

位置追従性を考慮したテレオペレーションの受動性に基づく制御

河田久之輔[†] 滑川 徹[†]

[†] 金沢大学大学院 自然科学研究科 〒 920-1192 石川県金沢市角間町
E-mail: hisa@scl.ec.t.kanazawa-u.ac.jp and toru@t.kanazawa-u.ac.jp

あらまし 本論文の目的は、通信遅延を有する位置追従性を考慮した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パワースケーリング制御手法を提案することである。提案するパワースケーリング制御手法は、受動性に基づく同調制御則に任意のスケーリング要素を導入したものである。これにより、マスタロボットとスレーブロボットの間の位置と力を自由に設定できる。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。また、シミュレーションにより提案法の有効性を示す。

キーワード テレオペレーション, パワースケーリング, 同調制御, 受動性に基づく制御, 漸近安定性

Passivity-based Control of Teleoperation with Position Tracking

Hisanosuke KAWADA[†] and Toru NAMERIKAWA[†]

[†] Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan
E-mail: hisa@scl.ec.t.kanazawa-u.ac.jp and toru@t.kanazawa-u.ac.jp

Abstract This paper deals with a passivity-based control of teleoperation considering position tracking and power scaling. The proposed control method is a passivity-based synchronized control with scaling elements. In the proposed method, motion and force relation between a master robot and a slave robot can be specified freely. The asymptotic stability of teleoperation with communication delay and power scaling is proven by using a passivity of the systems and Lyapunov stability methods. Several simulation results show the effectiveness of our proposed method.

Key words Teleoperation, Power scaling, Synchronization control, Passivity-based control, Asymptotic stability

1. はじめに

テレオペレーションシステムでは、マスタロボットとスレーブロボットが通信路によって結合されるため、通信遅延によりシステムが不安定化するという問題がある。通信遅延による不安定化問題に対して、受動性に基づくスキュアリング変換を用いた手法が有効であることはよく知られている [1]。スキュアリング変換を用いた制御は、安定性の確保には有効であるが、位置のドリフトや信号の反射などの問題がある。この問題に対して、様々な方法が提案されている [2] [3] [4] が、位置誤差の収束を保証していないことや、代数ループを含む計算を行わなければならないという問題がある。

文献 [6] によって、通信遅延を有するネットワークで結合された受動的なシステムに対して、簡単な制御則を用いただけでも互いに同調して制御ができることが示された。また、この結果を応用し、通信遅延を有するテレオペレーションに対する同調制御をおこない、位置誤差が収束できることが示されている。

一方、テレオペレーションが必要となる様々な作業、例えば宇宙空間での遠隔操作や遠隔手術等では、人間に適した「スケール」のマスタロボットを用いて、作業内容に適した「スケール」のスレーブロボットを操作することが望ましい。このように、運動と力に対してスケーリングを行うことをパワースケーリングという [5]。文献 [5] では、スキュアリング変換を用いたテレオペレーションに対してパワースケーリングを行った場合にも受動性が保証されることを示している。しかし、この手法は従来のスキュアリング変換を用いた制御 [1] に対してパワースケーリングを行っているために、位置誤差の収束が保証されおらず、漸近安定性が示されていない。

本研究の目的は、通信遅延を有する位置追従性を考慮した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パワースケーリング制御手法を提案する。提案するパワースケーリング制御手法は [6] 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ものである。リアプノフの安定法を用いることで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す。また、シミュレーションにより提案法の有効性を示す。

2. テレオペレーションの運動方程式

摩擦やその他の外乱を無視した一般的な n 自由度ロボットの運動方程式より、マスタロボット及びスレーブロボットの運動方程式は以下で与えられる [7].

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

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、 $q \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は関節角度ベクトル、 $\dot{q} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は関節角速度ベクトル、 $\tau \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は入力トルクベクトル、 $F_{op} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は操縦者からのトルク、 $F_{env} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は環境からの反力トルク、 $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定対称な慣性行列、 $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^{n \times n}$ はコリオリ力及び遠心力の行列、 $g(q) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は重力効果のベクトルである。

上述の運動方程式は次の特性を有していることが一般に知られている。

特性 1. 慣性行列 $M(q)$ は正定対称な行列である。また、適当な定数 m_1, m_2 が存在して、任意の q に対して次の関係式が成立する。

$$0 < m_1 I \leq M(q) \leq m_2 I \quad (2)$$

特性 2. 行列 $C(q, \dot{q})$ を適切に定めることで $N = \dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ が以下のような歪対称行列になる。

$$N = -N^T, \quad x^T N x = 0 \quad (3)$$

3. 制御則

文献 [6] で提案されているテレオペレーションに対してパワースケーリングを考慮した制御則を提案する。

3.1 受動性に基づく非線形補償

まず、マスタロボット及びスレーブロボットへの入力トルクを以下で与える [6].

$$\begin{cases} \tau_m = -\hat{M}_m(q_m)\Lambda\dot{q}_m(t) - \hat{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\Lambda q_m(t) + \hat{g}_m(q_m) + F_m(t) \\ \tau_s = -\hat{M}_s(q_s)\Lambda\dot{q}_s(t) - \hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\Lambda q_s(t) + \hat{g}_s(q_s) + F_s(t) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\Lambda \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定対角行列、 $\hat{\cdot}$ は公称モデルであり、ここではモデルの不確かさはないとして $\hat{M}_i(q_i) =$

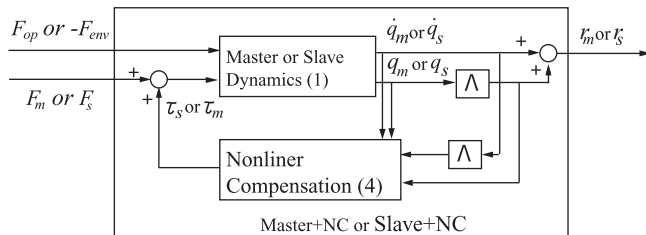


図 1 非線形補償

Fig. 1 Nonlinear compensation

$M_i(q_i)$, $\hat{C}_i(q_i, \dot{q}_i) = C_i(q_i, \dot{q}_i)$, $\hat{g}_i(q_i) = g_i(q_i)$, $i = m, s$ とする。また、 F_m, F_s は次節で述べる同調制御則からの制御入力である。(1) 式に (4) 式を代入することでマスタロボット及びスレーブロボットの運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{cases} M_m(q_m)\dot{r}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)r_m = F_m(t) + F_{op}(t) \\ M_s(q_s)\dot{r}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)r_s = F_s(t) - F_{env}(t) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 r_m, r_s はマスタロボット及びスレーブロボットの新しい出力であり、以下の位置と速度の線形結合で定義される。

$$\begin{cases} r_m(t) = \dot{q}_m(t) + \Lambda q_m(t) \\ r_s(t) = \dot{q}_s(t) + \Lambda q_s(t) \end{cases} \quad (6)$$

(5) 式に関して次の補題 1 が成り立つ。

補題 1. (5) 式に対して入力を $\tau'_m = F_m(t) + F_{op}(t)$, $\tau'_s = F_s(t) - F_{env}(t)$, 出力を r_m, r_s としたとき、マスタロボット及びスレーブロボットはそれぞれ、以下の受動性が成り立つ。

$$\int_0^t r_i^T(z) \tau'_i(z) dz \geq -\beta, \quad i = m, s \quad (7)$$

Proof. ここで、以下のような正定関数を考える。

$$V_i(r_i(t)) = \frac{1}{2} r_i^T(t) M_i(q_i) r_i(t), \quad i = m, s \quad (8)$$

次に、システムの解軌道に沿って V_i を時間微分すると以下のようなようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \frac{1}{2} r_i^T \dot{M}_i r_i + r_i^T M_i \dot{r}_i \\ &= \frac{1}{2} r_i^T \underbrace{\{ \dot{M}_i - 2C_i \}}_{=0(\text{特性 2})} r_i + r_i^T \dot{r}_i \\ &= r_i^T \dot{r}_i, \quad i = m, s \end{aligned}$$

従って、以下のようにマスタロボット及びスレーブロボットは受動性を保証する。

$$\begin{aligned} \int_0^t r_i(z)^T \dot{r}_i(z) dz &= V_i(r_i(t)) - V_i(r_i(0)) \\ &\geq -V(r_i(0)), \quad i = m, s \end{aligned} \quad (9)$$

□

(4) 式のような非線形補償を用いることで、位置と速度の情報を含む出力に関してマスタロボット及びスレーブロボット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、マスタロボット及びスレーブロボットの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。

3.2 パワースケーリングを考慮した同調制御則

Fig.2 にパワースケーリングを考慮したテレオペレーションのブロック図を示す。ただし、「Master+NC」、「Slave+NC」とは、(5) 式の非線形補償を行ったマスタロボット及びスレーブロ

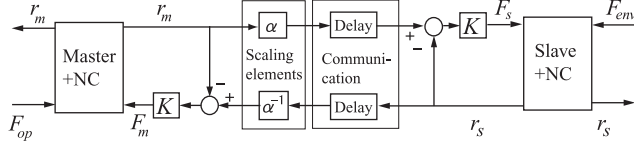


図2 パワースケーリングを考慮した同調制御構造

Fig.2 The Synchronization control architecture with power scaling

ポットである。Fig.2では、スケーリング要素として $\alpha > 0 \in \mathcal{R}$ という正の係数を導入している。これは各軸に対して等倍のパワースケーリングを行うことになる。また、パワースケーリングを考慮したマスタロボット及びスレーブロボットの制御則を以下のように提案する。

$$\begin{cases} F_m(t) = K(\alpha^{-1}r_s(t-T) - r_m(t)) \\ F_s(t) = K(\alpha r_m(t-T) - r_s(t)) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $K \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は定数の正定対角行列であり、 T は通信遅延時間である。

4. 安定性解析

提案する制御構造の安定性解析を行う。マスタロボット及びスレーブロボット間のパワースケーリングを考慮した位置誤差を以下で定義する。

$$\begin{cases} e_m(t) = \alpha^{-1}q_s(t-T) - q_m(t) \\ e_s(t) = \alpha q_m(t-T) - q_s(t) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、テレオペレーションが同調するということは、

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

が成り立つということである。安定性解析のために以下を仮定する。

- (1) 操縦者と環境は r_m, r_s を入力とした受動的なシステムとしてモデル化できる。
- (2) 操縦者の力と環境のからの反力 F_{op}, F_{env} は、 r_m, r_s の関数によって制限されている。
- (3) 全ての信号は拡張 \mathcal{L}_2 空間に属している。

(5), (10)式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(5), (10)式を考える。このとき、システムは同調し、(11)式の位置誤差とその微分 $\dot{e}_m, \dot{e}_s, e_m, e_s$ は漸近安定となる。また、システムの全ての信号は有界となる。

Proof. システムの正定関数を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} V_{ms}(x(t)) &= \alpha r_m^T(t) M_m(q_m) r_m(t) + \alpha^{-1} r_s^T(t) M_s(q_s) r_s(t) \\ &\quad + \alpha e_m^T(t) \Lambda K e_m(t) + \alpha^{-1} e_s^T(t) \Lambda K e_s(t) \\ &\quad + 2\alpha^{-1} \int_0^t \{ F_{env}^T(s) r_s(s) \} ds \\ &\quad + 2\alpha \int_0^t \{ -F_{op}^T(s) r_m(s) \} ds \\ &\quad + \int_{t-T}^t \{ \alpha r_m^T(s) K r_m(s) + \alpha^{-1} r_s^T(s) K r_s(s) \} ds \end{aligned} \quad (12)$$

特性1より $M_m(q_m), M_s(q_s)$ は正定で、 K, Λ は正定な対角行列である。仮定(1)より環境と操縦者は受動的である。よって、5, 6項目は以下のように準正定である。

$$\begin{aligned} 2\alpha^{-1} \int_0^t \{ F_{env}^T(s) r_s(s) \} ds &\geq 0 \\ 2\alpha \int_0^t \{ -F_{op}^T(s) r_m(s) \} ds &\geq 0 \end{aligned}$$

以上より、関数 V_{ms} は正定関数となる。次に、システムの解軌道に沿って V_{ms} を時間微分し、特性2を用いて整理すると以下が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} &= 2\alpha r_m^T F_m + 2\alpha^{-1} r_s^T F_s \\ &\quad + \alpha r_m^T K r_m - \alpha^{-1} r_s^T(t-T) K r_s(t-T) \\ &\quad + \alpha^{-1} r_s^T K r_s - \alpha r_m^T(t-T) K r_m(t-T) \\ &\quad + 2\alpha e_m^T \Lambda K \dot{e}_m + 2e_s^T \Lambda K \dot{e}_s \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、以下の関係式を考える。

$$\begin{aligned} \alpha r_m^T K r_m - \alpha^{-1} r_s^T(t-T) K r_s(t-T) \\ = \{ \alpha r_m + r_s(t-T) \}^T K \{ r_m - \alpha^{-1} r_s(t-T) \} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \alpha^{-1} r_s^T K r_s - \alpha r_m^T(t-T) K r_m(t-T) \\ = \{ \alpha^{-1} r_s + r_m(t-T) \}^T K \{ r_s - \alpha r_m(t-T) \} \end{aligned} \quad (15)$$

(13)式に(14), (15)式を代入することで以下が得られる。

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

(10)式の F_m, F_s を代入し整理する。

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

(6) 式の r_m, r_s を代入し, (11) 式の位置誤差 e_m, e_s で置き換えると以下が得られる.

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

以上より, \dot{V}_{ms} は準負定となり, リアプノフの意味で安定である. さらに, Barbalat's Lemma を用いることで, 位置誤差とその微分 $e_m, e_s, \dot{e}_m, \dot{e}_s$ が原点へ漸近収束することを示す. \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.

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

従って, $\ddot{e}_m, \ddot{e}_s, \dot{e}_m, \dot{e}_s, e_m, e_s$ 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) 式より以下を得る.

$$\begin{aligned}r_m^T \alpha M_m r_m &\leq V_{ms}(x(0)) \\ r_s^T \alpha^{-1} M_s r_s &\leq V_{ms}(x(0)) \\ e_m^T \alpha \Lambda K e_m &\leq V_{ms}(x(0)) \\ e_s^T \alpha^{-1} \Lambda K e_s &\leq V_{ms}(x(0))\end{aligned}$$

$M_m(q_m), M_m(q_s)$ は特性 1 より下に有界, Λ は正定対角行列, $\alpha > 0$ は任意の整数である. 従って, r_m, r_s, e_m, e_s は有界であり, $r_m, r_s, e_m, e_s \in \mathcal{L}_\infty$ である. さらに, r_m, r_s を入力として (6) 式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.

$$Q_i(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+\lambda_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{s+\lambda_n} \end{bmatrix} R_i(s), \quad i = m, s \quad (16)$$

ただし, $R_i(s)$ は $r_i(t)$ を, $Q_i(s)$ は $q_i(t)$ をラプラス変換したものである. (16) 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, $\dot{q}_m(t), \dot{q}_s(t), q_m(t), q_s(t) \in \mathcal{L}_\infty$ である. 仮定 (2) より r_m, r_s が有界なので $F_{Op}, F_{Env} \in \mathcal{L}_\infty$ である. また, (10) 式より $F_m, F_s \in \mathcal{L}_\infty$ である. (4) 式より $\tau_m, \tau_s \in \mathcal{L}_\infty$ である. (1) 式より $\dot{q}_m, \dot{q}_s \in \mathcal{L}_\infty$ である. 以上より, \dot{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 [8] を用いることで $t \rightarrow \infty$ のとき $\dot{V}_{ms} \rightarrow 0$ である. 従って, 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は同調し, 位置誤差 (11) 式とその微分 $\dot{e}_s, \dot{e}_m, e_s, e_m$ は漸近安定となる. また, 全ての信号は有界である. \square

さらに, 次のような命題が成り立つ.

命題 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 (5), (10) 式に対して以下が成り立つ.

$$\alpha q_m(t) = q_s(t), \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (17)$$

Proof. 定理 1 より, 位置誤差 (11) 式が零となることから明らかである. \square

命題 2. 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 (5), (10) 式に対して, 定常状態

$$\ddot{q}_i(t) = \dot{q}_i(t) = 0, q_i(t) = q_i, \quad i = m, s \quad (18)$$

で以下が成り立つ.

$$\alpha F_{Op} = K \Lambda (\alpha q_m - q_s) = F_{Env} \quad (19)$$

Proof. (18) 式の定常状態において, (5) の運動方程式は

$$\begin{cases} F_m = -F_{Op} \\ F_s = F_{Env} \\ K \Lambda (\alpha q_m - q_s) \alpha^{-1} = F_{Op} \\ K \Lambda (\alpha q_m - q_s) = F_{Env} \end{cases}$$

となる. 従って以下が成り立つ.

$$\alpha F_{Op} = K \Lambda (\alpha q_m - q_s) = F_{Env} \quad (20)$$

\square

注意 1 (17), (20) 式より以下のことが分かる.

- $\alpha > 1$: 位置/力を拡大してスレーブを操作できる
 - $\alpha < 1$: 位置/力を縮小してスレーブを操作できる
 - $\alpha = 1$: マスタとスレーブは等価な位置/力で操作できる
- また, 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, 任意の大きさでパワースケーリングを行うことができる.

5. シミュレーションによる検証

シミュレーションでは Fig.3 のような平面 2 自由度ダイレクトドライブロボット 2 台を用いた. マスタロボット及びスレーブロボットは同じ構造・スケールを有しているとして, (1) 式の慣性行列, コリオリ力及び遠心力の行列, 重力効果は以下のようなになる.

$$\begin{aligned}M_i(q_i) &= \begin{bmatrix} M_1 + 2R \cos(q_2) & M_2 + R \cos(q_2) \\ M_2 + R \cos(q_2) & M_2 \end{bmatrix} \\ C_i(q_i, \dot{q}_i) &= \begin{bmatrix} -R \sin(q_2) \dot{q}_2 & -R \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ R \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \\ g_i(q_i) &= 0, \quad i = m, s\end{aligned}$$

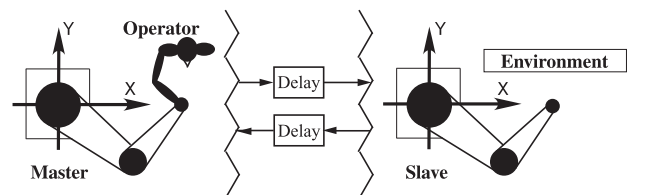


図 3 テレオペレーションシステム

Fig. 3 Teleoperation system

各係数は $M_1 = 0.3657[\text{kgm}^2]$, $M_2 = 0.0291[\text{kgm}^2]$, $R = 0.0227[\text{kgm}]$ とした. 制御ゲイン K, Λ 及びスケーリング要素 α は以下のように設定した.

$$K = \begin{bmatrix} 14 & 0 \\ 0 & 7 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha = 3$$

また, 通信遅延は $T = 0.5[\text{s}]$ とする. 初期条件は $\dot{q}_m(t) = \dot{q}_s(t) = q_m(t) = q_s(t) = 0$ とした. シミュレーションは, 自由空間での応答と環境と接触させたときの応答の 2 種類行った. 環境は Fig.3 のように Y 軸方向の $0.1[\text{m}]$ 離れた位置にあるとして, バネ-ダンパ系でモデル化した.

$$\begin{cases} F_{envy} = 0 & \text{if } y_s < 0.1 \\ F_{envy} = 2\dot{y}_s + 1000(y_s - 0.1) & \text{if } y_s \geq 0.1 \end{cases} \quad (21)$$

ここで, F_{envy} とは Y 軸方向の環境からの反力である. y_s とはスレーブロボットの Y 軸方向の手先位置である. 上式で得られた力をヤコビ行列を用いて各関節に与えた.

全てのシミュレーション結果は応答の比較を容易にするために, 通信遅延だけマスタロボットの信号を右にシフトさせた図となっている. Fig.4 は自由空間でのシミュレーション結果である. スレーブロボットはマスタロボットの α 倍で動作しており, 適切にスケーリングされていることが確認できる. 従って, 通信遅延がある場合でも安定に運動がスケーリングされている. Fig.5 はマスタロボットの位置データを α 倍した結果である. マスタロボットとスレーブロボットの応答が一致しておりパワースケーリングを行ったとしても良好な位置追従性を示している. Fig.6, Fig.7 はスレーブロボットが環境と接触したときのシミュレーション結果である. 操縦者は環境からの反力の $1/\alpha$ 倍の力を感じていることが確認できる. 従って, 環境と接触したとしても安定に力がスケーリングされている. Fig.6, Fig.7 はマスタロボットの位置とトルクのデータを α 倍したものである. 環境からの反力と操縦者の力が定常状態で良好に一致していることが確認できる. また, 環境と接触したときに発生する位置誤差も良好に収束している.

6. おわりに

本研究では, 通信遅延を有する位置追従性を考慮した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パワースケーリング制御手法を提案した. 提案するパワースケーリング制御手法は, 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ものである. リアプノフの安定法を用いることで, 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た. また, シミュレーションにより提案法の有効性を示した. 今後の課題は, 制御実験による理論検証である.

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, May, 1989.
- [2] N. Chopra, M. W. Spong, R. Ortega and N. E. Barabanov, "On Position Tracking in Bilateral Teleoperation," Proc. of

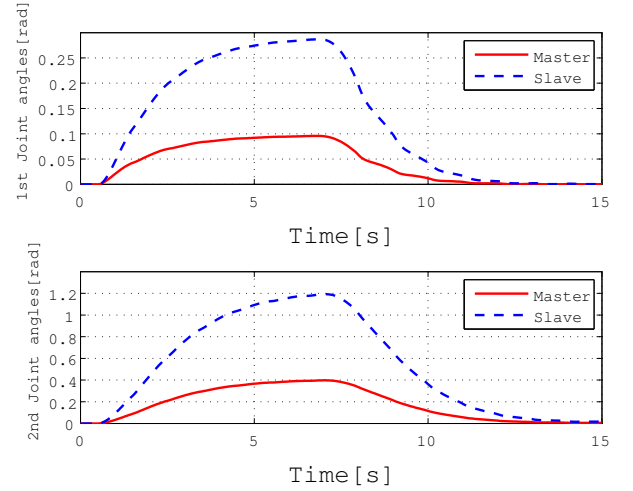


図 4 シミュレーション 1: 自由空間での時間応答
Fig. 4 Simulation 1: Time response in free space

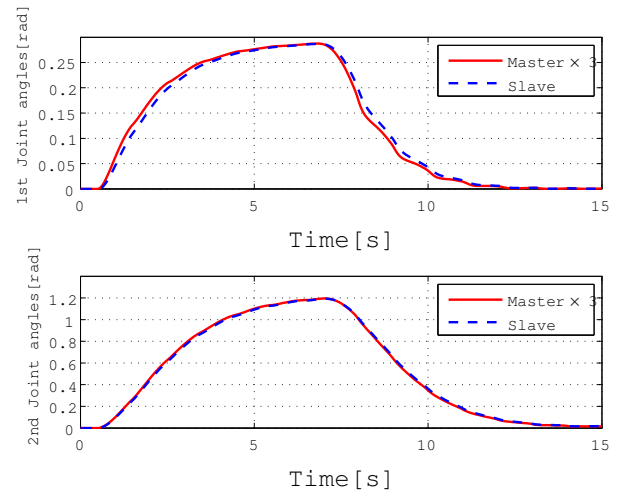


図 5 シミュレーション 1: 自由空間での時間応答
(Master の応答 $\times 3$)
Fig. 5 Simulation 1: Time response in free space
(Master response $\times 3$)

the 2004 ACC, Boston, Massachusetts, June 2004.

- [3] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, "Telemanipulation with Time Delays," The Int. J. of Robotics Research, Vol 23, No.9, pp. 873-890, Sep. 2004.
- [4] 河田久之輔, 滑川 徹, "位置追従性を考慮した対称型テレオペレーション", 第 6 回計測自動制御学会制御部門大会, ウィルあいち, 名古屋市, 愛知県, pp. 491-494, June 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] N. Chopra and M. W. Spong, "On Synchronization of Networked Passive Systems with Time Delays and Application to Bilateral Teleoperation," SICE An. Conf. 2005, Okayama, JAPAN, pp. 3424-3429, August 2005.
- [7] C. Canudas de Wit, B. Siciliano, and G. Bastin, (Eds.), "Theory of Robot Control," Springer-Verlag, 1996.
- [8] H. K. Khalil, "Nonlinear systems second edition," Prentice-Hall, 1996.

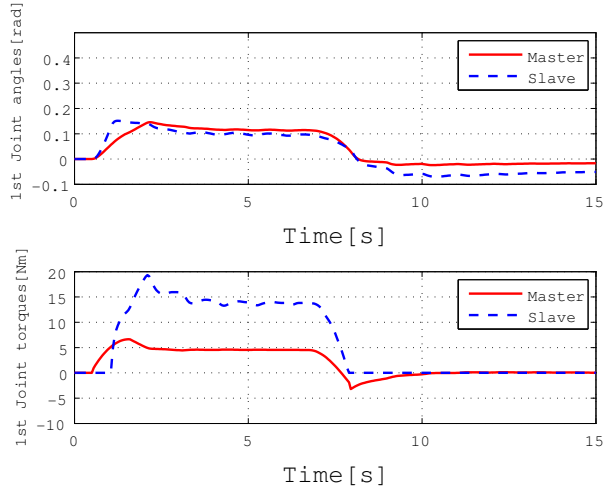


図 6 シミュレーション 2: 1 軸の環境との接触応答
Fig. 6 Simulation 2: Contact with environment at 1st joint

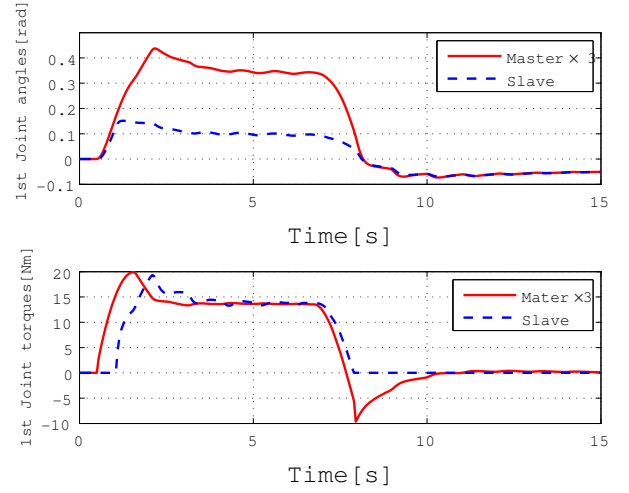


図 8 シミュレーション 2: 1 軸の環境との接触応答
(Master の応答 $\times 3$)
Fig. 8 Simulation 2: Contact with environment at 1st joint
(Master response $\times 3$)

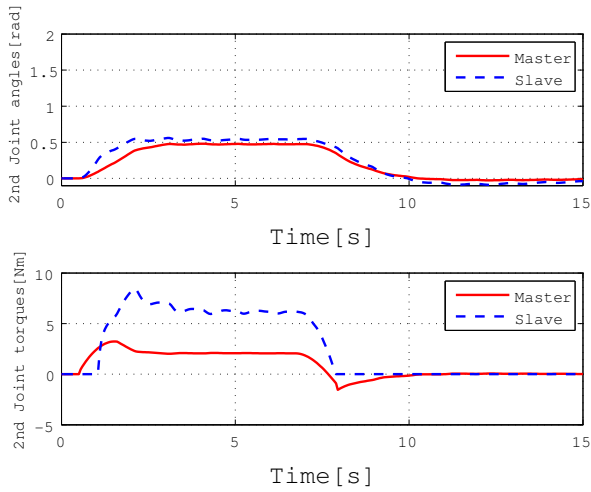


図 7 シミュレーション 2: 2 軸の環境との接触応答
Fig. 7 Simulation 2: Contact with environment at 2nd joint

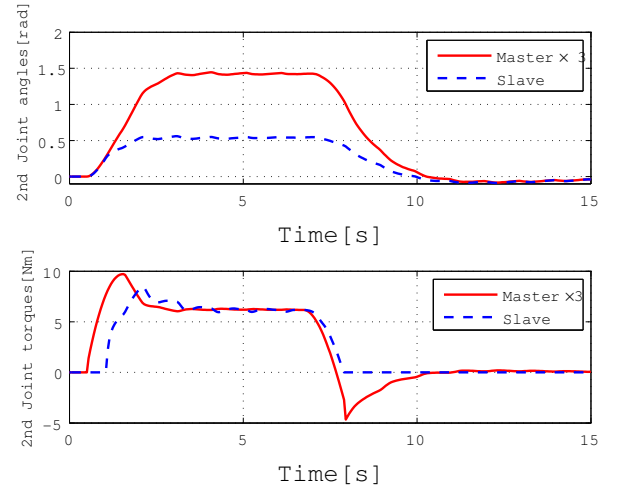


図 9 シミュレーション 2: 2 軸の環境との接触応答
(Master の応答 $\times 3$)
Fig. 9 Simulation 2: Contact with environment at 2nd joint
(Master response $\times 3$)