通信遅延を有する異構造バイラテラルテレオペレーションの同調制御

河 田 久之輔*・吉 田 航 瑛*・滑 川 御*

Synchronized Control for Bilateral Teleoperation with Different Configurations and Communication Delays

Hisanosuke KAWADA*, Kouei YOSHIDA* and Toru NAMERIKAWA*

This paper addresses the problem of the control of bilateral teleoperation with different configurations and communication delays. We propose a synchronized control law with individual gains and power scaling in the task space. Using this method, the end-effector motion and force relationship between the master and slave robots can be specified freely in the task space and the control gains can be independently selected appropriately for the master and slave robots. The passivity of the whole system is proven by using an energy function. Furthermore, the delay-independent asymptotic stability of the origin of the position and velocity errors is proven by using Lyapunov like stability methods in free space and the proposed control law achieves scaled synchronization of the teleoperation. Several experimental results show the effectiveness of our proposed method.

Key Words: teleoperation with different configurations and communication delays, scaled synchronization, Lyapunov-Krasovskii function, passivity

1. はじめに

バイラテラルテレオペレーションとは, 遠隔環境に対して 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 あり,制御工学やロボット工学の分野を中心として精力的に 研究されている^{1),2)}. バイラテラルテレオペレーションにお ける重要な制御問題は,ロボット間の通信路に存在する遅延 によりシステム全体が不安定化することである.したがって, 通信遅延に対する安定性を保証した制御系を構築する必要が ある³⁾. 一方, バイラテラルテレオペレーションが必要とな るさまざまな作業を実際に行なう場合には,マスタおよびス レーブロボットはそれぞれ,人間および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.このように,構造とス ケールの異なるマスタとスレーブでバイラテラルテレオペレー ションを構成することは,人が直接行なうことができない微 細作業や大きな物体を扱う作業が可能となる^{4)~7)}. このよう な異構造バイラテラルテレオペレーションでは、「作業空間で の手先位置の制御」と「マスタとスレーブの間の運動と力の スケーリング」を行なわなければならない.

通信遅延を有するバイラテラルテレオペレーションの安定 化手法は,受動性に基づくスキャッタリング変換⁸⁾が良く知

られている.さらに文献 6) ではスキャッタリング変換⁸⁾を 用いた制御法に対して,スケーリングを行なった場合にも安 定に制御できることが示されている.しかし,スキャッタリ ング変換を用いた制御手法は,速度信号のみで制御されるた めに位置のドリフトが残ったり,力の伝達が不十分である. スキャッタリング変換に位置制御を追加した手法も提案され ているが^{9),10)},安定性が通信遅延に依存している.一方,文 献 11),12) 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,簡単な制御則により遅延を有する複数の システムが互いに同調 (Synchronization) することが示され た.この結果を応用することで遅延と独立なバイラテラルテ レオペレーションの安定性が示され,位置誤差の収束と静的 な力の伝達が達成されている.しかし,文献 11),12) では同 一の構造と大きさのロボットが扱われており,位置や力の信号 のスケーリングが行なわれていない.また,マスタとスレー ブの制御ゲインが等価な場合しか考えていないため、マスタ とスレーブロボットに対して適切な制御ゲインを設計するこ とができないという問題がある.

本稿では,通信遅延を有する異構造バイラテラルテレオペレーションに対して文献11),12)の手法を基にした同調制御 手法を提案する.まずマスタおよびスレープロボットに対して,作業空間における手先位置のダイナミクスを導出する. このダイナミクスに対してフィードバック受動化を行なうことで,位置と速度を含んだ出力信号に関してシステムが受動 的となるようにする.つぎに,無視できない遅延とスケーリ

^{*} 金沢大学大学院自然科学研究科 金沢市角間町

^{*} Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa (Received March 18, 2008)

⁽Revised August 4, 2008)

1

1

ング要素を有した同調制御則によって,マスタとスレーブロ ボットを互いに結合する.ただし,制御則の個々のゲインを, 異構造を考慮して独立に設計できるようにする.提案する制 御手法は,手先の位置と力のスケーリングを個別に任意の大 きさに設定することができる.受動性解析を行なうことでシ ステムの安定性を示す.さらに,テレオペレーションが,遅 延とスケーリング要素に対して独立に漸近安定となり,マス タとスレーブの位置が同調することを示す.最後に,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. 問題設定

2.1 テレオペレーションのダイナミクス

本稿では,2台の n 自由度非線形ロボットマニピュレータ で構成された,次式のダイナミクスを考える.

$$\begin{pmatrix}
M_{m}(q_{m})\ddot{q}_{m}+C_{m}(q_{m},\dot{q}_{m})\dot{q}_{m}+g_{m}(q_{m})=\tau_{m}+J_{m}^{T}F_{op} \\
M_{s}(q_{s})\ddot{q}_{s}+C_{s}(q_{s},\dot{q}_{s})\dot{q}_{s}+g_{s}(q_{s})=\tau_{s}-J_{s}^{T}F_{env}
\end{cases}$$
(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 を表わしており, q_m , $q_s \in R^n$ は関節角度, τ_m , $\tau_s \in R^n$ は入力トルク, $F_{op} \in R^n$ は操縦者からマスタロボットの 手先にかかる力, $F_{env} \in R^n$ はスレープロボットの手先 が環境へ加える力, $M_m(q_m)$, $M_s(q_s) \in R^{n \times n}$ は慣性 行列, $C_m(q_m,\dot{q}_m)\dot{q}_m$, $C_s(q_s,\dot{q}_s)\dot{q}_s \in R^n$ はコリオリ 力および遠心力, $g_m(q_m)$, $g_s(q_s) \in R^n$ は重力項であ る. $J_m(q_m)$, $J_s(q_s) \in R^{n \times n}$ はヤコビアン行列であり, $\dot{x}_i = J_i\dot{q}_i$ のように手先の速度 \dot{x}_m , $\dot{x}_s \in R^n$ と関節角速度 を関係づけることができる.ただし,ヤコビアンに対してつ ぎの仮定が成り立つとする.

[仮定1] ヤコビアン J_m, J_s は常に正則である.

異構造バイラテラル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)を行なう必要がある.そこで,ヤコビアンとその微分 $\ddot{x}_i = J_i \ddot{q}_i + \dot{J}_i \dot{q}_i$ を用いて,(1)式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¹³⁾.

ただし、 $\widetilde{M}_i = J_i^{-T} M_i J_i^{-1}$ 、 $\widetilde{C}_i = J_i^{-T} (C_i - M_i J_i^{-1} \dot{J}_i) J_i^{-1}$ 、 $\widetilde{g}_i = J_i^{-T} g_i$ 、 i = m, s である.作業空間でのダイナミクス (2) は、仮定 1 の下でつぎの特性を有する¹³⁾.

[特性1] $M_i(q_i)$ は正定対称で有界な行列である.

[特性 2] $\tilde{N}_i = \tilde{M}_i(q_i) - 2\tilde{C}_i(q_i, \dot{q}_i)$ は歪対称行列である. 通信路に存在する遅延と遠隔環境に対してつぎを仮定する. [仮定 2] マスタとスレーブの間の通信路の遅延は任意の定



Fig. 1 Teleoperation system

数値とし,マスタからスレーブへの通信路の遅延を $T_m \in R$, スレーブからマスタへの通信路の遅延を $T_s \in R$ とする. [仮定3] 環境は適切な入出力に関して受動的なシステムとしてモデル化できる.

2.2 制御目的

バイラテラルテレオペレーションの基本的な制御目的はシ ステム全体が安定となることであるが,一般的に操縦者や環 境の厳密なモデル化が難しく,解析は困難になる.このよう なシステムの安定性の解析には,受動性の概念が有効である ことが良く知られている^{6),8)-11)}.システム制御における受 動性とは,外部からのエネルギーに対してシステムの内部エ ネルギーが増加しないことを意味している.ここでは,環境 が受動的であるという仮定3の下で,遅延を有する異構造バ イラテラルテレオペレーションシステムの安定性を受動性の 概念を用いてつぎのように定める.

[制御目的1【受動性) Fig.1のテレオペレータと環境が相 互に結合したシステムは,操縦者からの入力とマスタの適切 な出力に対して受動的である.

上述の制御目的が成立するならば,操縦者からの有界な外部エネルギーに対して,システムのエネルギーも有界となる.したがって,操縦者が適切な入力を加えてテレオペレータを操作するならば,システム全体は安定となる.さらに,マスタとスレープの動作が一致することを,同調という考え方を用いてつぎのように定める.

[制御目的2]【スケーリングされた同調) スケーリングと通 信遅延を考慮した位置誤差をつぎのように定義する.

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{m}}(t) := \alpha^{-1} \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}(t - T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{m}}(t) \\ \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{s}}(t) := \alpha \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{m}}(t - T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{s}}(t) \end{cases}$$
(3)

ここで, $\alpha > 0 \in R$ は位置のスケーリング要素である.この とき,テレオペレーションがスケーリングされて同調すると は次式が成り立つことである.

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_{i}(t) \rightarrow 0 \ as \ t \rightarrow \infty, \quad i=m,s \\ \dot{\boldsymbol{e}}_{i}(t) \rightarrow 0 \ as \ t \rightarrow \infty, \quad i=m,s \end{cases}$$
(4)

さらに,力の伝達に関してはつぎの制御目的を定める. [制御目的 3 【スケーリングされた静的な力の伝達) テレオ ペレーションが静止している状態 $\ddot{x}_i = \dot{x}_i = 0, i = m, s$ を 仮定する.このとき,スケーリングされた静的な力の伝達と は次式が成り立つことである.

$$\beta F_{op} = F_{env} \tag{5}$$

ここで, $\beta > 0 \in R$ は力のスケーリング要素を表現している.

3. 制 御 則

上述の制御目的を達成するために,マスタおよびスレーブ ロボットに対してつぎのような制御則を提案する.

3.1 非線形フィードバックによる受動化

まず,入力トルクを次式のように与えることで,非線形フィー ドバックによる手先位置信号に対する受動化を行なう.

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_{m} = \boldsymbol{J}_{m}^{T} \{ \widetilde{M}_{m} \boldsymbol{\Lambda} \dot{\boldsymbol{x}}_{m} - \widetilde{C}_{m} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{x}_{m} + \widetilde{g}_{m} + \boldsymbol{F}_{m} \} \\ \boldsymbol{\tau}_{s} = \boldsymbol{J}_{s}^{T} \{ -\widetilde{M}_{s} \boldsymbol{\Lambda} \dot{\boldsymbol{x}}_{s} - \widetilde{C}_{s} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{x}_{s} + \widetilde{g}_{s} + \boldsymbol{F}_{s} \} \end{cases}$$
(6)

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.(6) 式をダイナミクス(2) へ代入すると次式となる.

$$\begin{vmatrix} \widetilde{M}_m(q_m)\dot{r}_m + \widetilde{C}_m(q_m, \dot{q}_m)r_m = F_{op} + F_m \\ \widetilde{M}_s(q_s)\dot{r}_s + \widetilde{C}_s(q_s, \dot{q}_s)r_s = -F_{env} + F_s \end{vmatrix}$$
(7)

ここで, *r_m*, *r_s* はマスタおよびスレーブロボットの新しい 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.

$$\begin{cases} r_m := \dot{x}_m + \Lambda x_m \\ r_s := \dot{x}_s + \Lambda x_s \end{cases}$$
(8)

ここで,非線形フィードバックによる受動化を行なったダイ ナミクス (7) に関して,文献 11) と同様に次式の受動性が成 り立つ.

$$\int_0^t \boldsymbol{r}_i^T(\tau) \boldsymbol{F}_i'(\tau) d\tau \ge -\sigma_i , \quad i = m, s$$
(9)

ただし, $F'_m = F_m + F_{op}$, $F'_s = F_s - F_{env}$, σ_i は任意の 定数である.

このように,位置と速度の情報を含む新しい出力(8)に対 してマスタおよびスレーブが受動性を保証することになる. したがって(8)式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なうことができる.

3.2 異構造を考慮した同調制御則

つぎに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.

$$\begin{cases} \boldsymbol{F_m}(t) = \boldsymbol{K_m}(\alpha^{-1}\boldsymbol{r_s}(t-T_s) - \boldsymbol{r_m}(t)) \\ \boldsymbol{F_s}(t) = \boldsymbol{K_s}(\alpha\boldsymbol{r_m}(t-T_m) - \boldsymbol{r_s}(t)) \end{cases}$$
(10)

ここで, $K_m = k_m K$, $K_s = k_s K$ であり, $K \in R^{n imes n}$ は各 軸方向に対する制御ゲインを設定する正定対角行列, $k_m > 0$,



Fig. 2 The synchronized control architecture for teleoperator

 $k_s > 0 \in R$ 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制御ゲインである.提案するテレオペレーションのブロック図を Fig. 2 に示す.

従来法^{11),12)}では $K_m = K_s = K$ のようにゲインが同一 である必要がある.そのため,マスタおよびスレーブそれぞ れに対して独立に適切なゲインを設定することができない. 一方,提案法では(10)式のようにゲインを独立に設定するこ とができ,マスタおよび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.これは,後述の制御実験 において位置追従性を改善することができる.また,フィー ドバックおよびフィードフォワード信号に対してスケーリン グ要素をかけ合わせることでスケールの異なるロボットを用 いたテレオペレーションを適切に制御できる.

4. 安定性解析

システムの受動性を解析することで,以下の定理を得ることが出来,制御目的1を満足する.

《定理 1》 仮定 1~3 が満たされるような, テレオペレーションシステム (7), (10) を考える.このとき, Fig. 1 のテレオペレータと環境が相互結合したシステムは, 操縦者の力 F_{op} とマスタの出力 r_m に関して, 次式のように受動的である.

$$\int_{0}^{t} \boldsymbol{F}_{op}^{T}(\zeta) \boldsymbol{r}_{m}(\zeta) d\zeta \geq -\sigma_{ms}$$
(11)

ここで, $\sigma_{ms} \in R$ は任意の定数である.

(証明) 状態 $x = [r_m^T \ r_s^T]^T$ を用いて,エネルギー関数 Vを つぎのように定義する.

$$V(x) = \alpha k_m^{-1} \boldsymbol{r}_m^T(t) \widetilde{\boldsymbol{M}}_m(\boldsymbol{q}_m) \boldsymbol{r}_m(t) + \alpha^{-1} k_s^{-1} \boldsymbol{r}_s^T(t) \widetilde{\boldsymbol{M}}_s(\boldsymbol{q}_s) \boldsymbol{r}_s(t) + \int_{t-T_m}^t \alpha \boldsymbol{r}_m^T(\zeta) \boldsymbol{K} \boldsymbol{r}_m(\zeta) d\zeta + \int_{t-T_s}^t \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_s^T(\zeta) \boldsymbol{K} \boldsymbol{r}_s(\zeta) d\zeta + 2\alpha^{-1} k_s^{-1} \int_0^t \{ \boldsymbol{F}_{env}^T(\zeta) \boldsymbol{r}_s(\zeta) \} d\zeta$$
(12)

ここで,5項目は仮定3の環境が受動的であることから

$$2\alpha^{-1}k_{s}^{-1}\int_{0}^{t} \left\{ \boldsymbol{F}_{env}^{T}(\zeta)\boldsymbol{r}_{s}(\zeta) \right\} d\zeta \ge 0$$
 (13)

が成立する.よって V は正定関数となる.V をシステムの 解軌道に沿って時間微分し,特性2および(7)式を用いて整 理すると次式を得る.

$$\dot{V} = 2\alpha k_m^{-1} \boldsymbol{r}_m^T \boldsymbol{F}_m + 2k_s^{-1} \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_s^T \boldsymbol{F}_s + \alpha k_m^{-1} \boldsymbol{F}_{op}^T \boldsymbol{r}_m + \alpha \boldsymbol{r}_m^T \boldsymbol{K} \boldsymbol{r}_m + \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_s^T \boldsymbol{K} \boldsymbol{r}_s - \alpha \boldsymbol{r}_m^T (t - T_m) \boldsymbol{K} \boldsymbol{r}_m (t - T_m) - \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_s^T (t - T_s) \boldsymbol{K} \boldsymbol{r}_s (t - T_s)$$
(14)

さらに, (10) 式の Fm, Fs を代入し整理すると,

$$\dot{V} = -\alpha \{ \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t - T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t) \}^{T} \\ \times \boldsymbol{K} \{ \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t - T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t) \} \\ - \alpha^{-1} \{ \alpha \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t - T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t) \}^{T} \\ \times \boldsymbol{K} \{ \alpha \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t - T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t) \} \\ + \alpha k_{\boldsymbol{m}}^{-1} \boldsymbol{F}_{op}^{T} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}$$
(15)

が得られる.(15)式において1,2項目は負定なので,次式 を導くことができる.

$$\dot{V} \le \alpha k_m^{-1} \boldsymbol{F}_{op}^T \boldsymbol{r}_m \tag{16}$$

両辺を積分することで次式を得る.

$$V(x) - V(x(0)) \le \alpha k_m^{-1} \int_0^t F_{op}^T(\zeta) r_m(\zeta) d\zeta$$
 (17)

したがって受動性を保証する. ロ さらに,つぎの定理によって制御目的2を満足することが示 される.

《定理 2》 仮定 $1 \sim 3 \ge F_{op} = F_{env} = 0$ を満足するような, テレオペレーションシステム (7), (10)を考える.このとき, (3)式の位置誤差は漸近安定となり,スケーリングされた同 調を達成する.

(証明) 定理 1 のエネルギー関数に対して $F_{op} = F_{env} = 0$ と し,システムの解軌道に沿って時間微分すると次式を得る.

$$\dot{V} = -\alpha \{ \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t-T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t) \}^{T} \boldsymbol{K} \{ \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t-T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t) \} -\alpha^{-1} \{ \alpha \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t-T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t) \}^{T} \boldsymbol{K} \{ \alpha \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t-T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t) \}$$
(18)

上式は準負定で, r_m , $r_s \in \mathcal{L}_\infty$ である.また,(18)式の両辺を積分することで, $\{\alpha^{-1}r_s(t-T_s)-r_m(t)\} \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$, $\{\alpha r_m(t-T_m)-r_s(t)\} \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ を得ることができる.ここで,(10)式に注目すると, F_m , $F_s \in \mathcal{L}_\infty$ である.したがって,(7)式より, \dot{r}_m , $\dot{r}_s \in \mathcal{L}_\infty$ となる.以上より,文献14)の補題を用いることで.

$$\begin{split} \lim_{t \to \infty} |\alpha^{-1} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t - T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t)| &= 0 \\ \lim_{t \to \infty} |\alpha \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t - T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t)| &= 0 \end{split}$$
(19)

となる.ここで,次式を導くことができる.

$$\begin{cases} \alpha^{-1} \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}}(t-T_{\boldsymbol{s}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}} = \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{m}} + \Lambda \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{m}} \\ \alpha \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{m}}(t-T_{\boldsymbol{m}}) - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{s}} = \dot{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{s}} + \Lambda \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{s}} \end{cases}$$
(20)

以上より, $(\{\alpha^{-1}r_s(t-T_s)-r_m\},\{\alpha r_m(t-T_m)-r_s\})$ を入力 とし, (e_m, e_s) を出力とした伝達関数行列が厳密にプロパー で指数安定となる.したがって $\lim_{t\to\infty} \dot{e}_m = \lim_{t\to\infty} \dot{e}_s = \lim_{t\to\infty} e_m = \lim_{t\to\infty} e_s = 0$ となる¹⁵⁾.

制御目的3に関しては、つぎの命題が成り立つ.

[命題1] スレーブが環境と接触して静止している状態 $\dot{x}_i(t) = \ddot{x}_i(t) = 0, i = m, s$ でのテレオペレーションシ ステム (7), (10) を考える.このとき,次式のようにスケー リングされた環境からの反力は操縦者へ伝達される.

$$\beta F_{op} = F_{env} \tag{21}$$

ここで, $\beta = \alpha \frac{k_s}{k_m} > 0$ は力のスケーリング要素である. (証明)(7),(10)式から力の追従性に関して次式を導くことができる.

$$\beta F_{op} - \beta (M_m \dot{r}_m + C_m r_m) + k_s K(r_s(t - T_s) - r_s)$$

= $k_s K(\alpha r_m - r_s)$
= $F_{env} + (\widetilde{M}_s \dot{r}_s + \widetilde{C}_s r_s) - k_s K \alpha (r_m(t - T_m) - r_m)$
(22)

以上より,定常状態 $\ddot{x}_i(t) = \dot{x}_i(t) = 0$,i = m, sを仮定することで次式を導くことができる.

$$\beta F_{op} = k_s K \Lambda(\alpha x_m - x_s) = F_{env}$$
 (23)

また,システムの安定性を損なわずに位置と力を任意の大き さに設定できる.特に,βが大きくなるようにゲインを設定 することで,環境に対して大きな力を加えるパワーアシスト を実現することが可能である.

(注意 2) 力の伝達比 *β* はスケーリング要素 *α* と同調制御則 のゲイン k_m , k_s の比によって定まる.よって, 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, km, ks を小さく設計すると外乱の影響な どを受けて,追従性能に劣化が生じる.さらに(23)式から, 大きな力を伝達するためには大きな位置誤差が必要となり,操 縦者が環境の情報を正確に認識できなくなる.一方,k_m,k_s が大きすぎる場合には,制御則からの操作量がアクチュエー タの入力トルクの限界に達する.さらに,(22)式の左辺3項 目と右辺3項目は,過渡状態での力追従性を大きく劣化させ る原因となる.また,(10)式のマスタ側の制御則は,マスタ の位置と速度をネガティブフィードバックしており, k_m , k_s を大きくすると操縦者が小さな力でマスタを操作することが 困難となる.したがって,上述のことを考慮して望みの力の 伝達比を実現できるように km, ks を定める必要がある. (注意3) 異構造バイラテラル制御に対して大きな比のスケー リングを行なった場合には,スケーリング要素によってセン サノイズが増幅されるという問題がある.したがって,大き な比のスケーリングを行なった場合にはセンサノイズ除去の ためのフィルタを導入することが望ましい.さらに,より自 由なスケーリングを実現するためには,X軸方向とY軸方向 のスケーリング比が異なるようスケーリング要素を対角行列 としたり,可変のスケーリング要素16)を導入することが望ま しい.これらを考慮した上での安定性に関してはさらなる検 討が必要である.

5. 制御実験による検証

ここでは,制御実験により提案する手法の有効性を検証す る.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2自由度平行リンク型アーム,スレーブとし て2自由度直列リンク型アームを用いている.各リンクの 長さ (*l_{m*}*, *l_{s*}) をそれぞれ* Fig. 3 に示す. 操縦者が加える力 F_{op} ,環境へ加える力 F_{env} は力覚センサで直接計測した. ロボットの制御則は, dSPACE 社製の DS1104 制御ボード に実装し,サンプリング時間を1[ms]とした.通信遅延は $T_m = T_s = 0.5 [s]$ として,制御ボード内で仮想的に発生させ た.また,環境はアルミ製の硬い壁とした.コントローラの ゲインは $\Lambda = diag(5,5)$, K = diag(5,5), $k_m = 1$, $k_s = 6$ と設定した.また,スケーリング要素 α,β はロボットのリ ンクの長さの比 $(l_{s*}/l_{m*} = 1.5625 \approx 1.5)$ から $\alpha = 1.5$, $\beta = \alpha k_s / k_m = 9$ と設定した.これよりスレーブの手先の運 動がマスタの $1.5(=\alpha)$ 倍に拡大され,力が $9(=\beta)$ 倍される ことが期待される.制御実験の状況として以下を考える. 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 $k_m = k_s = 1$ とした場合と比較 し, マスタとスレープで制御ゲインを独立に設定することで 良好な制御性能を達成できることを示す.

 $k_m = k_s = 1$ の場合の Case1 の実験結果を Fig. 4,5 に, $k_m = 1$, $k_s = 6$ の場合の Case1 の実験結果を Fig. 6,7 に 示す.Fig. 4 の (a) は,マスタとスレーブの手先位置の X 軸 方向の実際の時間応答を表わしており,(b) は (a) のマスタの データを 1.5 倍し,0.5 秒遅らせて描写している.Fig. 5 は実 験中のマスタ,スレーブの入力トルクを表わしている.Fig. 4 の制御実験では,大きな追従誤差が残っていることがわかる. 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.制御 ゲイン K を大きくし,マスタとスレーブロボットの制御ゲ インをともに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. 5 より,マスタの入 カトルクは定格トルク(マスタ:約0.3 [Nm],スレーブ:約



Fig. 3 Experiment setup

5 [Nm]) 以上になっているために,これ以上マスタ側の制御 ゲインを大きくさせることができない.一方,Fig.6,7 に注 目するとゲインを適切に設定することで,適切な入力で制御 することができ,追従誤差が小さくなっていることがわかる. また,Fig.6,7 では,スレーブの位置が適切にスケーリング されて動作しており,スケーリングされた同調が達成できて いることが確認できる.ここでは,X軸方向の応答だけを示 したが,Y軸方向に関しても同様である.

Case2 の実験結果を Fig. 8~10 に示す. Fig. 8 はマスタ とスレーブの手先の軌道を表わしており,環境のおおよその





Fig. 8 Trajectories in Case 2



Fig. 9 Time responses in Case 2



Fig. 10 Shifted and scaled response results of Fig. 9

配置を "Remote 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 すという操作を行なった.Fig.9 はマスタとスレーブの手先 位置のX,Y軸方向の時間応答,手先にかかる力 *Fop*,*Fenv* のX,Y軸方向の時間応答を表わしており,Fig.10は,Fig.9 のマスタのデータを 1.5 倍して 0.5 秒遅らせて描写している . Fig. 10 から環境と接触して静止している間 (15 [s]-35 [s]),ス レーブが操縦者が加える力の約 9 倍の力を環境へ加えてお り,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 いることが確認できる.また,環境と接触せずに操縦者が力 を加えないとき,スケーリングされた同調が達成されている . Fig. 10 の 10 [s] および 35 [s] 付近でオーバーシュート (点線) が見られるが,これは操縦者がマスタロボットに加えた力で ある.ここでは環境と接触していない場所から制御を始めて おり,操縦者が加えた力のエネルギーがマスタとスレープが 動作する加速度となり,ロボット内部で消費されていること を意味している.今回提案した制御手法では,任意の遅延の 大きさでシステムが不安定化することはなく,通信遅延に対 して安定化できていることを確認している.

6. 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,マスタとスレーブの同調 制御則のゲインを独立に設定できる.また,マスタとスレー プの間で望みの操作比と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遅延と独立な安定性を示し,マスタとス レーブがスケーリングされて同調することを示した.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.一方,大きな操作比 と力伝達比が必要となるような異構造テレオペレーションで は,センサノイズの影響で所望のスケーリング値を設定でき なくなる.また,さまざまな用途での実用化のためにスケー リング要素は,行列や時変にすることが望ましい.これらに 関してはさらなる検討が必要である.

参考文献

- 1) 横小路泰義:マスタ・スレープ制御の理論,日本ロボット学会, 11-6,794/802 (1993)
- 2) 佐野,藤本:マスタスレープシステムの制御系設計の動向,シ ステム/制御/情報,42-7,356/362 (1998)
- 3) P.F. Hokayem and M.W. Spong: Bilateral Teleoperation: An historical survey, Automatica, 42-12, 2035/2057 (2006)
- 4)松日楽,朝倉,番場: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,12-1,149/154 (1994)
- 5) 榊, 舘: 相似バイラテラル制御による操作感覚の増幅, 日本ロ ボット学会誌, 13-3, 441/448 (1995)
- 6)小菅,伊藤,難波,福田: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),64-621,304/309(1998)
- 7)山本,中澤,森川:微細作業を目的とした5自由度マスタス レーブマニピュレータの開発,第50回自動制御連合講演会予 稿集,505/506 (2007)
- 8) R.J. Anderson and M.W. Spong: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **34**-5, 494/501 (1989)
- 9) N. Chopra, M.W. Spong, R. Ortega and N.B. Barabanov: On Tracking Performance in Bilateral Teleoperation, *IEEE Transaction on Robotics*, **22**-4, 861/866 (2006)

- 10) T. Namerikawa and H. Kawada: Symmetric Impedance Matched Teleoperation with Position Tracking, In Proc. of 45th IEEE the Conference on Decision and Control, 4496/4501 (2006)
- 11) N. Chopra and M.W. Spong: On Synchronization of Networked Passive Systems with Time Delays and Application to Bilateral Teleoperation, In Proc. of the SICE Annual Conference 2005, 3424/3429 (2005)
- 12) N. Chopra and M.W. Spong: Adaptive Synchronization of Bilateral Teleoperators with Time Delay, *Advance in Telerobotics*, M. Ferre et al. (Eds), 257/270, Springer-Verlag (2007)
- 13) C.C. de Wit, B. Siciliano and G. Bastin (Eds): Theory of Robot Control, Springer (1996)
- 14) G. Tao: A Simple Alternative to the Barbalat Lemma, IEEE Trans. on Automatic Control, 42-5, 698 (1997)
- 15) R. Ortega and M.W. Spong: Adaptive Motion Control of Rigid Robots: a Tutorial, Automatica, 25-6, 877/888 (1989)
- 16) ヴァンダーポールテン エマヌエル,横小路:可変スケールテレオペレーションの為のカメラ制御方法の検討,第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2006)

「著者紹介]

河 田 久之輔(学生会員)



2005 年長岡技術科学大学工学部機械創造工学課 程卒業.2007 年金沢大学大学院自然科学研究科電 子情報工学専攻博士前期課程修了,同年電子情報 科学専攻博士後期課程入学,現在に至る.通信遅 延を有するテレオペレーションシステムの制御に 興味をもつ.

吉 田 航 瑛(学生会員)



2007年金沢大学工学部電気電子システム工学科 卒業.同年金沢大学大学院自然科学研究科電子情 報工学専攻入学,現在に至る.テレオペレーショ ンシステムの予測制御に興味をもつ.

滑川 徹(正会員)



1994 年金沢大学大学院自然科学研究科システム 科学専攻博士課程中退.同年金沢大学工学部電気・ 情報工学科助手.同講師を経て 2002 年長岡技術 科学大学機械系助教授.2006 年金沢大学大学院自 然科学研究科電子情報科学専攻助教授,2007 年准 教授となり現在に至る.ロバスト制御理論とその ロボティクス応用に関する研究に従事.博士(工 学).システム制御情報学会,IEEE などの会員.