

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

金沢大学 ○滑川 徹 河田 久之輔

Synchronized Control of Teleoperation Systems with Power Scalings and Time Delays

○ Toru NAMERIKAWA and Hisanosuke KAWADA Kanazawa University

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 asymptotical stability of teleoperation with communication delay and power scaling is proven by using a passivity of the systems and Lyapunov stability methods. Several control experimental results show the effectiveness of our proposed method.

Key Words: Teleoperation, Power scaling, Synchronized control, Passivity, Asymptotical stability

1 はじめに

テレオペレーション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。この問題に対して、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が知られている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、代数ループ計算を含む問題がある。文献^{5, 6)}では通信遅延を有するネットワーク結合された受動的システムに対して、グラフ理論⁷⁾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、通信遅延を有するテレオペレーションの位置誤差の収束性が示された。

一方、テレオペレーションが必要となる様々な作業では、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ルリングを行うことをパワースケーリングという⁸⁾。文献⁸⁾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が、位置誤差が残るという問題がある。

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。提案法は⁶⁾の同調制御則に対して、任意のスケール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、制御実験により提案法の有効性を示す。

2 テレオペレーションのダイナミクス

本研究で扱うマスタ及びスレーブロボットのダイナミクスは以下の式で与えられる。

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

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、 $q \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は関節角度、 $\tau \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は入力トルク、 $F_{op} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ 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、 $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ はコリオリ力及び遠心力項、 $g(q) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ は重力項である。

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 $N = M(q) - 2C(q, \dot{q})$ 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 制御目的と制御則

3.1 制御目的

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、パワースケーリングと通信遅延を考慮した位置誤差を以下の様に定義する。

$$\begin{cases} e_m(t) = \alpha^{-1} q_s(t-T) - q_m(t) \\ e_s(t) = \alpha q_m(t-T) - q_s(t). \end{cases} \quad (4)$$

ここで $\alpha (> 0) \in R$ はスケールリング要素である。制御目的を以下に定義する。

制御目的: 同調の達成 (Synchronization)

本研究の目的はテレオペレーションが同調、つまり以下が達成されることとする。

$$\begin{cases} e_i(t) \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty & i = m, s \\ \dot{e}_i(t) \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty & i = m, s. \end{cases} \quad (5)$$

3.2 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⁾。

$$\begin{aligned} \tau_m &= -M_m(q_m)\Lambda\dot{q}_m - C_m(\dot{q}_m, q_m)\Lambda q_m + g_m(q_m) + F_m \\ \tau_s &= -M_s(q_s)\Lambda\dot{q}_s - C_s(\dot{q}_s, q_s)\Lambda q_s + g_s(q_s) + F_s, \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 $\Lambda \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定対角行列、 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(6)式を代入すると以下が得られる。

$$\begin{cases} M_m(q_m)\dot{r}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)r_m = F_m + F_{op} \\ M_s(q_s)\dot{r}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)r_s = F_s - F_{env}, \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 r_m, r_s はマスタ及びスレーブロボットの新しい出力変数であり、以下で定義される。

$$\begin{cases} r_m(t) = \dot{q}_m(t) + \Lambda q_m(t) \\ r_s(t) = \dot{q}_s(t) + \Lambda q_s(t). \end{cases} \quad (8)$$

(7)式に関して次の補題1が成り立つ。

補題 1. (7)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 とする。このときマスタ及びスレーブロボットに関してそれぞれ以下の受動性が成り立つ。

$$\int_0^t r_i^T(z)\dot{\tau}_i(z)dz \geq -\beta, \quad i = m, s \quad (9)$$

Proof. ここで、以下のような正定関数を考える。

$$V_i(r_i(t)) = \frac{1}{2} r_i^T(t) M_i(q_i) r_i(t), \quad i = m, s \quad (10)$$

次に、システムの解軌道に沿って V_i を時間微分する。

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \frac{1}{2} r_i^T \dot{M}_i r_i + r_i^T M_i \dot{r}_i \\ &= \frac{1}{2} r_i^T \underbrace{\{\dot{M}_i - 2C_i\}}_{=0(\text{特性 2})} r_i + r_i^T \dot{\tau}_i = r_i^T \dot{\tau}_i, \quad i = m, s \end{aligned} \quad (11)$$

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。

$$\int_0^t r_i(z)^T \dot{\tau}_i(z) dz \geq -V(r_i(0)), \quad i = m, s \quad (12)$$

□

3.3 パワースケーリングを考慮した同調制御則

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。

$$\begin{cases} F_m(t) = K(\alpha^{-1} r_s(t-T) - r_m(t)) \\ F_s(t) = K(\alpha r_m(t-T) - r_s(t)) \end{cases} \quad (13)$$

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。Fig.1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、(7)式の非線形補償を行ったマスタ及びスレーブロボットである。

3.4 安定性解析

提案する制御構造の安定性解析を行うが、ここでは以下の仮定を満たすように遠隔操作するものとする。

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。

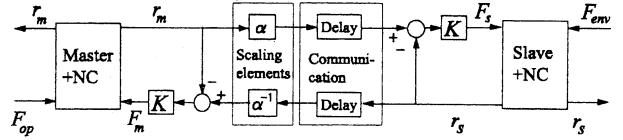


Fig. 1: The Synchronization control architecture with power scaling

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。

(7), (13)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(7), (13)式を考える。このとき、システムは同調し、(4)式の位置誤差とその微分 $e_m, e_s, \dot{e}_m, \dot{e}_s$ 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。

$$\begin{aligned} V_{ms}(x(t)) &= \alpha r_m^T(t) M_m(q_m) r_m(t) + \alpha^{-1} r_s^T(t) M_s(q_s) r_s(t) \\ &\quad + \alpha e_m^T(t) \Lambda K e_m(t) + \alpha^{-1} e_s^T(t) \Lambda K e_s(t) \\ &\quad + 2\alpha^{-1} \int_0^t \{F_{env}^T(z) r_s(z)\} dz \\ &\quad + 2\alpha \int_0^t \{-F_{op}^T(z) r_m(z)\} dz \\ &\quad + \int_{t-T}^t \{\alpha r_m^T(z) K r_m(z) + \alpha^{-1} r_s^T(z) K r_s(z)\} dz \end{aligned} \quad (14)$$

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ため(15)式5, 6項目の準正定性が保証される。よって関数 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。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} &= 2\alpha r_m^T F_m + 2\alpha^{-1} r_s^T F_s \\ &\quad + \alpha r_m^T K r_m - \alpha^{-1} r_s^T(t-T) K r_s(t-T) \\ &\quad + \alpha^{-1} r_s^T K r_s - \alpha r_m^T(t-T) K r_m(t-T) \\ &\quad + 2\alpha e_m^T \Lambda K \dot{e}_m + 2e_s^T \Lambda K \dot{e}_s \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、以下の関係式を考える。

$$\alpha r_m^T K r_m - \alpha^{-1} r_s^T(t-T) K r_s(t-T) \quad (16)$$

$$= \{\alpha r_m + r_s(t-T)\}^T K \{r_m - \alpha^{-1} r_s(t-T)\}$$

$$\alpha^{-1} r_s^T K r_s - \alpha r_m^T(t-T) K r_m(t-T) \quad (17)$$

$$= \{\alpha^{-1} r_s + r_m(t-T)\}^T K \{r_s - \alpha r_m(t-T)\}$$

(15)式に(17), (18)式を代入し、更に(13)式の F_m, F_s を代入し整理すると最終的に以下が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} &= -\dot{e}_m^T \alpha K \dot{e}_m - e_m^T \alpha \Lambda K \Lambda e_m \\ &\quad - \dot{e}_s^T \alpha^{-1} K \dot{e}_s - e_s^T \alpha^{-1} \Lambda K \Lambda e_s. \end{aligned} \quad (18)$$

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¹⁰⁾。 \dot{V}_{ms} の一様連続性を示すために、以下の導関数 \dot{V}_{ms} を考える。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} = & -2\ddot{e}_m^T \alpha K \dot{e}_m - 2\dot{e}_m^T \alpha \Lambda K \Lambda e_m \\ & - 2\ddot{e}_s^T \alpha^{-1} K \dot{e}_s - 2\dot{e}_s^T \alpha^{-1} \Lambda K \Lambda e_s. \end{aligned} \quad (19)$$

上式より、 $\ddot{e}_m, \ddot{e}_s, \dot{e}_m, \dot{e}_s, e_m, e_s$ 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、(15) 式より $r_m^T \alpha M_m r_m \leq V_{ms}(x(0))$, $r_s^T \alpha^{-1} M_s r_s \leq V_{ms}(x(0))$, $e_m^T \alpha \Lambda K e_m \leq V_{ms}(x(0))$, $e_s^T \alpha^{-1} \Lambda K e_s \leq V_{ms}(x(0))$ が成り立つ。

$M_m(q_m), M_m(q_s)$ 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 (8) 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。

$$Q_i(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+\lambda_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{s+\lambda_n} \end{bmatrix} R_i(s), \quad i = m, s \quad (20)$$

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。(20) 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、(13) 式より $F_m, F_s \in \mathcal{L}_\infty$ である。(6) 式より $\tau_m, \tau_s \in \mathcal{L}_\infty$ である。(1) 式より $\ddot{q}_m, \ddot{q}_s \in \mathcal{L}_\infty$ 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 Lemma⁹⁾ 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 (4) 式とその微分 $e_s, e_m, \dot{e}_s, \dot{e}_m$ は漸近安定となる。□

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 (7), (13) 式に対して定常状態 ($t \rightarrow \infty$) で以下が成り立つ。

$$\alpha q_m(t) = q_s(t), \quad (21)$$

$$\ddot{q}_i(t) = \dot{q}_i(t) = 0, q_i(t) = q_i, \quad i = m, s \quad (22)$$

$$\alpha F_{op} = K \Lambda (\alpha q_m - q_s) = F_{env}. \quad (23)$$

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、任意の大きさでパワースケーリングを行うことができる。

4 制御実験による検証

制御実験には同一の 2 台の 2 リンク-ダイレクトドライブマニピュレータを用いる (Fig. 2 参照)⁴⁾。オペレータと環境への力情報 ((1) 式の F_{env}, F_{op}) をフォーストルクセンサで直接計測する。スレーブロボット側

の環境は硬い強化プラスチックの壁とした。RT-Linux を用いたリアルタイム制御装置を構成し、サンプリング時間 1 [ms] で制御則を実装した。通信遅延は 0.5[s] であり、定数で既知とする。

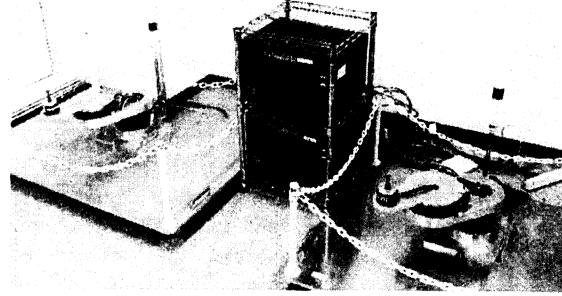


Fig. 2: Experimental setup

ここでマスタ及びスレーブロボットは同じ構造・スケールを有しており、(1) 式の慣性行列、コリオリ力及び遠心力の行列、重力効果は以下ようになる。

$$\begin{aligned} M_i(q_i) &= \begin{bmatrix} \theta_1 + 2\theta_3 \cos(q_2) & \theta_2 + \theta_3 \cos(q_2) \\ \theta_2 + \theta_3 \cos(q_2) & \theta_2 \end{bmatrix} \\ C_i(q_i, \dot{q}_i) &= \begin{bmatrix} -\theta_3 \sin(q_2) \dot{q}_2 & -\theta_3 \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \theta_3 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \\ g_i(q_i) &= 0, \quad i = m, s. \end{aligned}$$

ここで、 $\theta_1 = 0.3657[\text{kgm}^2]$, $\theta_2 = 0.0291[\text{kgm}^2]$, $\theta_3 = 0.0227[\text{kgm}]$ である。またコントローラ的设计パラメータ K と Λ は以下のように選定し、スケーリング要素 α は 2 と設定した。つまりスレーブロボットの動作とトルクがマスタロボットの 2 倍となることが期待される。

$$K = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad \alpha = 2.$$

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: スレーブと環境と接触している遠隔操作

結果を以下の Fig. 3-6 に示す。図よりすべての実験結果において安定となっている。現在のところ本制御則を用いた操作中に不安定化されることは無い。

Case 1 の結果を Figs. 3, 4 に示す。Fig. 3 が実時間におけるスレーブとマスタの角度応答を示す。Fig. 4 はマスタの角度を 2 倍し、横軸に 0.5[s] 遅れさせて表現した結果である。Fig. 4 より、目標である、つまりスレーブロボットの動作とトルクがマスタロボットの 2 倍となっており、制御目的である同調 (synchronization) が達成されていることが確認できる。

Case 2 の実験結果を Fig. 5, 6 に示す。2.5-12.5 [sec] の間、スレーブが環境に接触しており、その反力がオペレータに正確に伝わっていることが分かる。トルクの反射を介してオペレータは環境情報を取得でき、環境のトルク情報はほぼオペレータトルクの 2 倍となっている。Fig. 6 も Fig. 4 と同様の処理を施した図である。これらの結果より、環境とスレーブとの接触力は正確にマスタ側に伝達されていることが分かる。スレーブが環境と接触していない (12.5-18[sec]) 場合にはオペ

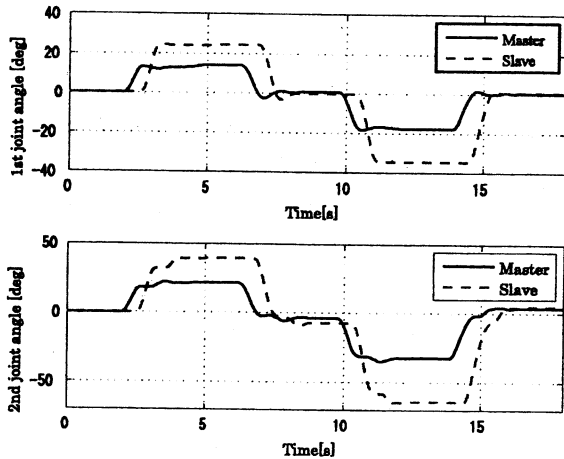


Fig. 3: Case 1: Time response in free space

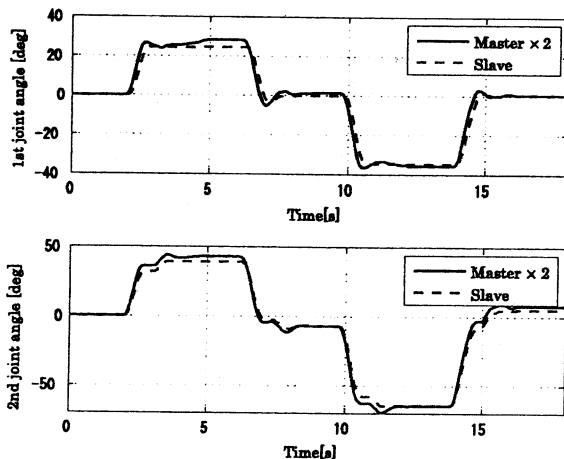


Fig. 4: Case 1: Time response in free space (Master response $\times 2$)

レータの力は殆ど零となり、接触・非接触の切替にも安定性を保持している。以上により、パワースケーリングと通信遅延を考慮した同調制御 (synchronization) が実システムに対して達成されていることが確認された。

5 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。

提案する制御手法は、同調制御則に対して任意のスケール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。また制御実験により提案法の有効性を示した。

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, May, 1989.
- 2) N. Chopra, M. W. Spong, R. Ortega and N. E. Barabanov, "On Position Tracking in Bilateral Teleoperation," Proc. of the 2004 ACC, Boston, June 2004.

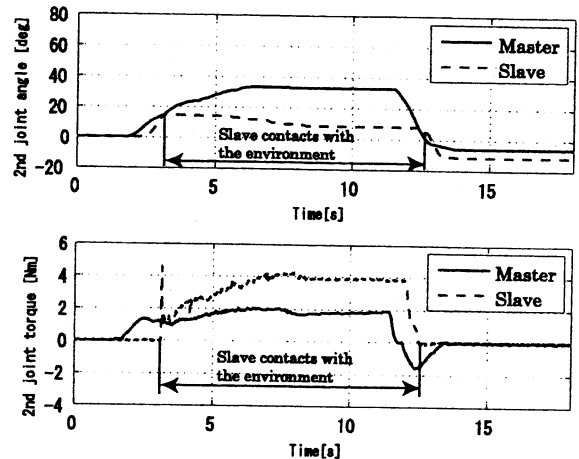


Fig. 5: Case 2: Contact with environment at 2nd joint

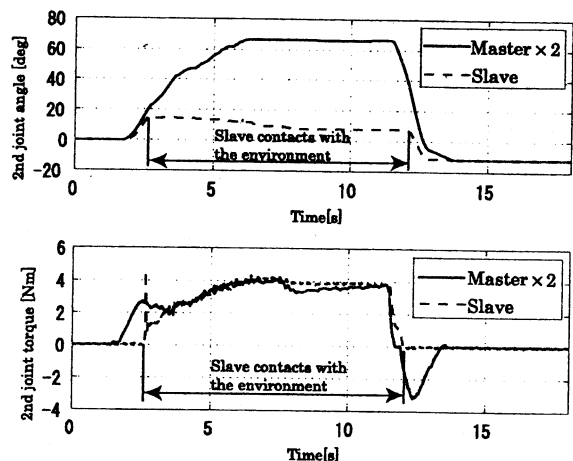


Fig. 6: Case 2: Contact with environment at 2nd joint (Master response $\times 2$)

- 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, pp. 491-494, June 2006.
- 5) 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, pp. 3424-3429, August 2005.
- 6) M. W. Spong and N. Chopra, "Synchronization of Networked Lagrangian Systems," 3rd IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, pp.1-9, Nogyo 2006.
- 7) J.A. Fax and R.M. Murray, "Information flow and cooperative control of vehicle formations," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.49, No.4, pp.1465-1476, 2004.
- 8) 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.
- 9) H. K. Khalil, "Nonlinear systems second edition," Prentice-Hall, 1996.
- 10) M. S. de Queiroz, D. M. Dawson, S. P. Nagarkatti and F. Xiang, "Lyapunov-Based Control of Mechanical Systems", Birkhäuser, pp. 275-281, 2000.