異構造を考慮したテレオペレーションの同調制御

Synchronized Control for Teleoperation with Different Configurations

○吉田　航瑛（金沢大），河田　久之輔（金沢大），正　滑川　徹（金沢大）

Kouei YOSHIDA, Kanazawa University, Kakumamachi, Ishikawa, 920-1192
Hisanosuke KAWADA, Kanazawa University, Kakumamachi, Ishikawa, 920-1192
Toru NAMERIKAWA, Kanazawa University, Kakumamachi, Ishikawa, 920-1192

Abstract: This paper deals with a synchronized control of teleoperation system with different configurations and communication delay. We propose the passivity-based synchronized control method with individual controller gains for master and slave arm considering different configurations and force scaling. The force scaling effect can be independent of position scaling effect by using this method. The asymptotic stability of our teleoperation is proven by using a passivity of the systems and Lyapunov stability methods. Experimental results show the effectiveness of our proposed teleoperation.

Key Words: *Teleoperation with different configurations, Synchronization, Communication delay, Scaling, Individual controller gain*

1. はじめに

テレオペレーションシステムとは, 遠隔地に対して人間の操作能力や感覚を拡張するロボットシステムのことである. 一般的にロボットアームを用いたテレオペレーションはオペレータが直接操作するマスタアームと, これに追従して実際に遠隔環境で作業するスレーブアームから構成される. 作業能力を向上する上で, スレーブに加わる遠隔環境からの接触力をマスタを介して操縦者に伝えることが必要である. このように双方向に制御することをバイラテラル制御という.

テレオペレーションが必要となる様々な作業では, マスタ, スレーブはそれぞれ人間, 作業内容に適した構造やスケールであることが望ましい [1]. 構造, スケールの異なるマスタとスレーブでテレオペレーションを構成することにより, 人が直接行うことができない微細作業および大きな物体を扱う作業を可能にすることが期待される. このような異構造テレオペレーションでは, マスタとスレーブの運動と力がそれぞれに適したスケールで制御されなければならない. そこで, マスタとスレーブ間でのスケーリングを考慮する必要がある. また, バイラテラルテレオペレーションシステムでは, マスタとスレーブが通信路によって結合されており, その間でデータを伝達するときに遅延が生じる. この遅延はシステム全体を不安定化させることがよく知られており [2], 通信遅延に対する安定性を保証する必要がある.

このように, 通信遅延を有する異構造テレオペレーションでは通信遅延に対する安定性を保証しつつ, 適切にスケーリングされるように制御を行う必要がある. 文献 [3] では, スキャッタリング変換 [2] を用いた制御法に対して, スケーリングを行った場合にも安定に制御できることを示しているが, 位置誤差が残るという問題がある. 文献 [4, 5] では通信遅延を有するネットワークによって結合された受動的なシステムに対してグラフ理論に基づく同調制御則が提案された. 簡単な制御則により複数のエージェントが互いに同調することが示され, この結果を応用することで通信遅延を有するテレオペレーションの漸近安定性が示された. さらに, 同調制御則に対するスケーリング要素の導入は文献 [6, 7] で提案された. しかしこれらの文献では, マスタとスレーブのゲインが同一でなければならない条件や, スケーリングの大きさを位置と力で独立に設定できないという問題がある. ゲインを同一にしなければならない条件により, 構造の異なるマスタとスレーブ両方に適切なゲインを設定できない場合がある. 設定したゲインが適切なゲインより小さい場合は外乱などの影響を受けて追従誤差が残り, 大きい場合はアクチュエータの定格を超えるなどの問題が生じる. また, 位置と力のスケーリングの大きさは, 反力を感じやすくしたり, パワーアシストを実現するために独立に設定できることが望ましい.

本稿の目的は, 通信遅延を有する異構造テレオペレーションに対して, 漸近安定性を保証した受動性に基づく同調制御手法を提案することである. 本稿では, 文献 [7] の制御手法における同調制御則のマスタおよびスレーブのゲインを, 異構造を考慮して独立に設計できるコントローラを提案する. これにより, 従来法でみられた追従誤差を少なくすることができる. また, 位置と力のスケーリングの大きさを独立に設定することができる. リアプノフの安定法を用いることで, 提案するテレオペレーションが漸近安定となることを示す. 更に, 構造とスケールの異なる 2 台の 2 自由度アームを用いた実験により, 提案手法の有効性を示す.

2. テレオペレーションのダイナミクス

一般的な n 自由度ロボットのダイナミクスからテレオペレーションのダイナミクスは次式で与えられる.

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

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, $\boldsymbol{q_m}$, $\boldsymbol{q_s} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ は関節角度, $\boldsymbol{\tau_m}$, $\boldsymbol{\tau_s} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ は入力トルク, $\boldsymbol{F_{op}} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ は操縦者からマスタロボットの手先にかかる力, $\boldsymbol{F_{env}} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ はスレーブロボットの手先が環境へ加える力, $\boldsymbol{M_m}(\boldsymbol{q_m})$, $\boldsymbol{M_s}(\boldsymbol{q_s}) \in \mathcal{R}^{n\times n}$ は慣性行列, $\boldsymbol{C_m}(\boldsymbol{q_m}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}}$, $\boldsymbol{C_s}(\boldsymbol{q_s}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ はコリオリ力及び遠心力, $\boldsymbol{g_m}(\boldsymbol{q_m})$, $\boldsymbol{g_s}(\boldsymbol{q_s}) \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ は重力項である. $\boldsymbol{J_m}(\boldsymbol{q_m})$, $\boldsymbol{J_s}(\boldsymbol{q_s}) \in \mathcal{R}^{n\times n}$ はヤコビアンで, 次式のようにマスタ, スレーブの手先位置姿勢速度 $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ と関節角速度を関係づけ,

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{J_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} \qquad (i = m, s) \tag{2}$$

さらに次の仮定が成り立つとする.

仮定 1. ヤコビアン $\boldsymbol{J_m}, \boldsymbol{J_s}$ は正則である.

異構造テレオペレーションにおいては, 関節空間における制御 (各関節角度を追従させる制御) ではなく作業空間における制御 (手先の位置姿勢を追従させる制御) を行う必要がある. そこで, (2) とその微分

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{J_i}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\boldsymbol{i}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} \qquad (i = m, s) \tag{3}$$

を用いて, (1) のダイナミクスを作業空間における表現へ変換すると次式のようになる [8].

$$\begin{cases} \widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{q_m})\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} + \widetilde{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{q_m}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}})\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}} + \widetilde{\boldsymbol{g}}_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{q_m}) = \boldsymbol{J_m^{-T}\tau_m} + \boldsymbol{F_{op}} \\ \widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{s}}(\boldsymbol{q_s})\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} + \widetilde{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{s}}(\boldsymbol{q_s}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}})\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} + \widetilde{\boldsymbol{g}}_{\boldsymbol{s}}(\boldsymbol{q_s}) = \boldsymbol{J_s^{-T}\tau_s} - \boldsymbol{F_{env}} \end{cases} \tag{4}$$

ただし,

$$\begin{aligned}\widetilde{M}_i &= J_i^{-T} M_i J_i^{-1} \\ \widetilde{C}_i &= J_i^{-T}(C_i - M_i J_i^{-1}\dot{J}_i)J_i^{-1} \\ \widetilde{g}_i &= J_i^{-T} g_i \quad (i=m,s)\end{aligned} \tag{5}$$

である. 作業空間における (4) のダイナミクスは, (1) と同様に次の特性 1, 2 を有する [8].

特性 1. 仮定 1 が成り立つ場合, $\widetilde{M}_m(q_m)$, $\widetilde{M}_s(q_s)$ は正定行列. また, 適当な定数 $m_{i1}, m_{i2} (i=m,s)$ が存在して次式が成り立つ.

$$0 < m_{i1}I \le \widetilde{M}_i(q_i) \le m_{i2}I \ \ (i=m,s) \tag{6}$$

特性 2. $\widetilde{N}_i = \dot{\widetilde{M}}_i(q_i) - 2\widetilde{C}_i(q_i,\dot{q}_i)\ (i=m,s)$ は次のような歪対称行列となる.

$$z^T\widetilde{N}_i z = 0 \ \ (i=m,s) \tag{7}$$

3. 制御目的

スケーリングと通信遅延を考慮したテレオペレーションの実現のために, まず, スケーリングと通信遅延を考慮した位置誤差を次のように定義する.

$$\begin{cases} e_m(t) = \alpha^{-1}x_s(t-T) - x_m(t) \\ e_s(t) = \alpha x_m(t-T) - x_s(t)\end{cases} \tag{8}$$

ここで, $\alpha > 0 \in \mathcal{R}$ をスケーリング要素, T を通信遅延時間 (定数) としている. 本稿における制御目的を以下に定義する.

制御目的：同調の達成 (Synchronization)

制御目的はテレオペレーションが同調, つまり以下が成り立つことである.

$$\begin{cases} e_i(t) \ \to \ 0 \ \ as \ \ t \ \to \ \infty \quad (i=m,s) \\ \dot{e}_i(t) \ \to \ 0 \ \ as \ \ t \ \to \ \infty \quad (i=m,s)\end{cases} \tag{9}$$

4. 制御則

4-1. 非線形フィードバックによる受動化　提案する手法では, まず入力トルクを次のように与え, 非線形フィードバックによる位置信号の受動化 [4,5] を行う.

$$\begin{cases} \tau_m = J_m^T\{-\widetilde{M}_m(q_m)\Lambda\dot{x}_m - \widetilde{C}_m(q_m,\dot{q}_m)\Lambda x_m + \widetilde{g}_m(q_m) + F_m\} \\ \tau_s = J_s^T\{-\widetilde{M}_s(q_s)\Lambda\dot{x}_s - \widetilde{C}_s(q_s,\dot{q}_s)\Lambda x_s + \widetilde{g}_s(q_s) + F_s\}\end{cases} \tag{10}$$

ここで, Λ は正定対角行列, $F_m, \ F_s$ は後述の同調制御からの入力である. (10) を (4) へ代入すると次のようになる.

$$\begin{cases} \widetilde{M}_m(q_m)\dot{r}_m + \widetilde{C}_m(q_m,\dot{q}_m)r_m = F_{op} + F_m \\ \widetilde{M}_s(q_s)\dot{r}_s + \widetilde{C}_s(q_s,\dot{q}_s)r_s = -F_{env} + F_s\end{cases} \tag{11}$$

ここで, r_m, r_s はマスタ及びスレーブロボットの出力変数で次式で定義される.

$$\begin{cases} r_m = \dot{x}_m + \Lambda x_m \\ r_s = \dot{x}_s + \Lambda x_s\end{cases} \tag{12}$$

非線形フィードバックによる受動化を行ったダイナミクス (11) に関して, 文献 [4,5] と同様に次の補題 1 が成り立っている.

補題 1. (11) 式に対して入力を $F'_m = F_m + F_{op}$, $F'_s = F_s - F_{env}$ 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それぞれ次の受動性が成り立つ.

$$\int_0^t r_i^T(\tau)F'_i(\tau)d\tau \ge -\beta \quad (i=m,s) \tag{13}$$

ここで β はある非負定数である.

Proof. 次の正定関数を考える.

$$V_i(r_i(t)) = \frac{1}{2}r_i^T\widetilde{M}_i r_i \qquad (i=m,s) \tag{14}$$

この正定関数を微分すると次のようになる.

$$\begin{aligned}\dot{V}_i(r_i(t)) &= \frac{1}{2}r_i^T\dot{\widetilde{M}}_i r_i + r_i^T\widetilde{M}_i\dot{r}_i \\ &= \frac{1}{2}r_i^T\{\dot{\widetilde{M}}_i - 2\widetilde{C}_i\}r_i + r_i^T F'_i = r_i^T F'_i\end{aligned} \tag{15}$$

よって,

$$\int_0^t r_i^T(\tau)F'_i(\tau)d\tau = V(r_i(t)) - V(r_i(0)) \ge -V(r_i(0)) \tag{16}$$

が成り立つ. □

フィードバックによる受動化を行ったマスタとスレーブのブロック図を Fig. 1 に示し, それぞれ Master+FP, Slave+FP と表す.

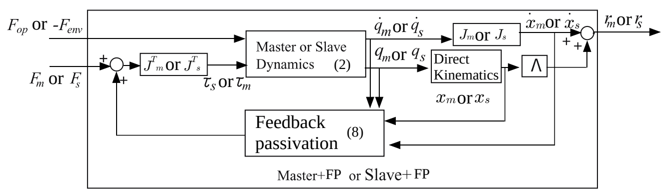


Fig. 1　The master and slave dynamics with feedback passivation

このように, 位置と速度の情報を含む出力に対してマスタ及びスレーブが受動性を保証することになる. 従って r_m, r_s を用いることで位置と速度に対して受動性に基づいた制御を行うことができる.

4-2. 異構造を考慮した同調制御則　異構造を考慮した同調制御則として制御入力 F_m, F_s を次式で与える.

$$\begin{cases} F_m(t) = K_m(\alpha^{-1}r_s(t-T) - r_m(t)) \\ F_s(t) = K_s(\alpha r_m(t-T) - r_s(t))\end{cases} \tag{17}$$

ここで, K_m, K_s は次式が成り立つように定める.

$$\begin{cases} K_m = k_m K \\ K_s = k_s K\end{cases} \tag{18}$$

ここで, $K > 0$ は各軸方向に対するゲインを設定する正定対角行列, $k_m > 0$, $k_s > 0$ はマスタとスレーブのゲインを独立に設定するためのスカラの定数ゲインである. 従来法 [7] では, $K_m = K_s = K$ というようにゲインが同一であったが, (17) のようにゲインを独立に設定することによって, マスタ・スレーブそれぞれに適した同調制御則のゲインを定めることができる. この同調制御則のブロック図を Fig. 2 に示す.

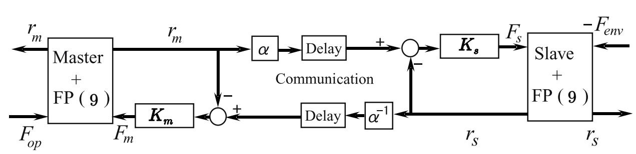


Fig. 2　The synchronized control architecture

5. 安定性解析

提案する制御構造の安定性解析を行う．ここでは, 仮定 1 と以下の仮定 2〜4 が成り立つとする．

仮定 2. 人間と環境は $\boldsymbol{r_m}$, $\boldsymbol{r_s}$ を入力とする受動的なシステムとしてモデル化できる．

仮定 3. 操縦者の力と環境からの反力 $\boldsymbol{F_{op}}$, $\boldsymbol{F_{env}}$ は $\boldsymbol{r_m}, \boldsymbol{r_s}$ の関数によって制限されている．

仮定 4. 全ての信号は拡張 $\mathcal{L}_2$ 空間に属している．

このとき (11)(17) で構成されるテレオペレーションの安定性に関して次の定理 1 が成り立つ．

定理 1. 非線形テレオペレーションシステム (11)(17) を考える．このとき, システムは同調し, (8) の位置誤差とその微分 $\boldsymbol{e_m}$, $\boldsymbol{e_s}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}$ の原点は漸近安定となる．

Proof. 汎関数 V_{ms} を状態 $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{r_m} & \boldsymbol{r_s} & \boldsymbol{e_m} & \boldsymbol{e_s}\end{bmatrix}^T$ を用いて次のように定義する．

$$\begin{aligned}
&V_{ms}(x(t))\\
&= \alpha k_m^{-1}\boldsymbol{r_m^T}(t)\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{q_m})\boldsymbol{r_m}(t) + \alpha^{-1}k_s^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(t)\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{s}}(\boldsymbol{q_s})\boldsymbol{r_s}(t)\\
&\quad +\alpha\boldsymbol{e_m^T}(t)\boldsymbol{\Lambda K e_m}(t) + \alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T}(t)\boldsymbol{\Lambda K e_s}(t)\\
&\quad +2\alpha k_m^{-1}\int_0^t\{-\boldsymbol{F_{op}^T}(\zeta)\boldsymbol{r_m}(\zeta)\}d\zeta + 2\alpha^{-1}k_s^{-1}\int_0^t\{\boldsymbol{F_{env}^T}(\zeta)\boldsymbol{r_s}(\zeta)\}d\zeta\\
&\quad +\int_{t-T}^t\{\alpha\boldsymbol{r_m^T}(\zeta)\boldsymbol{K r_m}(\zeta) + \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(\zeta)\boldsymbol{K r_s}(\zeta)\}d\zeta
\end{aligned} \tag{19}$$

ここで, 特性 1 より 1, 2 項目は正定. 3, 4 項目は $\boldsymbol{\Lambda}$, $\boldsymbol{K}$ が正定対角行列であることから正定. 5, 6 項目は仮定 2 より正定. 7, 8 項目は $\boldsymbol{K}$ が正定対角行列であるので正定. よって V_{ms} は正定関数となる. V_{ms} をシステムの解軌道に沿って時間微分し, 特性 2 および (11) を用いて整理すると,

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{ms} &= 2\alpha k_m^{-1}\boldsymbol{r_m^T F_m} + 2k_s^{-1}\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T F_s}\\
&\quad +2\alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + 2\alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}\\
&\quad +\alpha\boldsymbol{r_m^T K r_m} + \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T K r_s}\\
&\quad -\alpha\boldsymbol{r_m^T}(t-T)\boldsymbol{K r_m}(t-T) - \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(t-T)\boldsymbol{K r_s}(t-T)
\end{aligned}$$

ここで, 関係式

$$\begin{aligned}
&\alpha\boldsymbol{r_m^T K r_m} - \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(t-T)\boldsymbol{K r_s}(t-T)\\
&= -\{\alpha\boldsymbol{r_m} + \boldsymbol{r_s}(t-T)\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}\}
\end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned}
&\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T K r_s} - \alpha\boldsymbol{r_m^T}(t-T)\boldsymbol{K r_m}(t-T)\\
&= -\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T} + \boldsymbol{r_m}(t-T)\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s}\}
\end{aligned}$$

を用いると, $\dot{V}_{ms}$ は

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{ms} &= 2\alpha k_m^{-1}\boldsymbol{r_m^T F_m} + 2k_s^{-1}\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T F_s}\\
&\quad +2\alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + 2\alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}\\
&\quad -\{\alpha\boldsymbol{r_m} + \boldsymbol{r_s}(t-T)\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}\}\\
&\quad -\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T} + \boldsymbol{r_m}(t-T)\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s}\}
\end{aligned}$$

となる. (17) の $\boldsymbol{F_m}$, $\boldsymbol{F_s}$ を代入すると

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{ms} &= 2\alpha\boldsymbol{r_m^T K}(\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}) + 2\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T K}(\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s})\\
&\quad +2\alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + 2\alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}\\
&\quad -\{\alpha\boldsymbol{r_m} + \boldsymbol{r_s}(t-T)\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}\}\\
&\quad -\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T} + \boldsymbol{r_m}(t-T)\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s}\}\\
&= 2\alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + 2\alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}\\
&\quad -\alpha\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}\}\\
&\quad -\alpha^{-1}\{\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s}\}^T\boldsymbol{K}\{\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s}\}
\end{aligned}$$

が得られる．さらに, (12) の $\boldsymbol{r_m}$, $\boldsymbol{r_s}$ を代入し, (8) の関係式を用いると次のようになる．

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{ms} &= 2\alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + 2\alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}\\
&\quad -\alpha\{\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + \boldsymbol{\Lambda e_m}\}^T\boldsymbol{K}\{\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + \boldsymbol{\Lambda e_m}\}\\
&\quad -\alpha^{-1}\{\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{\Lambda e_s}\}^T\boldsymbol{K}\{\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{\Lambda e_s}\}
\end{aligned}$$

これを整理すると最終的に以下が得られる．

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{ms} &= -\alpha\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}^T\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} - \alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K\Lambda e_m}\\
&\quad -\alpha^{-1}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}^T\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}} - \alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K\Lambda e_s}
\end{aligned} \tag{20}$$

$\boldsymbol{\Lambda}$, $\boldsymbol{\Lambda K\Lambda}$ は正定行列となるので, $\dot{V}_{ms}$ は準負定となり, リアプノフの意味で安定である．

ここで, Barbalat's Lemma [9] を用いることで, 位置誤差とその微分 $\boldsymbol{e_m}$, $\boldsymbol{e_s}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}$ が原点へ漸近収束することを示すことができる．

$\dot{V}_{ms}$ の一様連続性を示すために, 以下の導関数 $\ddot{V}_{ms}$ を考える．

$$\begin{aligned}
\ddot{V}_{ms} &= -2\alpha\ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}^T\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} - 2\alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K\Lambda}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}\\
&\quad -2\alpha^{-1}\ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}^T\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}} - 2\alpha^{-1}\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}^T\boldsymbol{\Lambda K\Lambda e_s}
\end{aligned} \tag{21}$$

上式より, $\boldsymbol{e_m}$, $\boldsymbol{e_s}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}$, $\ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}$, $\ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}$ が有界であれば, $\dot{V}_{ms}$ は一様連続である．

$\dot{V}_{ms}$ が準負定であることから, (19) より,

$$\begin{aligned}
0 &\le \alpha k_m^{-1}\boldsymbol{r_m^T}\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{q_m})\boldsymbol{r_m} \le V_{ms}(x(0))\\
0 &\le \alpha^{-1}k_s^{-1}\boldsymbol{r_s^T}\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{s}}(\boldsymbol{q_s})\boldsymbol{r_s} \le V_{ms}(x(0))\\
0 &\le \alpha\boldsymbol{e_m^T\Lambda K e_m} \le V_{ms}(x(0))\\
0 &\le \alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T\Lambda K e_s} \le V_{ms}(x(0))
\end{aligned}$$

が成り立つ. 特性 1 より, $\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{m}}$, $\widetilde{\boldsymbol{M}}_{\boldsymbol{s}}$ は有界である. $\boldsymbol{\Lambda}$, $\boldsymbol{K}$ は正定対角行列, α は任意の正の実数であるので, $\boldsymbol{r_m}, \boldsymbol{r_s}, \boldsymbol{e_m}, \boldsymbol{e_s} \in \mathcal{L}_\infty$ である．さらに, $\boldsymbol{r_m}, \boldsymbol{r_s}$ から, $\boldsymbol{x_m}, \boldsymbol{x_s}$ への伝達関数を考える．(12) をラプラス変換して伝達関数を求めると次のようになる．

$$\boldsymbol{X_i} = \mathrm{diag}\left(\frac{1}{s+\lambda_1}, \cdots, \frac{1}{s+\lambda_n}\right)\boldsymbol{R_i} \quad (i = m, s)$$

ここで $\boldsymbol{X_i}, \boldsymbol{R_i}$ $(i = m, s)$ は $\boldsymbol{x_i}, \boldsymbol{r_i}$ $(i = m, s)$ のラプラス変換を表している．上式から, $\boldsymbol{x_m}, \boldsymbol{x_s}$ への伝達関数行列は厳密にプロパーで指数安定な伝達関数である. 従って, $\boldsymbol{x_m}, \boldsymbol{x_s}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{L}_\infty$ となる．仮定 3 より, $\boldsymbol{r_m}, \boldsymbol{r_s}$ は有界なので $\boldsymbol{F_{op}}$,$\boldsymbol{F_{env}} \in \mathcal{L}_\infty$ である．また, (17) より $\boldsymbol{F_m}$,$\boldsymbol{F_s} \in \mathcal{L}_\infty$ である．(10) より $\boldsymbol{\tau_m}, \boldsymbol{\tau_s} \in \mathcal{L}_\infty$ である. また, (4) より, $\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{L}_\infty$ となる. 以上より, $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}, \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{L}_\infty$ なので $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}, \ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}, \ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{L}_\infty$ であり, $\ddot{V}_{ms}$ は有界な関数なので $\dot{V}_{ms}$ は一様連続である. Barbalat's Lemma を用いることで $t \to \infty$ で $\dot{V}(x) \to 0$ であるので, 位置誤差とその微分 $\boldsymbol{e_m}, \boldsymbol{e_s}, \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}, \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}$ は原点へ漸近収束する． □

注意 1. スケーリング要素 α が有限な値であれば定理 1 で示した漸近安定性を損なうことはない. 従って, 任意の大きさで手先の運動のスケーリングを行うことが出来る．

定理 1 は位置誤差の収束に関する定理であったが, バイラテラルテレオペレーションシステムにおいては, 位置誤差が収束することのみではなく, 操縦者へ適切にスレーブと環境との接触力を伝える必要がある. マスタ側に伝わる反力に関しては, 次の命題が成り立つ．

命題 1. 非線形テレオペレーションシステム (11)(17) を考える. スレーブが環境と接触して静止している状態 $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) = \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) = 0$ $(i = m, s)$ で次のように環境からの反力は操縦者へ伝達される．

$$\alpha\frac{k_s}{k_m}\boldsymbol{F_{op}} = \boldsymbol{F_{env}} \tag{22}$$

Proof. $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) = \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) = 0 \ (i = m, s)$ を (11) に代入すると次式が得られる.

$$\boldsymbol{F_{op}} = -\boldsymbol{F_m} = -k_m \boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}(\alpha^{-1}\boldsymbol{x_s} - \boldsymbol{x_m}) \tag{23}$$

$$\boldsymbol{F_{env}} = \boldsymbol{F_s} = k_s \boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}(\alpha\boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{x_s}) \tag{24}$$

上式より,

$$\alpha\frac{k_s}{k_m}\boldsymbol{F_{op}} = k_s \boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}(\alpha\boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{x_s}) = \boldsymbol{F_{env}} \tag{25}$$

が得られる. □

注意 2. 力の伝達比はスケーリング要素 α と同調制御則のゲイン k_m, k_s の比によって決まるので, k_m,k_s を自由に定めることができれば力の伝達比を自由に定めることができる. しかし, k_m,k_s が小さすぎると外乱の影響などを受けて, 追従性能に劣化が生じるので, k_m,k_s は十分な追従性能を実現できる程度の大きさにする必要がある. また, k_m,k_s が大きすぎるとアクチュエータの入力トルクの限界に達する場合がある. よって, k_m,k_s は十分な追従性能を実現でき, かつアクチュエータの限界に達しない範囲で (22) 式を考慮して望みの力の伝達比を実現できるように定める必要がある.

6. 制御実験による検証

実験に用いた 2 台のロボットアームを Fig. 3 に示す. マスタとして用いる 2 自由度平行リンク型アームおよび, スレーブとして用いる 2 自由度直列リンク型アームの各リンクの長さはそれぞれ Figs. 4, 5 中に示される.

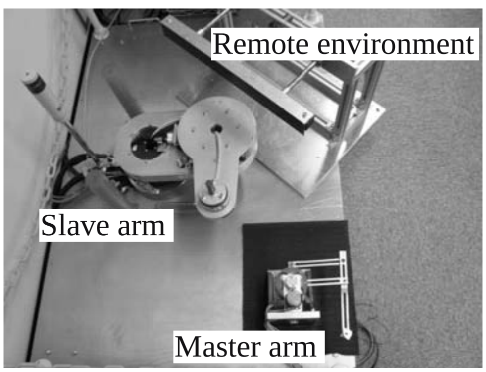


Fig. 3 Experiment setup

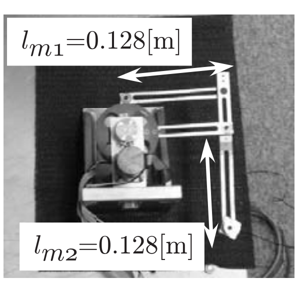


Fig. 4 Master arm

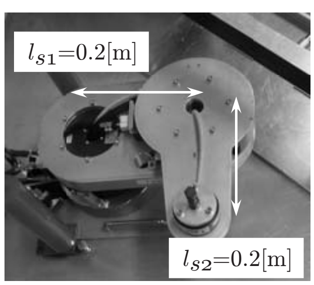


Fig. 5 Slave arm

操縦者が加える力 $\boldsymbol{F_{op}}$, 環境へ加える力 $\boldsymbol{F_{env}}$ は力覚センサで直接計測する. 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. 0.5[s] の通信遅延を制御ボード内で仮想的に発生させ, 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とした.

制御則に用いるモデルとしては次のような式, パラメータを用いた. ここでパラメータは同定実験から得られた値である.

Master

$$\boldsymbol{M_m}(\boldsymbol{q_m}) = \begin{bmatrix} \theta_{m1} & \theta_{m2}\cos(q_{m1}-q_{m2}) \\ \theta_{m2}\cos(q_{m1}-q_{m2}) & \theta_{m3} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C_m}(\boldsymbol{q_m}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{m}}) = \begin{bmatrix} 0 & \theta_{m2}\dot{q}_{m2}\sin(q_{m1}-q_{m2}) \\ -\theta_{m2}\dot{q}_{m1}\sin(q_{m1}-q_{m2}) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{J_m} = \begin{bmatrix} -l_{m1}\sin(q_{m1}) & l_{m2}\sin(q_{m2}) \\ l_{m1}\cos(q_{m1}) & -l_{m2}\cos(q_{m2}) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{x_m} = \begin{bmatrix} l_{m1}\cos(q_{m1}) - l_{m2}\cos(q_{m2}) \\ l_{m1}\sin(q_{m1}) - l_{m2}\sin(q_{m2}) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{g_m} = 0$$

$$\theta_{m1} = 0.00149[\mathrm{kgm}^2],\ \theta_{m2} = -0.000764[\mathrm{kgm}^2],\ \theta_{m3} = 0.000686[\mathrm{kgm}^2]$$

Slave

$$\boldsymbol{M_s}(\boldsymbol{q_s}) = \begin{bmatrix} \theta_{s1} + 2\theta_{s3}\cos(q_{s2}) & \theta_{s2} + \theta_{s3}\cos(q_{s2}) \\ \theta_{s2} + \theta_{s3}\cos(q_{s2}) & \theta_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C_s}(\boldsymbol{q_s}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{s}}) = \begin{bmatrix} -\theta_{s3}\sin(q_{s2})\dot{q}_{s2} & -\theta_{s3}\sin(q_{s2})(\dot{q}_{s1} + \dot{q}_{s2}) \\ \theta_{s3}\sin(q_{s2})\dot{q}_{s1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{J_s} = \begin{bmatrix} -l_{s1}\sin(q_{s1}) - l_{s2}\sin(q_{s1}+q_{s2}) & -l_{s2}\sin(q_{s1}+q_{s2}) \\ l_{s1}\cos(q_{s1}) + l_{s2}\cos(q_{s1}+q_{s2}) & l_{s2}\cos(q_{s1}+q_{s2}) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{x_s} = \begin{bmatrix} l_{s1}\cos(q_{s1}) + l_{s2}\cos(q_{s1}+q_{s2}) \\ l_{s1}\sin(q_{s1}) + l_{s2}\sin(q_{s1}+q_{s2}) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{g_s} = 0$$

$$\theta_{s1} = 0.366[\mathrm{kgm}^2],\ \theta_{s2} = 0.0291[\mathrm{kgm}^2],\ \theta_{s3} = 0.0227[\mathrm{kgm}^2]$$

コントローラの設計パラメータは

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix},\ \boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$k_m = 1,\ k_s = 6 \tag{26}$$

と設定し, スケーリング要素 α はロボットのリンクの長さの比 $(l_{s1}/l_{m1} = 1.5625 \approx 1.5)$ から

$$\alpha = 1.5 \tag{27}$$

と設定した. これよりスレーブの手先の運動がマスタの 1.5(=α) 倍に拡大され, 力が 9(=$\alpha k_s/k_m$) 倍されることが期待される.

制御実験の状況として以下の 2 通りを考える.

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, 従来法 [7] との比較を行う. 従来法 [7] は (26) において $k_m = k_s = 1$ とした場合と等価である.

従来法による Case1 の実験結果を Figs. 6-9 に, 提案法による Case1 の実験結果を Figs. 10-13 に示す. Figs. 6, 10 の実線はマスタの作業座標系 (XY 平面) における手先軌道, 破線はスレーブの手先軌道を表している. Figs. 7, 11 の (a) はマスタ, スレーブの手先位置の X,Y 軸方向の時間応答を表しており, (b) は (a) のマスタのデータを 1.5 倍し, 0.5 秒遅らせて表した図である. 図において x_{mx}, x_{my} などの添え字の x, y はそれぞれ x 軸成分, y 軸成分であることを表している. Figs. 8, 9, 12, 13 は実験中のマスタ, スレーブの入力トルクを表している. 従来法, 提案法ともに安定に制御できていることがわかる. しかし, Fig. 7 から従来法による制御実験では, 大きな追従誤差が残っていることが分かる. この追従誤差の原因はモデル化の際には無視していた静止摩擦などの外乱の影響により生じていると考えられる. ゲイン $\boldsymbol{K}$ を大きくすれば外乱抑圧性能が向上し, 追従誤差は小さくなることが期待されるが, Fig. 8 よりマスタの入力トルクはこの実験において定格トルク (マスタ:約 0.3[Nm], スレーブ：5[Nm] 以上) に近い値となっているため, これ以上ゲインを大きくさせることができない. 一方, Fig. 11 に注目すると提案法では従来法の場合に比べて追従誤差が小さくなっていることが分かる. これは, スレーブのみの同調制御則のゲインを十分な大きさにすることにより, 摩擦など外乱の影響を小さくできるからである.

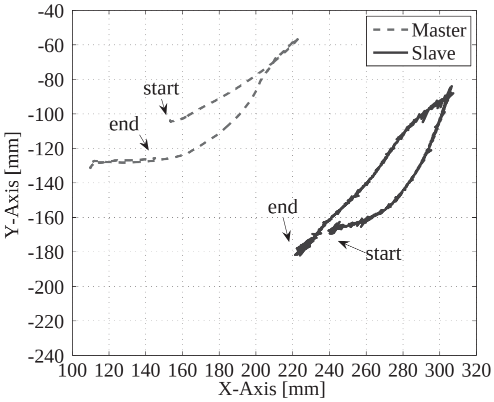
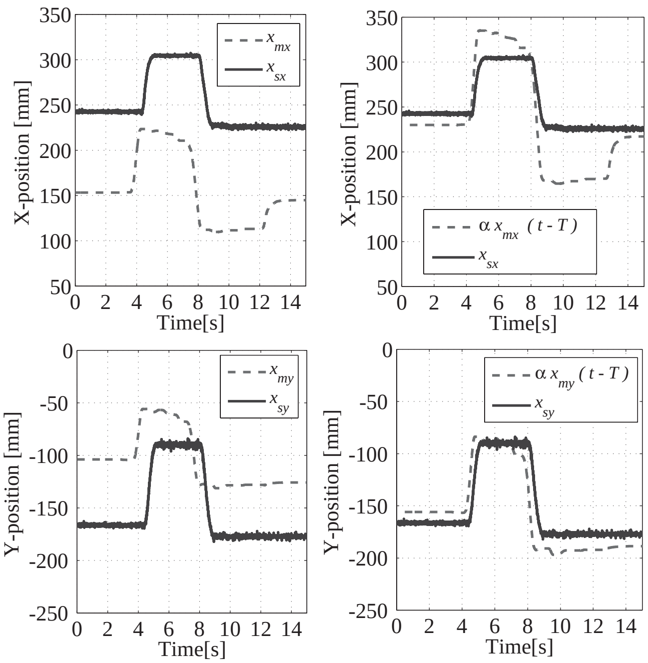


Fig. 6 Trajectories in Case 1 (conventinal method)



(a) Time response (b) Scaled and shifted data

Fig. 7 Position data in Case 1 (conventinal method)

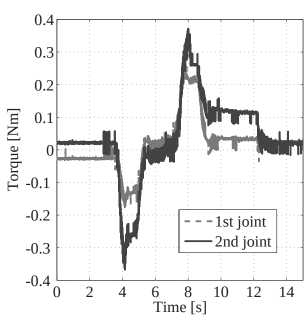


Fig. 8 Input torque of master in Case 1 (conventinal method)

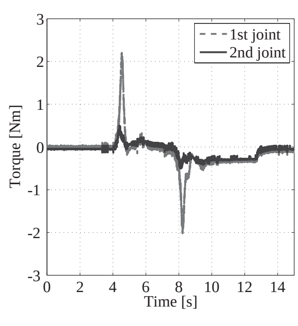


Fig. 9 Input torque of slave in Case 1 (conventinal method)

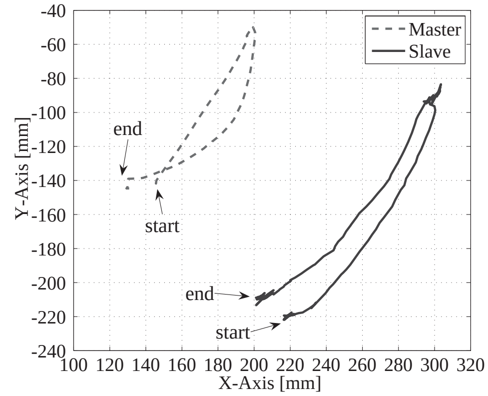
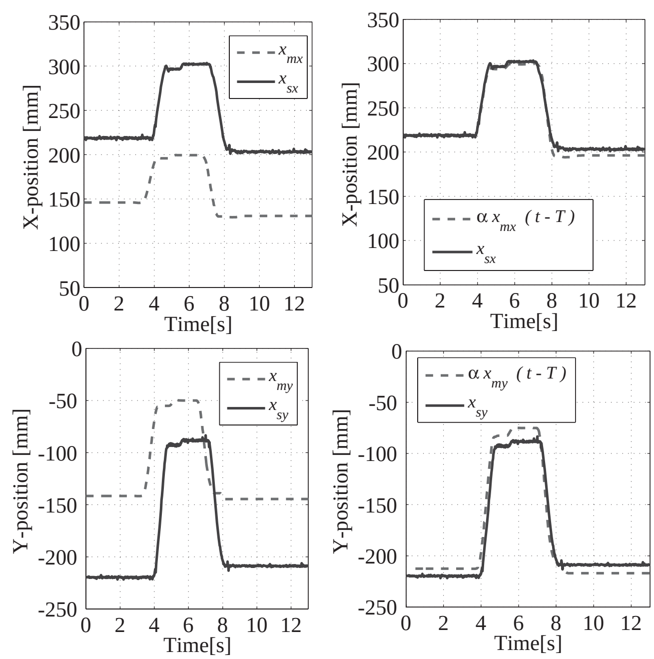


Fig. 10 Trajectories in Case 1 (proposed method)



(a) Time response (b) Scaled and shifted data

Fig. 11 Position data in Case 1 (proposed method)

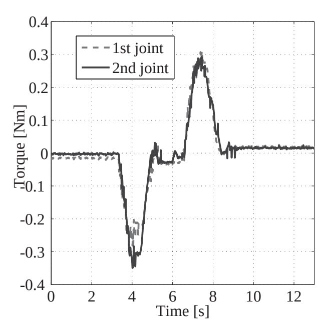


Fig. 12 Input torque of master in Case 1 (proposed method)

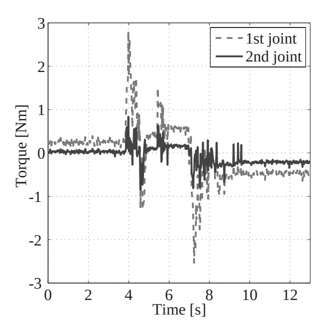


Fig. 13 Input torque of slave in Case 1 (proposed method)

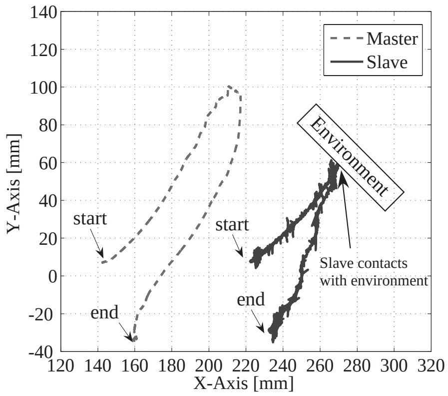
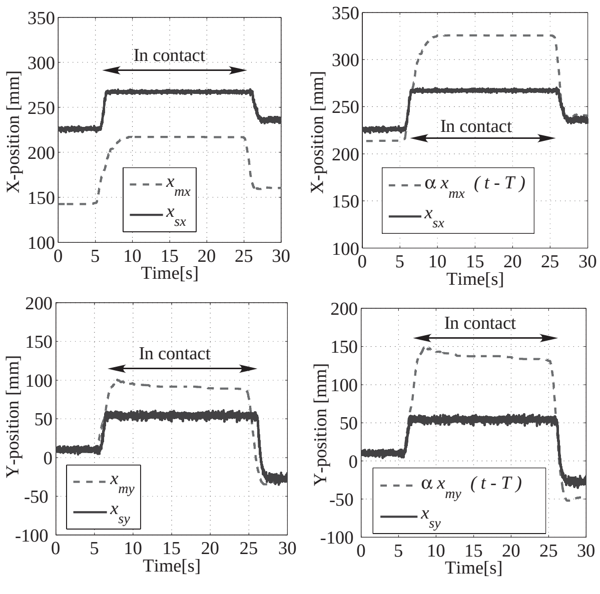
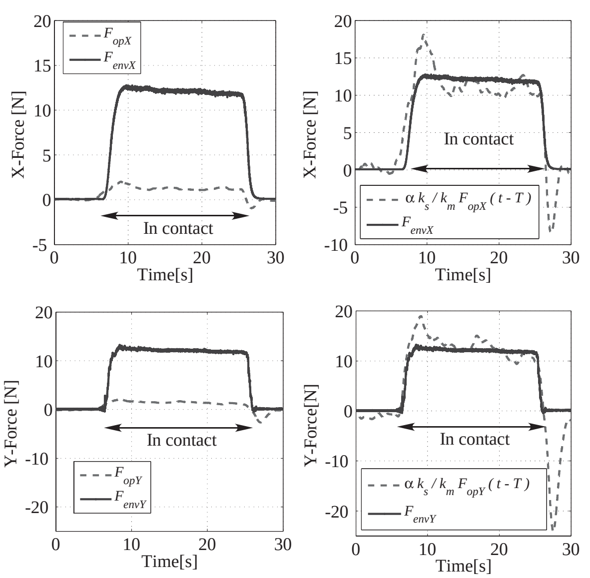


Fig. 14 Trajectories in Case 2 (proposed method)



(a) Time response (b) Scaled and shifted data

Fig. 15 Position data in Case 2 (proposed method)



(a) Time response (b) Scaled and shifted data

Fig. 16 Force data in Case 2 (proposed method)

Case2 の実験結果を Figs. 14-16 に示す. Fig. 14 はマスタとスレーブの手先の軌道を表しており, 環境のおおよその配置を “Environment” に示している. “Start” と示した位置から “Slave contacts with environment” と示した位置まで動かし, しばらく止めてから “end” の位置まで動かすという操作を行った. Fig. 15, Fig. 16(a) はマスタ, スレーブの手先位置の X,Y 軸方向の時間応答, 手先にかかる力 $\boldsymbol{F_{op}}, \boldsymbol{F_{env}}$ の X,Y 軸方向の時間応答を表しており (b) は (a) のマスタのデータを 1.5 倍して 0.5 秒遅らせて表した図である. Fig. 16(b) から環境と接触している間 (6[s]-26[s]) スレーブは操縦者が加える力の約 9 倍の力を環境へ加えており, (22) を満たすように適切に反力がスケーリングされてオペレータへ伝わっていることが分かる.

7. おわりに

本稿では, 通信遅延を有する異構造テレオペレーションに対して, 漸近安定性を保証した受動性に基づく同調制御手法を提案した.

提案した手法により, マスタ, スレーブの同調制御則のゲインを独立に設定できる. また, マスタ, スレーブ間で望みの力の伝達比を設定することができる. 提案した制御手法の漸近安定性をリアプノフ安定法より示した. また, 構造とスケールの異なる 2 台の 2 自由度アームを用いた制御実験により提案法の有効性を確認した.

今後の課題として, 操作性の改善, 時変の通信遅延を有するテレオペレーションへの拡張などが挙げられる.

参考文献

(1) 松日楽信人, 朝倉誠, 番場弘行, “異構造マスタスレーブマニピュレータの作業性とその評価実験,” 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.1, pp.149-154, 1994.

(2) R. J. Anderson and M. W. Spong, “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501, 1989.

(3) 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.

(4) N. Chopra and M. W. Spong, “On Synchronization of Networked Passive Systems with Time Delays and Application to Bilateral Teleoperation,” Proc. of the SICE Annual Conference 2005,pp. 3424-3429, 2005.

(5) M. W. Spong and N. Chopra, “Synchronization of Networked Lagrangian Systems,” Proc. of the 3rd IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, pp. 1-9, 2006.

(6) 滑川徹, 河田久之輔, “パワースケーリングと通信遅延を考慮したテレオペレーションの協調制御,” 第 35 回計測自動制御学会制御理論シンポジウム資料, pp. 205-208, 2006.

(7) 滑川徹, 吉田航瑛, 河田久之輔, “通信遅延を有する異構造テレオペレーションの協調制御,” 第 7 回計測自動制御学会制御部門大会資料, 83-3-1, 2007.

(8) C. C. de Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds), Theory of Robot Control, Springer, 1996.

(9) H. K. Khalil, Nonlinear systems, Prentice-Hall, 1996.