\tau-\xi)d\xi d\tau \\ &-2\int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K_p}\int_0^{T_m(\tau)}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(\tau-\xi)d\xi d\tau \end{aligned} \tag{29}$$

式 (29) の右辺第 4，5 項に対して，シュワルツの不等式および**仮定 2**，**仮定 4** を用いて整理すると，次式が得られる.

$$\begin{aligned} &\int_0^{t_f}\dot{V}_{ms}d\tau \\ &\leq -2\int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{B_e}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}d\tau - \int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}^{\boldsymbol{T}}\left\{2\boldsymbol{D_p} - T_{ms}^{+}\boldsymbol{K_p}\right\}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}d\tau \\ &\quad - \int_0^{t_f}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{T}}\left\{2\boldsymbol{D_p} - T_{ms}^{+}\boldsymbol{K_p}\right\}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}d\tau \end{aligned} \tag{30}$$

ここで, B_e は正定であるので式 (26) を満足するような K_p, D_p を選択することで式 (30) は準負定となる．リアプノフの安定定理より, $V_{ms}(x(t)) > 0$ で $\dot{V}_{ms}(x(t)) \leq 0$ なのでシステムは安定となる.

状態 $\boldsymbol{x(t)} = [\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}\ \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}\ \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}\ \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}]$ は有界となり, Barbalat の補題を用いることで最終的に $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}, \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ が漸近安定であることが示される.

以上より $t \to \infty$ において閉ループシステム (25) は次式となる.

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t - T_s(t)) - \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} = 0 \tag{31}$$

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t - T_m(t)) - \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{K_p^{-1}}\boldsymbol{K_e}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \tag{32}$$

上式に次の関係式

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t - T_i(t)) = \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) - \int_{t-T_i}^{t}\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_{\boldsymbol{i}}dt \qquad i = m, s \tag{33}$$

を代入すると次式が得られる.

$$\boldsymbol{K_p^{-1}}\boldsymbol{K_e}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0 \quad as \quad t \to \infty \tag{34}$$

$\boldsymbol{K_p}, \boldsymbol{K_e}$ は正定であるので $\lim_{t\to\infty}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} = \lim_{t\to\infty}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0$ となる．以上よりシステムの平衡点 $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}, \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ は漸近安定である．つまりマスタとスレーブの位置は $\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x_m} = \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x_s} = \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ となる. □

上述の定理から以下の**系 1** を導くことが出来る.

系 1. *(11), (25)* に表されるテレオペレーションシステムについて**仮定 *1-4*** が成り立ち, *(26)* の条件が成立するとき以下が成立する.

(1) 定常状態 $t \to \infty$ において, $\boldsymbol{F_{op}} = 0$, $\boldsymbol{F_{env}} = 0$ を満たすとき位置誤差 $\boldsymbol{x_e}$ は零になる.

Proof. $\boldsymbol{F_{op}} = 0, \boldsymbol{F_{env}} = 0$ を満たすとき式 (21), (16) より次式となる.

$$\boldsymbol{F_{op}} = \boldsymbol{K_p}(\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}) = 0 \tag{35}$$

$$\boldsymbol{F_{env}} = \boldsymbol{B_e}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}\boldsymbol{(t)} + \boldsymbol{K_e}\boldsymbol{x_s}(t) = 0 \tag{36}$$

定理 1 より $\lim_{t\to\infty}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0$, $\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x_s} = \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ であるので式 (36) は

$$\boldsymbol{F_{env}} = \boldsymbol{K_e}\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0 \tag{37}$$

上式を (22) 式に代入すると

$$\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0 \tag{38}$$

従ってマスタとスレーブの位置誤差 $\boldsymbol{x_e}$ は零になる. □

(2) 定常状態 $t \to \infty$ において次式のような力の反射が達成される.

$$\boldsymbol{F_{op}} = \boldsymbol{F_{env}} \tag{39}$$

Proof. **定理 1** より $\lim_{t\to\infty}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} = 0$, $\lim_{t\to\infty}\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = 0$, $\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x_m} = \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}$, $\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x_s} = \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}$ が成立するので式 (16), (21), (22) より

$$\boldsymbol{F_{env}} = \boldsymbol{K_e}\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{K_p}(\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}) = \boldsymbol{F_{op}} \tag{40}$$

となる. □

定理 1，および**系 1 (1)-(2)** は，それぞれ**制御目的 1, 2, 3** に対応しており，これより，提案制御則によって 3 節の 3 つの制御目的が達成されていることが分かる.

6　制御実験による検証

本研究では Fig.2 に示すような 2 自由度のジョイスティックをマスタ, 平行リンク型 2 自由度マニピュレータをスレーブとするテレオペレーションシステムを構築した.

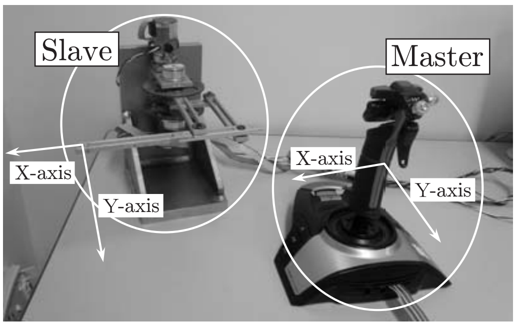


Fig. 2: Experimental Setup

また, 通信機器としてワイヤレス LAN を使用し, 実験室内のアクセスポイントを経由してマスターとスレー

ブが通信を行う．また通信プロトコルには UDP を用い，パケットロスが生じた場合には 1 サンプル前のデータを用いて補完する．ある平日の夜間に測定した往復遅延時間 T_{ms} を Fig.3 に示す．

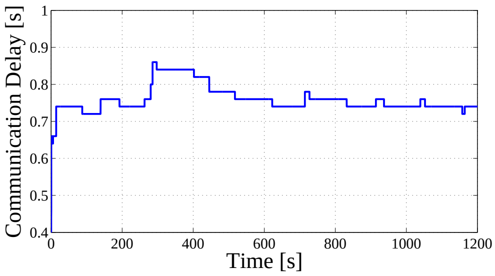


Fig. 3: Round trip delay

Fig.3 より最大往復遅延時間は約 0.86[s] であることが分かる．そこで $T_{ms}^{+} = 0.9$ とし，設計パラメータを式 (15) を満足する範囲で以下のように与えた．

$$\boldsymbol{K_p} = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{D_p} = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \tag{41}$$

制御実験として次の 2 種類の状況について制御則を検証する．

- **Case 1**：スレーブが環境との接触がない場合
- **Case 2**：スレーブが環境と接触する場合

Case 1 の実験結果を Fig.4 に，**Case 2** の実験結果を Fig.5 に示す．ここで $\boldsymbol{F_{op}}$, $\boldsymbol{F_{env}}$ は入力トルクから推定している．Fig.4 よりスレーブはマスタに追従していることが分かる．また，Fig.5 より定常状態において $\boldsymbol{F_{op}} = \boldsymbol{F_{env}}$ となっていることが確認できる．

7 おわりに

本稿では任意の遅延の変化率に対して安定性を保持する制御則を提案した．提案する制御則は文献 [6] の制御則において速度情報の交換を無くしたものであり，これにより，通信遅延の変化率に依存しないテレオペレーション制御を実現した．

さらにワイヤレス LAN を用いたバイラテラルテレオペレーションシステムを構築し，制御実験により提案制御法の有効性を示した．

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] M. Ferre, M. Buss, R. Aracil C. Melchiorri and C. Balaguer, *Advances in Telerobotics*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 31, 2007.

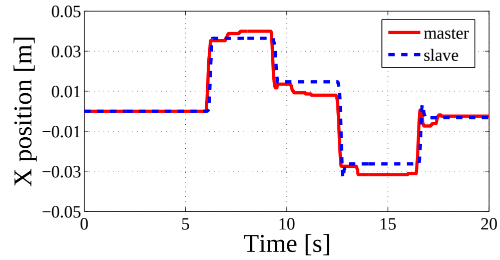
[3] R.J. Anderson and M.W. Spong, “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.34, No.5, pp.494-501, 1989.

[4] D. Lee and M.W. Spong, “Passive Bilateral Teleoperation with Constant Time Delay,” *IEEE Trans. on Robotics*, Vol.22, No.2, pp.269-281, 2006.

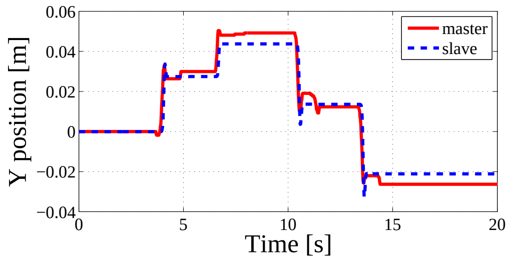
[5] N. Chopra, M.W. Spong, S. Hirche and M. Buss, “Bilateral Teleoperation over the Internet : The Time Varying Delay Problem,” *Proc. of the 2003 American Control Conference*, pp. 1443-1448, 2003.

[6] 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バイラテラル制御,” SICE 第 36 回制御理論シンポジウム, pp. 499-502, 2007.

[7] M.W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, John Wiley & Sons, 2006.

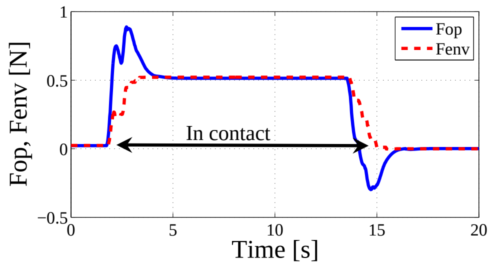


X-Axis

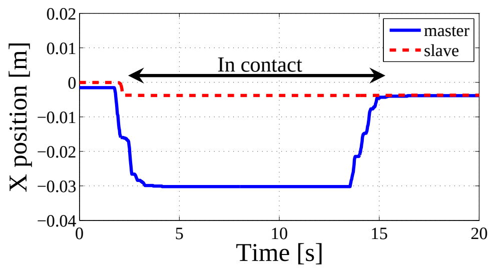


Y-Axis

Fig. 4: Time Responses in Case 1 (without any contact to environment)



Force Responses



Position Responses

Fig. 5: Time Responses in Case 2 (Slave contacts environment)