83-3-1

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

○滑川徹　吉田航瑛　河田久之輔　（金沢大学）

Synchronized Control of Teleoperation Systems with Different Configurations and Communication Delay

∗T. Namerikawa, K. Yoshida and H. Kawada (Kanazawa University)

Abstract– This paper deals with a control of teleoperation system with different configurations and communication delay. The passivity-based control method with scaling elements guarantees asymptotic stability of the teleoperation system. The asymptotic stability of teleoperation with communication delay and power scaling 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, Scaling, Communication delay, Synchronization

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．一般的な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．さらに, 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．

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 [1], 通信遅延に対する安定性を保証する必要がある．文献 [2] 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．

一方, 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 [3]．このような異構造テレオペレーションに対しては関節の運動を追従させる制御 (関節空間における制御) を行うのではなく, 作業を行う手先効果器の運動が追従するように制御 (作業空間における制御) を行う必要がある．また, スケールが異なる場合には運動と力をスケーリングするパワースケーリング [4] を考慮しなければならない．文献 [5] では文献 [2] の同調制御則に対して, 任意のスケーリング要素を導入した制御手法を提案しており, 通信遅延とパワースケーリングを考慮したテレオペレーションが漸近安定となることを示している．しかし, 関節空間における議論しかされておらず, また, その制御手法の実験による有効性検証は同一の 2 台のロボットで行なわれていた．

本論文の目的は, 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協調制御手法を提案することである．提案する制御手法は, 文献 [5] の制御手法を作業空間へ拡張したものである．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．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M_m}(\boldsymbol{q_m})\ddot{\boldsymbol{q}}_m + \boldsymbol{C_m}(\boldsymbol{q_m},\dot{\boldsymbol{q}}_m)\dot{\boldsymbol{q}}_m + \boldsymbol{g_m}(\boldsymbol{q_m}) &= \boldsymbol{\tau_m} + \boldsymbol{J}_m^T\boldsymbol{F_{op}}\\ \boldsymbol{M_s}(\boldsymbol{q_s})\ddot{\boldsymbol{q}}_s + \boldsymbol{C_s}(\boldsymbol{q_s},\dot{\boldsymbol{q}}_s)\dot{\boldsymbol{q}}_s + \boldsymbol{g_s}(\boldsymbol{q_s}) &= \boldsymbol{\tau_s} - \boldsymbol{J}_s^T\boldsymbol{F_{env}}\end{aligned}\tag{1}$$

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, $\boldsymbol{C_m}(\boldsymbol{q_m},\dot{\boldsymbol{q}}_m)\dot{\boldsymbol{q}}_m,\ \boldsymbol{C_s}(\boldsymbol{q_s},\dot{\boldsymbol{q}}_s)\dot{\boldsymbol{q}}_s \in \mathcal{R}^{n\times 1}$ 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, $\boldsymbol{J_m}(\boldsymbol{q_m}),\ \boldsymbol{J_s}(\boldsymbol{q_s}) \in \mathcal{R}^{n\times n}$ はヤコビアンである．

(1) のダイナミクスは関節空間における表現である．$\boldsymbol{x_m}, \boldsymbol{x_s}$ をマスタ, スレーブの手先位置姿勢として, $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}}$, $\ddot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{q}} + \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}}$ の関係を用い, 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 [6]．

$$\begin{aligned}\widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q_m})\ddot{\boldsymbol{x}}_m + \widetilde{\boldsymbol{C}}_m(\boldsymbol{q_m},\dot{\boldsymbol{q}}_m)\dot{\boldsymbol{x}}_m + \widetilde{\boldsymbol{g}}_m(\boldsymbol{q_m}) &= \boldsymbol{J}_m^{-T}\boldsymbol{\tau_m} + \boldsymbol{F_{op}}\\ \widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q_s})\ddot{\boldsymbol{x}}_s + \widetilde{\boldsymbol{C}}_s(\boldsymbol{q_s},\dot{\boldsymbol{q}}_s)\dot{\boldsymbol{x}}_s + \widetilde{\boldsymbol{g}}_s(\boldsymbol{q_s}) &= \boldsymbol{J}_s^{-T}\boldsymbol{\tau_s} - \boldsymbol{F_{env}}\end{aligned}\tag{2}$$

ただし,

$$\begin{aligned}&\widetilde{\boldsymbol{M}}_m = \boldsymbol{J}_m^{-T}\boldsymbol{M}_m\boldsymbol{J}_m^{-1}\\ &\widetilde{\boldsymbol{C}}_m = \boldsymbol{J}_m^{-T}(\boldsymbol{C}_m - \boldsymbol{M}_m\boldsymbol{J}_m^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}_m)\boldsymbol{J}_m^{-1}\ ,\ \widetilde{\boldsymbol{g}}_m = \boldsymbol{J}_m^{-T}\boldsymbol{g}_m\\ &\widetilde{\boldsymbol{M}}_s = \boldsymbol{J}_s^{-T}\boldsymbol{M}_s\boldsymbol{J}_s^{-1}\\ &\widetilde{\boldsymbol{C}}_s = \boldsymbol{J}_s^{-T}(\boldsymbol{C}_s - \boldsymbol{M}_s\boldsymbol{J}_s^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}_s)\boldsymbol{J}_s^{-1}\ ,\ \widetilde{\boldsymbol{g}}_s = \boldsymbol{J}_s^{-T}\boldsymbol{g}_s\end{aligned}\tag{3}$$

である．ここで, 次の仮定が成り立っていなければならない．

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

作業空間におけるダイナミクスは次の特性 1, 2 を有する [6]．

特性 1. 仮定 1 が成り立つ場合, $\widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q_m})$, $\widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q_s})$ 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．

$$0 < m_{i1}\boldsymbol{I} \le \widetilde{\boldsymbol{M}}_i(\boldsymbol{q_i}) \le m_{i2}\boldsymbol{I}\quad (i = m, s)\tag{4}$$

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

$$\widetilde{\boldsymbol{N}}_i = -\widetilde{\boldsymbol{N}}_i^T\ ,\ \boldsymbol{z}^T\widetilde{\boldsymbol{N}}_i\boldsymbol{z} = 0 \quad (i = m, s) \tag{5}$$

3 制御目的と制御則

3.1 制御目的

作業空間における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以下のように定義する.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{e_m}(t) &= \alpha^{-1}\boldsymbol{x_s}(t-T) - \boldsymbol{x_m}(t)\\ \boldsymbol{e_s}(t) &= \alpha\boldsymbol{x_m}(t-T) - \boldsymbol{x_s}(t)\end{aligned} \tag{6}$$

ここで, $\alpha > 0 \in R$ をスケーリング要素, T を通信遅延時間 (定数) としている. 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.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{e_i}(t) &\rightarrow 0 \ \ as \ \ t \rightarrow \infty \quad (i = m, s)\\ \dot{\boldsymbol{e}}_i(t) &\rightarrow 0 \ \ as \ \ t \rightarrow \infty \quad (i = m, s)\end{aligned} \tag{7}$$

3.2 制御則

提案する手法では, 入力トルクを以下のような非線形補償の形で与える.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau_m} &= \boldsymbol{J_m^T}\{-\widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q_m})\boldsymbol{\Lambda}\dot{\boldsymbol{x}}_m - \widetilde{\boldsymbol{C}}_m(\boldsymbol{q_m}, \dot{\boldsymbol{q}}_m)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{x_m} + \widetilde{\boldsymbol{g}}_m(\boldsymbol{q_m}) + \boldsymbol{F_m}\}\\ \boldsymbol{\tau_s} &= \boldsymbol{J_s^T}\{-\widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q_s})\boldsymbol{\Lambda}\dot{\boldsymbol{x}}_s - \widetilde{\boldsymbol{C}}_s(\boldsymbol{q_s}, \dot{\boldsymbol{q}}_s)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{x_s} + \widetilde{\boldsymbol{g}}_s(\boldsymbol{q_s}) + \boldsymbol{F_s}\}\end{aligned} \tag{8}$$

ここで, $\boldsymbol{\Lambda}$ は正定対角行列, $\boldsymbol{F_m}$, $\boldsymbol{F_s}$ は新たな制御入力である. (8) を (2) へ代入すると以下のようになる.

$$\begin{aligned}\widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q_m})\dot{\boldsymbol{r}}_m + \widetilde{\boldsymbol{C}}_m(\boldsymbol{q_m}, \dot{\boldsymbol{q}}_m)\boldsymbol{r_m} &= \boldsymbol{F_{op}} + \boldsymbol{F_m}\\ \widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q_s})\dot{\boldsymbol{r}}_s + \widetilde{\boldsymbol{C}}_s(\boldsymbol{q_s}, \dot{\boldsymbol{q}}_s)\boldsymbol{r_s} &= -\boldsymbol{F_{env}} + \boldsymbol{F_s}\end{aligned} \tag{9}$$

ここで, $\boldsymbol{r_m}$, $\boldsymbol{r_s}$ はマスタ及びスレーブロボットの出力変数で以下で定義される.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{r_m} &= \dot{\boldsymbol{x}}_m + \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{x_m}\\ \boldsymbol{r_s} &= \dot{\boldsymbol{x}}_s + \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{x_s}\end{aligned} \tag{10}$$

パワースケーリングを考慮した同調制御則として制御入力 $\boldsymbol{F_m}$, $\boldsymbol{F_s}$ を以下で与える [5].

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F_m}(t) &= \boldsymbol{K}(\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T) - \boldsymbol{r_m}(t))\\ \boldsymbol{F_s}(t) &= \boldsymbol{K}(\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T) - \boldsymbol{r_s}(t))\end{aligned} \tag{11}$$

ここで, $\boldsymbol{K}$ は正定対角行列である.

3.3 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 (9)(11) 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. パワースケーリングを考慮した非線形テレオペレーションシステム (9)(11) を考える. この時, システムは同調し, (6) の位置誤差とその微分 $\boldsymbol{e_m}$, $\boldsymbol{e_s}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_m$, $\dot{\boldsymbol{e}}_s$ の原点は漸近安定となる.

Proof. 汎関数 V_{ms} を以下のように定義する.

$$\begin{aligned}&V_{ms}(x(t))\\ =\ &\alpha\boldsymbol{r_m^T}(t)\widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q_m})\boldsymbol{r_m}(t) + \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(t)\widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q_s})\boldsymbol{r_s}(t)\\ &+\alpha\boldsymbol{e_m^T}(t)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{e_m}(t) + \alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T}(t)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{e_s}(t)\\ &+2\alpha^{-1}\int_0^t\{\boldsymbol{F_{env}^T}(\zeta)\boldsymbol{r_s}(\zeta)\}d\zeta + 2\alpha\int_0^t\{-\boldsymbol{F_{op}^T}(\zeta)\boldsymbol{r_m}(\zeta)\}d\zeta\\ &+\int_{t-T}^t\{\alpha\boldsymbol{r_m^T}(\zeta)\boldsymbol{K}\boldsymbol{r_m}(\zeta) + \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(\zeta)\boldsymbol{K}\boldsymbol{r_s}(\zeta)\}d\zeta\end{aligned} \tag{12}$$

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 (9) を用いて整理すると,

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

となる. (11) の $\boldsymbol{F_m}$, $\boldsymbol{F_s}$ を代入し整理すると,

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

が得られる. さらに, (10) の $\boldsymbol{r_m}$, $\boldsymbol{r_s}$ を代入し, (6) の関係式を用いて整理すると最終的に以下が得られる.

$$\begin{aligned}\dot{V}_{ms} =\ &-\alpha\dot{\boldsymbol{e}}_m^T(t)\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_m(t) - \alpha\boldsymbol{e_m^T}(t)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{e_m}(t)\\ &-\alpha^{-1}\dot{\boldsymbol{e}}_s^T(t)\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_s(t) - \alpha^{-1}\boldsymbol{e_s^T}(t)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{e_s}(t)\end{aligned} \tag{13}$$

$\boldsymbol{\Lambda}, \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}$ 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 [7] を用いることで, 位置誤差とその微分 $\boldsymbol{e_m}$, $\boldsymbol{e_s}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_m$, $\dot{\boldsymbol{e}}_s$ 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.

$$\begin{aligned}\ddot{V}_{ms} =\ &-2\alpha\ddot{\boldsymbol{e}}_m^T\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_m - 2\alpha\boldsymbol{e_m^T}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}\dot{\boldsymbol{e}}_m\\ &-2\alpha^{-1}\ddot{\boldsymbol{e}}_s^T\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{e}}_s - 2\alpha^{-1}\dot{\boldsymbol{e}}_s^T\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{e_s}\end{aligned} \tag{14}$$

上式より, $\boldsymbol{e_m}$, $\boldsymbol{e_s}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_m$, $\dot{\boldsymbol{e}}_s$, $\ddot{\boldsymbol{e}}_m$, $\ddot{\boldsymbol{e}}_s$ 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, (12) より,

$$\begin{aligned}0 \le \alpha\boldsymbol{r_m^T}(t)\widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q_m})\boldsymbol{r_m}(t) &\le V_{ms}(0)\\ 0 \le \alpha^{-1}\boldsymbol{r_s^T}(t)\widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q_s})\boldsymbol{r_s}(t) &\le V_{ms}(0)\\ 0 \le \alpha\boldsymbol{e_m^T}(t)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{e_m}(t) &\le V_{ms}(0)\\ 0 \le \boldsymbol{e_s^T}(t)\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{K}\boldsymbol{e_s}(t) &\le V_{ms}(0)\end{aligned}$$

が成り立つ. 特性 1 より, $\widetilde{\boldsymbol{M}}_m$, $\widetilde{\boldsymbol{M}}_s$ 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．(10) 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．

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

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, (11) より $\boldsymbol{F_m}, \boldsymbol{F_s} \in \mathcal{L}_\infty$ である．(8) より $\boldsymbol{\tau_m}, \boldsymbol{\tau_s} \in \mathcal{L}_\infty$ である．また, (2) より, $\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}, \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}} \in \mathcal{L}_\infty$ となる．以上より, $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t), \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t), \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{m}}(t), \ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{s}}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ なので $\dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}(t), \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}(t), \ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}(t), \ddot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ 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 $\boldsymbol{e_m}(t), \boldsymbol{e_s}(t), \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}}(t), \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}}(t)$ は原点へ漸近収束する． □

さらに, 次の命題が成り立つ．

命題 1. パワースケーリングを考慮したテレオペレーションシステム (9)(11) に対して定常状態 $(t \to \infty)$ で以下が成り立つ．

$$\alpha \boldsymbol{x_m}(t) = \boldsymbol{x_s}(t) \tag{15}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) = \dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}}(t) = 0, \ \boldsymbol{x_i}(t) = \boldsymbol{x_i} \quad (i = m, s) \tag{16}$$

$$\alpha \boldsymbol{F_{op}} = \boldsymbol{K\Lambda}(\alpha \boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{x_s}) = \boldsymbol{F_{env}} \tag{17}$$

Proof. 定理 1 より明らか． □

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, 力のスケーリングを行うことが出来る．

4 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. 1 に示す．マスタとして Fig. 2 に示す 2 自由度直列リンク型アームを用い, スレーブは Fig. 3 に示す 2 自由度平行リンク型アームを用いた．スレーブ側の環境は硬い壁とした．このようにマスタとスレーブは構造とスケールが異なっている．スケールはマスタよりスレーブの方が小さくなっており, マスタの動作を縮小してスレーブに追従させる手術用ロボットのようなシステムへの応用を想定している．

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て実験を行った．コントローラの設計パラメータ $\boldsymbol{K}$, $\boldsymbol{\Lambda}$ とスケーリング要素 α は以下のように選定した．

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 8 \end{bmatrix}, \ \alpha = \frac{1}{1.5} \tag{18}$$

スケーリング要素 α はロボットのリンクの長さの比 $(l_{s1}/l_{m1} = 1/1.5625 \approx 1/1.5)$ から設定した．つまりスレーブの手先の運動と力がマスタの 1/1.5 に縮小されることが期待される．

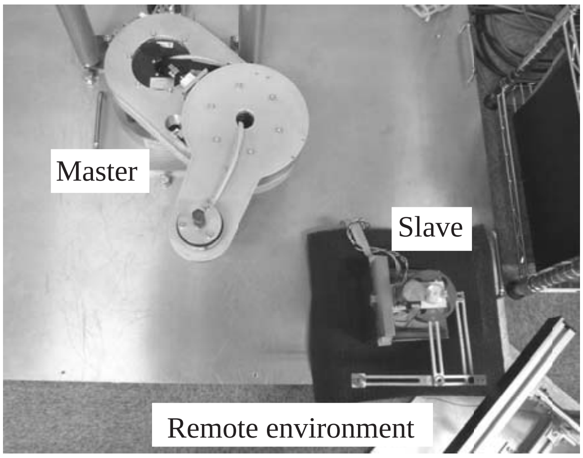


Fig. 1: Experimental Setup

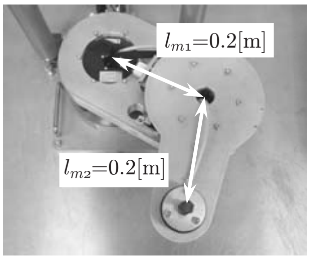


Fig. 2: Master Robot

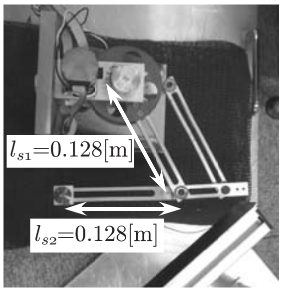


Fig. 3: Slave Robot

制御実験の設定として以下の 2 通りを考える．

- Case 1:スレーブが自由空間中での遠隔操作
- Case 2:スレーブが環境と接触している遠隔操作

Case 1 の結果を Figs. 4, 5 に示す．Fig. 4 で作業座標系 (XY 平面) におけるマスタの手先軌道を実線, スレーブの手先軌道を破線に示す．スレーブの手先軌道はマスタの手先軌道の 1/1.5 倍に追従していることが分かる．Fig. 5(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 1/1.5 倍し, 0.5[s] 遅らせて表した図である．Figs. 4, 5 から, スレーブは手先の軌道がマスタの 1/1.5 倍になるように運動していることが分かる．

Case 2 の結果を Figs. 6-8 に示す．Fig. 6 が Fig. 4 と同様に作業座標系における手先軌道を表しており, 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」まで動いて環境と接触するように操作し, 環境に接触したあとはマスタを図の「stop」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. 7(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 1/1.5 倍し, 0.5[s] 遅らせて表した図である．15[s]〜45[s] の間ではスレーブは環境と接触している．Fig. 8(a) は $\boldsymbol{F_{op}}$, $\boldsymbol{F_{env}}$ の X,Y 軸方向 (F_{opX}, F_{opY}, F_{envX}, F_{envY}) を表しており, (b) は (a) の F_{opX}, F_{opY} を 1/1.5 倍し, 0.5[s] 遅らせて表した図である．Fig. 8 から, 環境と接触している間,

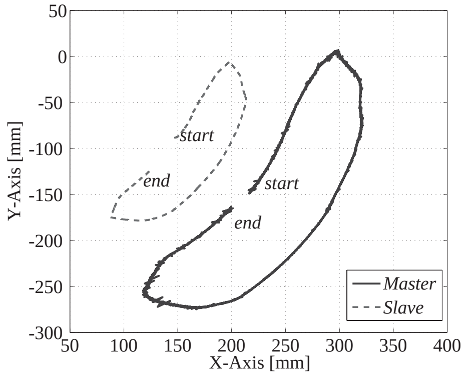
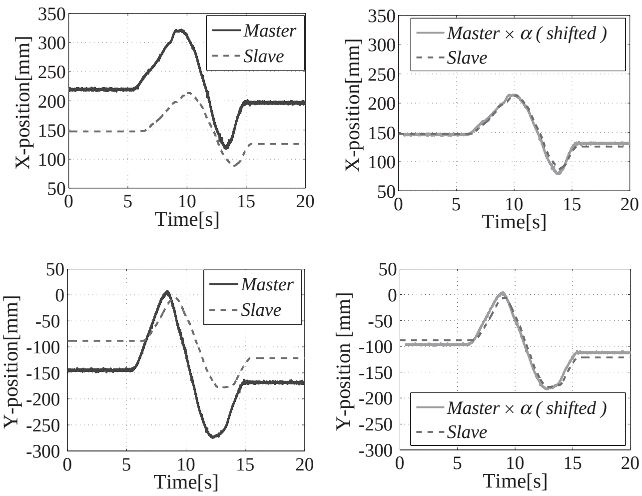


Fig. 4: Trajectories in Case 1



(a)Time responses (b)Shifted and scaled data of (a)

Fig. 5: Position data in Case 1

$\boldsymbol{F_{op}} = \alpha \boldsymbol{F_{env}}$ となっており, 反力が正確に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.

5 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協調制御手法を提案した. 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.

参考文献

1) 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.

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

3) 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.

4) 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.

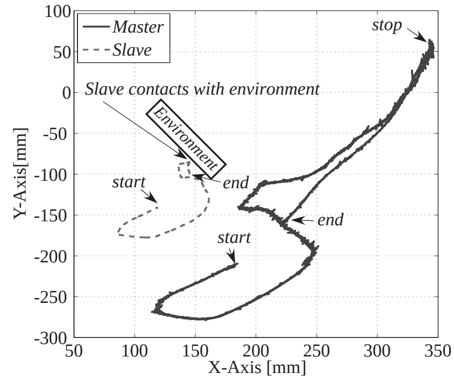
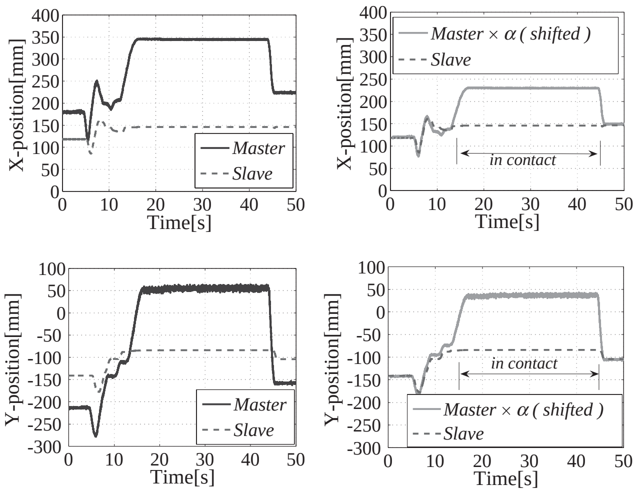
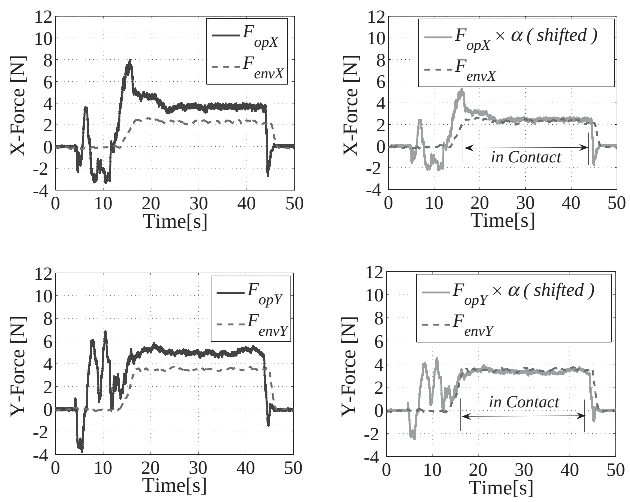


Fig. 6: Trajectories in Case 2



(a)Time responses (b)Shifted and scaled data of (a)

Fig. 7: Position data in Case 2



(a)Time responses (b)Shifted and scaled data of (a)

Fig. 8: Force data in Case 2

5) 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, pp. 205-208, 2006.

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

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