

(\dot{q}_m, F_{op}) は受動性を満たさないことは明らかであり、操縦者が一定の力を供給するシステムとして扱うことができる。また、遠隔環境に関しては文献^{3, 4, 5, 6})と同様に入出力対 (\dot{q}_s, F_{env}) が受動的なシステムである。

通信路に対しては、インターネット等を想定して Fig. 1 のような時変な時間遅延が発生するものを考える。さらに、通信遅延の関数 $T_m(t), T_s(t)$ に対して以下を仮定する。

仮定 1 通信遅延 $T_m(t), T_s(t)$ は時間に関する微分可能な連続関数であり次式を満たす。

$$0 \leq T_i(t) \leq T_i^+ < \infty, |\dot{T}_i(t)| < 1, |\ddot{T}_i(t)| < \infty \quad i = m, s \quad (4)$$

ここで、 $T_i^+ \in \mathcal{R}$ は遅延の最大値で定数、 $\dot{T}_i(t) = \frac{dT_i(t)}{dt} \in \mathcal{R}$ は遅延の変化率である。また、通信路の最大往復遅延 $T_{ms}^+ = T_m^+ + T_s^+$ は既知で、遅延の変化率 $\dot{T}_s(t)$ はマスタ側で、 $\dot{T}_m(t)$ はスレーブ側で測定可能であるとす。

さらに、後述の安定性解析のために以下を仮定する。

仮定 2 全ての信号は拡張 \mathcal{L}_2 空間に属している。ただし、マスタとスレーブの速度は、 $t < 0$ において $\dot{q}_m = \dot{q}_s = 0$ である。

3 制御目的

時変の通信遅延を有するテレオペレーションに対して次のような制御目的を考える。

制御目的 1 (安定性) Fig. 1 の環境と操縦者を含めたテレオペレーションシステムは、時変の通信遅延に対して安定である。

制御目的 2 (マスタとスレーブの位置協調) 定常状態 $t \rightarrow \infty$ において、操縦者が力を加えず ($F_{op} = 0$)、環境と接触していない ($F_{env} = 0$) とき、次のように位置誤差 q_E が零となりマスタとスレーブが協調して動作する。

$$q_E(t) := q_m(t) - q_s(t) \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (5)$$

制御目的 3 (静的な力反射) 定常状態 $t \rightarrow \infty$ において、環境からの反力が操縦者に次式のように正確に伝達される。

$$F_{op} = F_{env} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (6)$$

4 制御則 1

上述の制御目的を達成するために次のような制御則 1 を考える。

制御則 1

$$\begin{cases} \tau_m(t) = K_{md}(t) \{ \dot{q}_s(t - T_s(t)) - \dot{q}_m(t) \} \\ \quad - \{ D_{md}(t) + D_p \} \dot{q}_m(t) + K_p \{ q_s(t - T_s(t)) - q_m(t) \} \\ \tau_s(t) = K_{sd}(t) \{ \dot{q}_m(t - T_m(t)) - \dot{q}_s(t) \} \\ \quad - \{ D_{sd}(t) + D_p \} \dot{q}_s(t) + K_p \{ q_m(t - T_m(t)) - q_s(t) \} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $K_{md}(t), K_{sd}(t), D_{md}(t), D_{sd}(t)$ は、通信遅延の変化率 $\dot{T}_i(t)$ に依存した時変ゲインで次のように定める。

$$\begin{cases} K_{md}(t) = (1 - \dot{T}_s(t))K \\ K_{sd}(t) = (1 - \dot{T}_m(t))K \end{cases} \quad \begin{cases} D_{md}(t) = \frac{\dot{T}_s(t)}{2}K \\ D_{sd}(t) = \frac{\dot{T}_m(t)}{2}K \end{cases} \quad (8)$$

また、(7), (8) において $D_p, K_p, K \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定対角行列とする。このように、遅延の変化率に依存した時変ゲインは文献⁶)で導入されているが、提案する制御則 1 では追加した時変ゲイン D_{md}, D_{sd} によって遅

延が正の方向に変化する場合にシステムのエネルギーを消散させ、その結果システムを安定化させる働きを示すという特徴がある。また、位置制御器 K_p はマスタとスレーブ間の位置の協調を達成し位置誤差を零にすることを保証する。提案する制御則 1 はロボットや操縦者及び環境モデルのパラメータに依存しない。従って、モデルパラメータの不確かさに対してロバストな制御則である。

4.1 安定性解析

システムの安定解析を容易にするために閉ループシステムの導出を行う。まず、マスタの位置の平衡点を $\bar{q}_m \in \mathcal{R}^n$ とし、スレーブの位置の平衡点を $\bar{q}_s \in \mathcal{R}^n$ としてそれぞれ、次式を満足する任意の定数で定義する。

$$\begin{cases} \bar{F}_{op} = K_p(\bar{q}_m - \bar{q}_s) \\ 0 = K_e \bar{q}_s - K_p(\bar{q}_m - \bar{q}_s) \end{cases} \quad (9)$$

次に、上述の平衡点が原点となるような新しい位置の変数を次式のように定義する。

$$\begin{cases} \bar{q}_m(t) = q_m(t) - \bar{q}_m \\ \bar{q}_s(t) = q_s(t) - \bar{q}_s \end{cases} \quad (10)$$

以上より、(1) に対して (2), (3), (7), (9) を代入し、(10) を用いて整理することで、次のような閉ループシステムを得る。

$$\begin{cases} M_m \ddot{\bar{q}}_m + C_m \dot{\bar{q}}_m = K_{md}(t) \{ \dot{\bar{q}}_s(t - T_s(t)) - \dot{\bar{q}}_m \} \\ \quad - \{ D_{md}(t) + D_p \} \dot{\bar{q}}_m + K_p \{ \bar{q}_s(t - T_s(t)) - \bar{q}_m \} \\ M_s \ddot{\bar{q}}_s + C_s \dot{\bar{q}}_s = K_{sd}(t) \{ \dot{\bar{q}}_m(t - T_m(t)) - \dot{\bar{q}}_s \} \\ \quad - \{ D_{sd}(t) + D_p \} \dot{\bar{q}}_s + K_p \{ \bar{q}_m(t - T_m(t)) - \bar{q}_s \} \\ \quad - B_e \bar{q}_s - K_e \bar{q}_s \end{cases} \quad (11)$$

(11) の閉ループテレオペレーションシステムに対して次の定理 1 が成り立つ。

定理 1 Fig. 1 のような時変の通信遅延を有するテレオペレーションシステム (11) を考える。仮定 1, 2 が成り立ち、ゲイン K_p が次式の条件を満たすとす。

$$K_p < 2D_p / T_{ms}^+ \quad (12)$$

このとき、システムの平衡点 $\dot{\bar{q}}_m, \dot{\bar{q}}_m, \bar{q}_m, \bar{q}_m$ は漸近安定となり、 $\lim_{t \rightarrow \infty} q_m(t) = \bar{q}_m, \lim_{t \rightarrow \infty} q_s(t) = \bar{q}_s$ となる。つまり、制御目的 1 が達成される。

proof: 状態ベクトル $x(t) = [\dot{\bar{q}}_m^T(t) \quad \dot{\bar{q}}_s^T(t) \quad \bar{q}_m^T(t) \quad \bar{q}_s^T(t)]^T$ を用いて、システムの Lyapunov-Krasovskii 関数を次のように定義する。

$$\begin{aligned} V_{ms}(x) = & \dot{\bar{q}}_m^T(t) M_m(q_m) \dot{\bar{q}}_m(t) + \dot{\bar{q}}_s^T(t) M_s(q_s) \dot{\bar{q}}_s(t) \\ & + \{ \bar{q}_m(t) - \bar{q}_s(t) \}^T K_p \{ \bar{q}_m(t) - \bar{q}_s(t) \} + \bar{q}_s^T(t) K_e \bar{q}_s(t) \\ & + \int_{t-T_m(t)}^t \dot{\bar{q}}_m^T(\xi) K \dot{\bar{q}}_m(\xi) d\xi + \int_{t-T_s(t)}^t \dot{\bar{q}}_s^T(\xi) K \dot{\bar{q}}_s(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (13)$$

次に、システム (11) の解軌道に沿って V_{ms} を時間微分し整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} = & - \{ \dot{\bar{q}}_m^T K_{md}(t) \dot{\bar{q}}_m - 2\dot{\bar{q}}_m^T K_{md}(t) \dot{\bar{q}}_s(t - T_s(t)) \\ & \quad + \dot{\bar{q}}_s^T(t - T_s(t)) K_{md}(t) \dot{\bar{q}}_s(t - T_s(t)) \} \\ & - \{ \dot{\bar{q}}_s^T K_{sd}(t) \dot{\bar{q}}_s - 2\dot{\bar{q}}_s^T K_{sd}(t) \dot{\bar{q}}_m(t - T_m(t)) \\ & \quad + \dot{\bar{q}}_m^T(t - T_m(t)) K_{sd}(t) \dot{\bar{q}}_m(t - T_m(t)) \} \\ & - 2\dot{\bar{q}}_m^T D_p \dot{\bar{q}}_m + 2\dot{\bar{q}}_m^T K_p \{ \bar{q}_s(t - T_s(t)) - \bar{q}_s \} \\ & - 2\dot{\bar{q}}_s^T D_p \dot{\bar{q}}_s + 2\dot{\bar{q}}_s^T K_p \{ \bar{q}_m(t - T_m(t)) - \bar{q}_m \} \\ & - 2\dot{\bar{q}}_s^T B_e \bar{q}_s \end{aligned} \quad (14)$$

上式の第1, 2項目に対して平方完成を行い速度誤差 $\dot{e}_m = \dot{q}_s(t - T_s(t)) - \dot{q}_m$, $\dot{e}_s = \dot{q}_m(t - T_m(t)) - \dot{q}_s$ で置き換えることで次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ms} = & -\dot{e}_m^T K_{md}(t) \dot{e}_m - \dot{e}_s^T K_{sd}(t) \dot{e}_s - 2\dot{q}_s^T B_e \dot{q}_s \\ & - 2\dot{q}_m^T D_p \dot{q}_m + 2\dot{q}_m^T K_p (\dot{q}_s(t - T_s(t)) - \dot{q}_s) \\ & - 2\dot{q}_s^T D_p \dot{q}_s + 2\dot{q}_s^T K_p (\dot{q}_m(t - T_m(t)) - \dot{q}_m) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、関係式 $\int_0^{T(t)} \dot{q}(t - \xi) d\xi = \tilde{q}(t - T(t)) - \tilde{q}$ を用いて、両辺を $[0, t_f]$ で積分することで次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} \dot{V}_{ms} dt = & -\int_0^{t_f} \dot{e}_m^T K_{md}(t) \dot{e}_m dt - \int_0^{t_f} \dot{e}_s^T K_{sd}(t) \dot{e}_s dt \\ & - 2 \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T B_e \dot{q}_s dt - 2 \int_0^{t_f} \dot{q}_m^T D_p \dot{q}_m dt - 2 \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T D_p \dot{q}_s dt \\ & - 2 \int_0^{t_f} \dot{q}_m^T K_p \int_0^{T_s(t)} \dot{q}_s(t - \xi) d\xi dt \\ & - 2 \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T K_p \int_0^{T_m(t)} \dot{q}_m(t - \xi) d\xi dt \end{aligned} \quad (16)$$

(16) 式の右辺第6,7項目に注目するとヤングの不等式及びシュワルツの不等式と仮定1, 2を用いることで次式のような不等式を得ることが出来る。

$$\begin{aligned} -2 \int_0^{t_f} \{ \dot{q}_m^T K_p \int_0^{T_s(t)} \dot{q}_s(t - \xi) d\xi \} dt \\ \leq T_s^+ \int_0^{t_f} \dot{q}_m^T K_p \dot{q}_m dt + T_s^+ \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T K_p \dot{q}_s dt \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} -2 \int_0^{t_f} \{ \dot{q}_s^T K_p \int_0^{T_m(t)} \dot{q}_m(t - \xi) d\xi \} dt \\ \leq T_m^+ \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T K_p \dot{q}_s dt + T_m^+ \int_0^{t_f} \dot{q}_m^T K_p \dot{q}_m dt \end{aligned} \quad (18)$$

(17)(18) を (16) に代入することで次式を得る。

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} \dot{V}_{ms}(x) dt \leq & -2 \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T B_e \dot{q}_s dt \\ & - \int_0^{t_f} \dot{e}_m^T K_{md}(t) \dot{e}_m dt - \int_0^{t_f} \dot{e}_s^T K_{sd}(t) \dot{e}_s dt \\ & - \int_0^{t_f} \dot{q}_m^T \{ 2D_p - T_{ms}^+ K_p \} \dot{q}_m dt \\ & - \int_0^{t_f} \dot{q}_s^T \{ 2D_p - T_{ms}^+ K_p \} \dot{q}_s dt \end{aligned} \quad (19)$$

仮定1より $1 - T_i(t) > 0$, $i = m, s$ である。従って、(8) の $K_{md}(t), K_{sd}(t)$ は常に正定となり (19) の第2,3項目は負定となる。従って、(12) の不等式を満足するように K_p, D_p を選択することで、(19) 式は準負定となる。リアプノフの安定定理より、 $V(x) > 0$ で $\dot{V}(x) \leq 0$ なのでシステムは安定となり、 $x(t) = [\dot{q}_m^T \ \dot{q}_s^T \ \tilde{q}_m^T \ \tilde{q}_s^T]^T$ は有界となる。また、(19) より \dot{e}_m, \dot{e}_s も有界となる。(11) より、 \tilde{q}_m, \tilde{q}_s は有界である。以上より、Barbalatの補題⁷⁾を用いることで、 $\dot{e}_m, \dot{e}_s, \dot{q}_m, \dot{q}_s$ の原点は漸近安定となり、 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_s = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_s = 0$ となる。さらに、 \tilde{q}_m, \tilde{q}_s は有界となることは簡単に示せる。従って、 \tilde{q}_m, \tilde{q}_s は一様連続となり、再度 Barbalatの補題⁷⁾を用いることで、 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}_s = 0$ となる。以上より、 $t \rightarrow \infty$ において(11) の閉ループシステムは次のようになる。

$$\begin{cases} \tilde{q}_s(t - T_s(t)) - \tilde{q}_m = 0 \\ \tilde{q}_m(t - T_m(t)) - \tilde{q}_s = K_p^{-1} K_e \tilde{q}_s \end{cases} \quad (20)$$

ここで、 $\tilde{q}_i(t - T_i(t)) = \tilde{q}_i - \int_{t-T_i(t)}^t \dot{q}_i dt$, $i = m, s$ の関係式を用いると次式が得られる。

$$K_p^{-1} K_e \tilde{q}_s = 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (21)$$

以上より、 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}_s = 0$ となり、システムの平衡点 $\dot{q}_m, \dot{q}_s, \tilde{q}_m, \tilde{q}_s$ は漸近安定となる。最終的に $\lim_{t \rightarrow \infty} q_m(t) = \bar{q}_m, \lim_{t \rightarrow \infty} q_s(t) = \bar{q}_s$ が達成される。□

上述の定理から次のような系が導かれる。

系1 Fig. 1のような時変の通信遅延を有するテレオペレーションシステム(1), (7)を考える。仮定1, 2が成立し、ゲイン K_p が(12)式の条件を満たすとす。このとき以下が成立する。

1) $F_{op} = 0, K_e = 0$ を仮定する。このとき、(5)の位置誤差 q_E は零になる。つまり、制御目的2が達成される。

2) 次式のように静的な力の反射が達成される。

$$F_{op} = K_p(\tilde{q}_m - \tilde{q}_s) = K_e \tilde{q}_s = F_{env} \quad (22)$$

つまり、制御目的3が達成される。

proof: (3), (9), と定理1より明らかである。□

注意1 系1の2)の結果から、(7)の位置制御ゲイン K_p は、マスタとスレーブの間の位置誤差によって発生する力の大きさを定めることができる。しかし、(7)に対して大きな消散ゲイン D_p を与えることはシステムの応答を遅くし、操縦者の操作性が劣化する。従って、力の反射性能と操作性のトレードオフを考慮してゲインを設計する必要がある。

5 制御則2

前節で提案した制御則1は、遅延の変化率に依存した時変ゲインを用いていたが実装が容易でない。そこで、以下の制御則2を提案する。

制御則2

$$\begin{cases} \tau_m(t) = K_d \{ \dot{q}_s(t - T_s(t)) - \dot{q}_m(t) \} - \{ D_d + D_p \} \dot{q}_m(t) \\ \quad + K_p \{ q_s(t - T_s(t)) - q_m(t) \} \\ \tau_s(t) = K_d \{ \dot{q}_m(t - T_m(t)) - \dot{q}_s(t) \} - \{ D_d + D_p \} \dot{q}_s(t) \\ \quad + K_p \{ q_m(t - T_m(t)) - q_s(t) \} \end{cases} \quad (23)$$

ここで、 $K_d, D_d, D_p \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定対角行列である。(1)に対して(2), (3), (9), (23), を代入し、(10)を用いて整理することで、次のような閉ループシステムを得る。

$$\begin{cases} M_m \ddot{q}_m + C_m \dot{q}_m = K_d \{ \dot{q}_s(t - T_s(t)) - \dot{q}_m \} \\ \quad - \{ D_d + D_p \} \dot{q}_m + K_p \{ \tilde{q}_s(t - T_s(t)) - \tilde{q}_m \} \\ M_s \ddot{q}_s + C_s \dot{q}_s = K_d \{ \dot{q}_m(t - T_m(t)) - \dot{q}_s \} \\ \quad - \{ D_d + D_p \} \dot{q}_s + K_p \{ \tilde{q}_m(t - T_m(t)) - \tilde{q}_s \} \\ \quad - B_e \dot{q}_s - K_e \tilde{q}_s \end{cases} \quad (24)$$

(24)の閉ループテレオペレーションシステムに対して次の定理2が成り立つ。

定理2 Fig. 1のような時変の通信遅延を有するテレオペレーションシステム(24)を考える。仮定1, 2が成立し、通信遅延の最大変化率 $|T_i(t)| \leq T^* < 1, i = m, s$ が既知であるとする。また、ゲイン K_p, K_d が次式の条件を満足するとす。

$$K_p < 2D_p/T_{ms}^+, \quad K_d \leq 2(1 - T^*)D_d/T^* \quad (25)$$

このとき、システムの平衡点 $\dot{q}_m, \dot{q}_s, \tilde{q}_m, \tilde{q}_s$ は漸近安定となり、 $\lim_{t \rightarrow \infty} q_m(t) = \bar{q}_m, \lim_{t \rightarrow \infty} q_s(t) = \bar{q}_s$ となる。つまり、制御目的1が達成される。

proof: 省略 (定理 1 の proof を参照) □

(7) の制御則 1 と比較すると (23) の制御則 2 は遅延の変化率 $\dot{T}_i(t)$ を直接測定する必要がないという利点がある。また、制御則 1 と同様に系 1 および注意 1 が成立する。

6 シミュレーションによる検証

ここでは、提案したテレオペレーションの有効性をシミュレーションによって検証する。マスタ及びスレーブは同じ構造・スケールの直列リンク型平面 2 自由度ダイレクトドライブロボットとする。(1) 式の慣性行列、コリオリ力及び遠心力の行列は次式で与えられる。

$$M_m = M_s = \begin{bmatrix} M_1 + 2R \cos(q_2) & M_2 + R \cos(q_2) \\ M_2 + R \cos(q_2) & M_2 \end{bmatrix}$$

$$C_s = C_m = \begin{bmatrix} -R \sin(q_2) \dot{q}_2 & -R \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ R \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

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。通信遅延の関数は次のような正弦波関数で与える。

$$T_m(t) = 0.1 \sin t + 0.4, \quad \dot{T}_m(t) = 0.1 \cos t$$

$$T_s(t) = 0.2 \sin t + 0.4, \quad \dot{T}_s(t) = 0.2 \cos t$$

このとき、通信路の最大往復遅延は $T_{ms}^+ = 1.1[\text{s}]$ となる。ここでは、(7) の制御則 1 に対する検証のみを行う。制御ゲイン K 及び D_p は試行錯誤で、 K_p は (12) を満足するように次のように設定する。

$$K = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad D_p = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}, \quad K_p = \begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 7.2 \end{bmatrix}$$

シミュレーションは、次のような 2 種類の状況を想定して行った。

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

実際のテレオペレーションを想定して操縦者は任意の力を与えるとした。また、環境は (3) のようなバネ-ダンパ系として次のようにモデル化した。

$$\begin{cases} F_{envy} = 0 & \text{if } y_s < 0.05 \\ F_{envy} = \dot{y}_s + 1000(y_s - 0.05) & \text{if } y_s \geq 0.05 \end{cases} \quad (26)$$

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。Fig. 2 は Case 1 の場合のシミュレーション結果である。マスタの動作にスレーブが正確に追従しており、マスタとスレーブの位置が協調して動作していることが確認できる。Fig.3 は、Case 2 の場合の 2 軸のシミュレーション結果である。ここでは、2.4 ~ 11[s] の間スレーブが環境と接触している。この結果から環境と接触しても安定に遠隔操作できることが確認できる。環境と接触している間は、マスタとスレーブには位置誤差が発生しており、その結果環境に力を与えることができている。また、環境からの接触力が正確に操縦者に伝達されていることが確認できる。操縦者が力を加えない場合 (11 ~ 15[s]) では、マスタとスレーブの位置が再度協調し零に収束している。

7 おわりに

本稿では、時変の通信遅延を有する非線形テレオペレーションに対して新しい制御則を提案した。従来法⁶⁾では、時変の通信遅延に対してスキュアリング変換を用いていたが、本研究ではスキュアリング変換を用

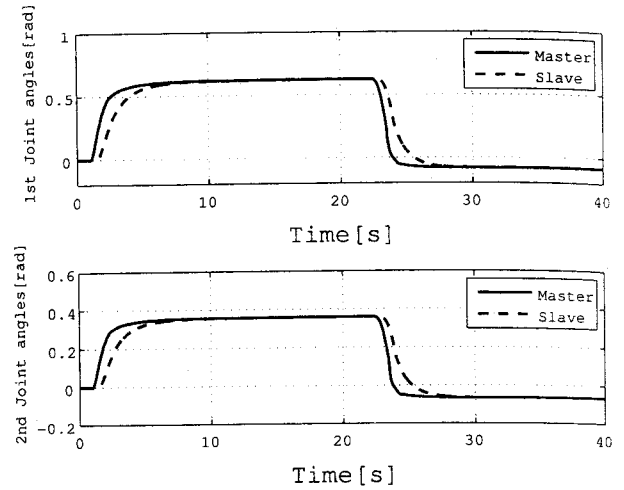


Fig. 2: Time responses in Case 1 (Position)

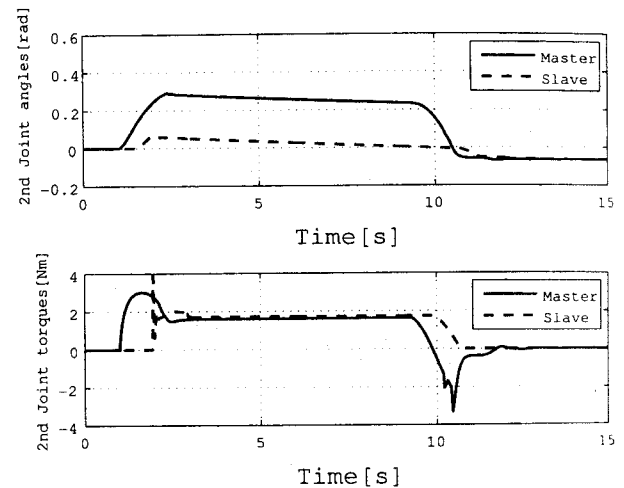


Fig. 3: Time responses in Case 2 (2nd joint)

いない単純な PD 型の制御則が特徴であり、Lyapunov Krasovski 関数を用いることで、時変の通信遅延を有するテレオペレーションが漸近安定となることを示した最後に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、実機による提案法の検証である。

参考文献

- 1) P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, Vol. 42, No. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- 2) 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.
- 3) T. Namerikawa and H. Kawada, "Symmetric Impedance Matched Teleoperation with Position Tracking," *Proc. of Conf. on Decision & Control*, pp. 4496 - 4501, 2006.
- 4) D. Lee and M. W. Spong, "Passive Bilateral Teleoperation With Constant Time Delay," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 269-281, 2006.
- 5) R. Lozano, N. Chopra and M. W. Spong, "Convergence Analysis of Bilateral Teleoperation with Constant Human Input," *Proc. of the 2007 American Control Conference*, pp. 1443-1448, 2007.
- 6) N. Chopra, M. W. Spong, S. Hirche and M. Buss, "Bilateral Teleoperation over the Internet: the Time Varying Delay Problem," *Proc. of the 2003 American Control Conference*, pp. 155-160, 2003.
- 7) Hassan K. Khalil, *Nonlinear System*, second edition, Prentice-Hall, 1996.