

環境の不確かさを考慮したマスタ・スレーブシステムのロバスト制御

Robust Control of Master-Slave Robotic System Considering Environmental Uncertainties

滑川 徹 (長岡技術科学大学)

林 鋭渠 (長岡技術科学大学)

Toru NAMERIKAWA, Nagaoka University of Technology, Kamitomiokacho1603-1, Nagaoka, Niigata
 Ruiqu LIN, Nagaoka University of Technology

The paper deals with robust control of a master-slave robotic system. We construct a master-slave system by using two 2-DOF robot manipulators and design a robust control system via impedance shaping and μ -Synthesis considering various uncertainties: environment and operator dynamics, perturbation of impedance model and time delay in telecommunications. The proposed control methodology can guarantee the robust stability and the robust performance for all these uncertainties of the master-slave system. An example of robust master-slave robotic system is presented and discussed via numerical simulations.

Key Words: Master-Slave System, Impedance Linearizing model, Uncertainties, Robust Control, μ -Synthesis

1. はじめに

人間が直接作業することが困難な環境でのテレオペレーション技術に関する研究が近年盛んに行われている。しかしながら環境やオペレータの特性の不確かさを考慮したマスタ・スレーブシステムには、多自由度ロボットでの適用や伝達遅れの検討が不十分である⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究では、2自由度 SICE-DD ロボットマニピュレータ⁽³⁾に対してインピーダンス整形を行い、マニピュレータのダイナミクスを見かけ上非干渉・線形化する。線形化されたマニピュレータ2台の仮想モデルによるマスタ・スレーブシステム、環境およびオペレータを統合して制御対象として表現する。導出した一般化プラントに対して μ -シンセシスを用いてオペレータの特性と環境の不確かさおよび伝達遅れを考慮したロバスト制御系を構成し、シミュレーションにより有効性を検証する。

2. 2自由度マスタ・スレーブシステムの動特性

2自由度マスタ・スレーブシステムはFig.1のようにマスタアーム、スレーブアーム、オペレータおよび環境の四つの要素により構成される。

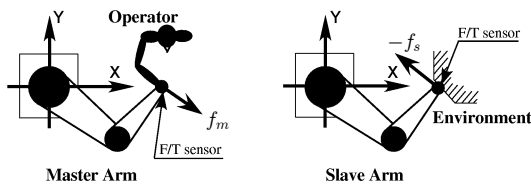


Fig. 1 Master-Slave System with 2 DOF Manipulator

2.1 2自由度ロボットのダイナミクス

マスタおよびスレーブの数式モデルは次式で与えられる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau_m + J^T(\theta)f_m \quad (1)$$

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau_s - J^T(\theta)f_s \quad (2)$$

ここで、 $M(\theta)$ 、 $C(\theta, \dot{\theta})$ 、 $G(\theta)$ はそれぞれ慣性行列、遠心力コリオリ力項、重力項である。 τ_m 、 τ_s はそれぞれマスタ、スレーブの駆動トルク、 θ は関節変位ベクトル、 f_m はオペレータから

マスタへの力、 f_s はスレーブから環境への力、 J はヤコビ行列である。作業座標系におけるエンドエフェクタの位置・姿勢を表すベクトル $X = [x, y]^T$ と関節角度 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ との関係が

$$X = P(\theta) \quad (3)$$

$$\dot{X} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (4)$$

で与えられる。ただし、 $P(\theta)$ は順運動学、 $J(\theta)$ ヤコビアンである。(4) 式を微分すると加速度の関係は次式で与えられる。

$$\ddot{\theta} = J^{-1}(\theta)(\ddot{X} - \dot{J}(\theta)\dot{\theta}) \quad (5)$$

2.2 インピーダンス整形によるロボットの非干渉・線形化

マスタおよびスレーブは以下のような機械インピーダンスモデルを持つように設定する⁽⁴⁾。

$$M_m\ddot{X}_m + D_m\dot{X}_m + K_mX_m = Z_m\dot{X}_m = f_{km} + f_m \quad (6)$$

$$M_s\ddot{X}_s + D_s\dot{X}_s + K_sX_s = Z_s\dot{X}_s = f_{ks} - f_s \quad (7)$$

ここで、インピーダンス Z_m, Z_s は次式で与えられる。

$$Z_m = M_ms + D_m + \frac{K_m}{s} \quad (8)$$

$$Z_s = M_ss + D_s + \frac{K_s}{s} \quad (9)$$

$M_m, M_s, D_m, D_s, K_m, K_s$ はそれぞれ 2×2 行列で、マスタおよびスレーブのインピーダンスモデルの質量行列、粘性係数行列、バネ定数行列であり、通常 $K_m = K_s = 0$ であることが多いので、以下では $K_m = K_s = 0$ の場合について考える。 f_{km}, f_{ks} はそれぞれマスタおよびスレーブのアクチュエータによる力、 X, Y 軸に対応して、 $f_{km} = [f_{kxm}, f_{kym}]^T$ 、 $f_{ks} = [f_{kxs}, f_{kys}]^T$ とした。(6) 式を (5) 式に代入した後、(5) 式を (1) 式に代入し、マスタのインピーダンス制御則は

$$\tau_m = M(\theta)\{M_mJ(\theta)\}^{-1}\{-M_m\dot{J}(\theta)\dot{\theta} - D_mJ(\theta)\dot{\theta} + f_m + f_{km}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) - J^T(\theta)f_m \quad (10)$$

となる。同様に、スレーブの制御則は次式で与えられる。

$$\tau_s = M(\theta)\{M_sJ(\theta)\}^{-1}\{-M_s\dot{J}(\theta)\dot{\theta} - D_sJ(\theta)\dot{\theta} - f_s + f_{ks}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J^T(\theta)f_s \quad (11)$$

これらの制御則によって、ロボットは式 (6), (7) のような見かけ上の特性をもつモデルを実現でき、このとき式 (8), (9) によって機械系の操作性を決定できる。

2.3 オペレータおよび環境の特性

オペレータ, 環境への入力を \dot{X}_m, \dot{X}_s , オペレータ, 環境からの出力を f_m, f_s とすると, 入出力関係は次のようになる.

$$Z_{op}(s)\dot{X}_m = f_{op} - f_m \quad (12)$$

$$Z_{env}(s)\dot{X}_s = f_s \quad (13)$$

ここで, f_{op} はオペレータの筋力による外力であり, オペレータ及び環境のインピーダンスは次のようなバネ-質量-ダンパ系で表わされるものとする.

$$Z_{op}(s) = M_{op}s + D_{op} + \frac{K_{op}}{s} \quad (14)$$

$$Z_{env}(s) = M_{env}s + D_{env} + \frac{K_{env}}{s} \quad (15)$$

ただし, $M_{op}, M_{env}, D_{op}, D_{env}, K_{op}, K_{env}$ は 2×2 行列で, それぞれ質量行列, 粘性係数行列, バネ定数行列を表す.

3. 制御系設計

3.1 フィードバック制御系の構成

Fig.2 に示すように線形化されたアームの各軸に対して, 2 自由度マスタ・スレーブシステムのフィードバック制御系を構成した. 本稿では X, Y 軸のコントローラ K_x, K_y を各軸独立に設計し, K_x, K_y を同一のものとした. 以降では X 軸のコントローラ K_x の設計について述べる.

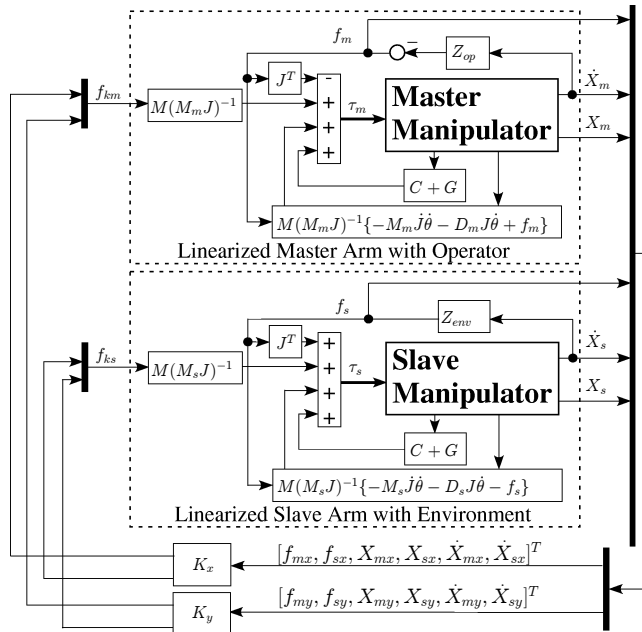


Fig. 2 Feedback Control System

3.2 制御目的の設定

マスタ・スレーブシステムの制御性能は両アーム間の位置誤差の挙動と両アームの平均速度の挙動を指定するように指標を設定する⁽²⁾. Fig.3 に示すようにマスタ・スレーブシステム自体がある種のインピーダンスの形で表現することを考える⁽²⁾.

$$e = x_m - x_s, \quad e_d = \lambda \frac{f_{mx} + f_{sx}}{2} \quad (16)$$

$$f_{mx} - f_{sx} = Z_i(s)v_{ms} \quad (17)$$

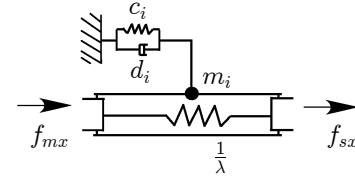


Fig. 3 Intervening Impedance Model

$$Z_i(s) = m_i s + d_i + \frac{c_i}{s}, \quad v_{ms} = \frac{v_m + v_s}{2} \quad (18)$$

ここで, x_m, x_s, v_m, v_s はそれぞれ X 軸方向マスタおよびスレーブの位置, 速度, e, v_{ms} はそれぞれ両アーム間の位置誤差, 速度平均値である. (16) 式は両インピーダンス間の位置誤差の挙動を表すものであり, $\lambda > 0$ とすることによって, マスタ, スレーブ両側からの外力によってマスタとスレーブの相対距離が伸縮するような機械式マスタ・スレーブマニピュレータの伝達系の弾性を模することができる. (17) 式は外力に対する平均速度の挙動を示している. これによって, マスタ・スレーブシステムは仮想的なインピーダンス $Z_i(s)$ を有する. ここで, m_i, d_i, c_i はそれぞれ見かけ上の質量, 粘性係数, ばね定数を表す. このとき外力に対する目標速度 v_{msd} を

$$v_{msd} = \frac{1}{Z_i} (f_{mx} - f_{sx}) \quad (19)$$

とし, 両インピーダンスの平均速度 v_{ms} が v_{msd} に追従するように制御を行う. 以上より, 制御性能の指標として, e_{rel}, e_{abs} を次のように定義し, この二つの量をできるだけ小さくすることを制御目的とする.

$$e_{rel} = e_d - e, \quad e_{abs} = v_{msd} - v_{ms} \quad (20)$$

3.3 インピーダンスモデルの変動

マスタ, スレーブのインピーダンスモデル $Z_m(s), Z_s(s)$ の X 軸成分を $Z_{mx}(s), Z_{sx}(s)$ とし, 無視された非線形性やノイズを考慮すると以下のように表現する.

$$Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx}(s) + \delta Z_{mx}(s) \quad (21)$$

$$Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx}(s) + \delta Z_{sx}(s) \quad (22)$$

$\hat{Z}_{mx}(s), \hat{Z}_{sx}(s)$ はそれぞれマスタおよびスレーブのインピーダンスのノミナル値である. $\delta Z_{mx}, \delta Z_{sx}$ はそれぞれのインピーダンスの変動であり, それぞれ次式で与えられるとする.

$$\delta Z_{mx}(s) = \delta m_m s + \delta b_m, \quad \delta Z_{sx}(s) = \delta m_s s + \delta b_s \quad (23)$$

ただし, $\delta m_m, \delta m_s, \delta b_m, \delta b_s$ はそれぞれインピーダンスモデルの質量および粘性係数の変動値であり, それぞれの範囲は $|\delta m_m| \leq \Delta m_m, |\delta m_s| \leq \Delta m_s, |\delta b_m| \leq \Delta b_m, |\delta b_s| \leq \Delta b_s$ とする. 重み関数 $W_m(s), W_s(s)$ をつぎのように定める.

$$W_m(s) = \Delta m_m s + \Delta b_m, \quad W_s(s) = \Delta m_s s + \Delta b_s \quad (24)$$

以上により,

$$|\delta Z_{mx}(j\omega)| = \sqrt{\delta m_m^2 \omega^2 + \delta b_m^2} \leq \sqrt{\Delta m_m^2 \omega^2 + \Delta b_m^2} = |W_m(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \quad (25)$$

$$|\delta Z_{sx}(j\omega)| = \sqrt{\delta m_s^2 \omega^2 + \delta b_s^2} \leq \sqrt{\Delta m_s^2 \omega^2 + \Delta b_s^2} = |W_s(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \quad (26)$$

となる．ここで，伝達関数 $\Delta_m, \Delta_s (\|\Delta_m\|_\infty \leq 1, \|\Delta_s\|_\infty \leq 1)$ を用いることで，つぎの関係が得られる．

$$Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx}(s) + \delta Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx} + W_m \Delta_m \quad (27)$$

$$Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx}(s) + \delta Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx} + W_s \Delta_s \quad (28)$$

3.4 オペレータおよび環境のモデル化誤差

オペレータおよび環境 $Z_{op}(s), Z_{env}(s)$ のモデル誤差を $\delta Z_{op}, \delta Z_{env}$ とし，

$$|\delta Z_{op}(j\omega)| \leq |W_{op}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \quad (29)$$

$$|\delta Z_{env}(j\omega)| \leq |W_{env}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R \quad (30)$$

となるような重み関数を選べると

$$Z_{op}(s) = \hat{Z}_{op}(s) + \delta Z_{op}(s) = \hat{Z}_{op} + W_{op} \Delta_{op} \quad (31)$$

$$Z_{env}(s) = \hat{Z}_{env}(s) + \delta Z_{env}(s) = \hat{Z}_{env} + W_{env} \Delta_{env} \quad (32)$$

ここで， $\hat{Z}_{op}(s), \hat{Z}_{env}(s)$ はそれぞれオペレータ，環境のノミナルモデルである．伝達関数 $\Delta_{op}, \Delta_{env}$ は $\|\Delta_{op}\|_\infty \leq 1, \|\Delta_{env}\|_\infty \leq 1$ で与えられる．

3.5 むだ時間

むだ時間による安定性の補償問題を H_∞ 理論で定式化する方法について Fig.4 に示すようにむだ時間 e^{-Ls} (a) を乗法的な摂動 (b) として扱う方法がよく知られている．任意の正数 ω と $0 < L < L_{max}$ に対してつぎの不等式が成り立つ⁽⁵⁾．

$$|e^{-j\omega L} - 1| \leq \left| \frac{2.1j\omega}{j\omega + \frac{1}{L_{max}}} \right| \quad (33)$$

これより，むだ時間 e^{-Ls} ($0 < L < L_{max}$) に対して重み関数 W_t と不確かさ $\Delta_t (\|\Delta_t\|_\infty \leq 1)$ を用いることにより乗法的な摂動 (c) として取扱うことができる．

$$W_t(s) = \frac{2.1s}{s + \frac{1}{L_{max}}} \quad (34)$$

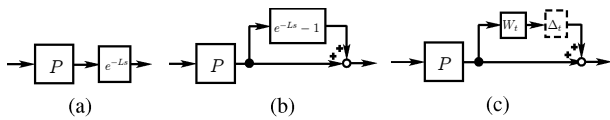


Fig. 4 Time Delay Uncertainty

3.6 一般化プラントの構成

インピーダンスモデルの変動，オペレータ，環境のモデル化誤差およびむだ時間に対してロバスト安定となり，かつ設定した制御目的を実現するため，Fig.5 のような一般化プラントを構成した．Fig.5 の中で， d_m, d_s はマスタおよびスレーブに加えられた力外乱であり， d_m がシステムの共振周波数付近で小さくなるような重み関数 W_d を付加した． $W_{rel}(s), W_{abs}(s)$ は制御性能に対する重みであり，制御入力力が過大にならないように重み $W_{um}(s), W_{us}(s)$ を導入した． n_v は観測量 y に加わる仮想的な入力である．

Fig.5 の一般化プラントがロバスト制御性能を達成するために，仮想的な摂動 $\Delta_{perf} (\|\Delta_{perf}\|_\infty \leq 1)$ を導入し，Fig.6 に示

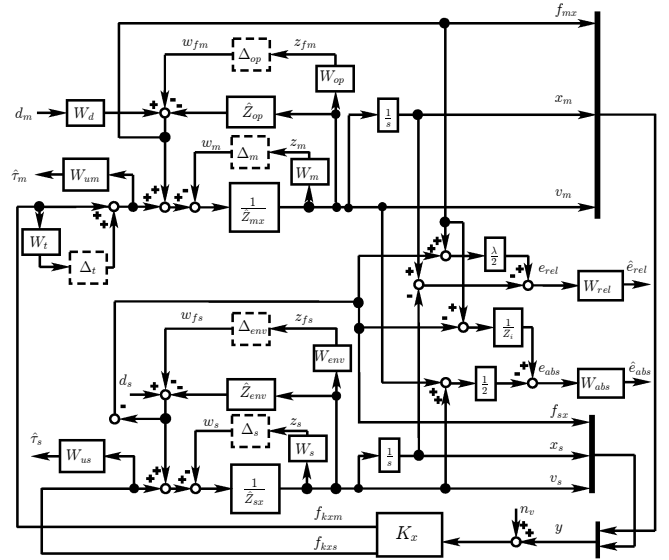


Fig. 5 Generalized Plant with Uncertainties

した構造化ロバスト安定化問題に帰着させる．システムの不確かさは6ブロックのブロック対角行列として

$$\Delta_{mss} = \text{diag}[\Delta_{op}, \Delta_{env}, \Delta_m, \Delta_s, \Delta_t, \Delta_{perf}] \quad (35)$$

と定義する．ロバスト制御性能条件は以下で与えられる．

$$\sup_{\omega \in R} \mu_{\Delta_{mss}} [F_t(P(j\omega), K(j\omega))] < 1 \quad (36)$$

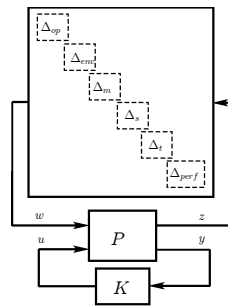


Fig. 6 Robust Performance

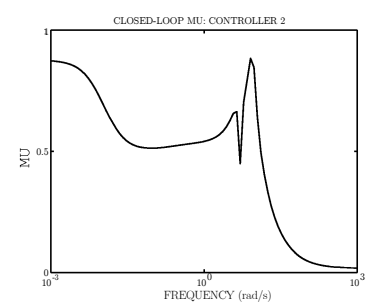


Fig. 7 μ plot

4. シミュレーションによる検証

4.1 コントローラの計算

MATLAB の μ -Analysis and Synthesis Toolbox で提供される半自動 D-K イタレーションにより，コントローラを求めた．マスタ，スレーブのモデルは次のように設定した．

$$m_m = m_s = 2.0[\text{kg}], d_m = d_s = 0.2[\text{Ns/m}]$$

オペレータ，環境は X, Y 軸ともに次のように設定した．

$$m_{op} = 1.0[\text{kg}], d_{op} = 2.0[\text{Ns/m}], k_{op} = 10.0[\text{N/m}]$$

$$m_{env} = 3.0[\text{kg}], d_{env} = 1.0[\text{Ns/m}], k_{env} = 100.0[\text{N/m}]$$

さらに，介在インピーダンスのパラメータは

$$m_i = 1.0[\text{kg}], d_i = 0.01[\text{Ns/m}], c_i = 0[\text{N/m}], \lambda = 0[\text{m/N}]$$

とした．設計パラメータである $W_{rel}, W_{abs}, W_{um}, W_{us}, W_d$ は次のように選んだ．

$$W_{rel} = \frac{2200}{s+10}, W_{abs} = \frac{80}{s+10}, W_{um} = W_{us} = \frac{0.1s+0.01}{s+1000}$$

$$W_d = \frac{s^2 + 25}{s^2 + 2s + 25}$$

また最大むだ時間 L_{max} を 10[msec] とし、モデルの変動、オペレータおよび環境のモデル化誤差がともにノミナル値の 10% 以内と設定した。以上の設定により 2 回のイタレーションで構造化特異値 μ は 1 以下となり、ロバスト性能条件を満たすコントローラが得られた。 μ の値を Fig.7 に示す。

4.2 シミュレーションの設定

マスタ、スレーブのモデル変動、オペレータ、環境のモデル化誤差はノミナルモデルの 10% として次のように設定した。

$$\begin{aligned} \delta m_m &= 0.1m_m = 0.2[kg], & \delta d_m &= 0.1d_m = 0.02[Ns/m] \\ \delta m_s &= 0.1m_s = 0.2[kg], & \delta d_s &= 0.1d_s = 0.02[Ns/m] \\ \delta m_{op} &= 0.1m_{op} = 0.1[kg], & \delta d_{op} &= 0.1d_{op} = 0.2[Ns/m] \\ \delta k_{op} &= 0.1k_{op} = 1.0[N/m] \\ \delta m_{env} &= 0.1m_{env} = 0.3[kg], & \delta d_{env} &= 0.1d_{env} = 0.1[Ns/m] \\ \delta k_{env} &= 0.1k_{env} = 10.0[N/m] \end{aligned}$$

またオペレータからの入力として次のステップ入力を用いた。

$$f_{opx} = \begin{cases} 5[N] & t \geq 1[s] \\ 0[N] & t < 1[s] \end{cases}, \quad f_{opy} = \begin{cases} 2[N] & t \geq 1[s] \\ 0[N] & t < 1[s] \end{cases}$$

4.3 シミュレーションの結果と考察

性能の比較のため、力帰還型マスタ・スレーブシステムを構成した⁽³⁾。Fig.8, Fig.9 はオペレータ、環境としてノミナルモデルを用いて、それぞれむだ時間なし、むだ時間を考慮した (2[msec]) 場合について μ -シンセシスと力帰還型の位置、力の応答を示したものである。二つの制御則において X, Y 軸の位置、力ともに一定値に収束し、安定している。介在インピーダンスの設定により μ -シンセシスの力応答は誤差が生じている。むだ時間がある場合 (Fig.9) ステップ入力を入れた瞬間、力帰還型の力応答は大きな振動が発生した。Fig.10 は 5[s] のところからオペレータ、環境モデルともに 10% 変動する場合、位置、力の応答を示し、位置応答は殆ど影響を及ぼさないが、力応答は μ -シンセシスの変動が小さく良好な結果が得られた。

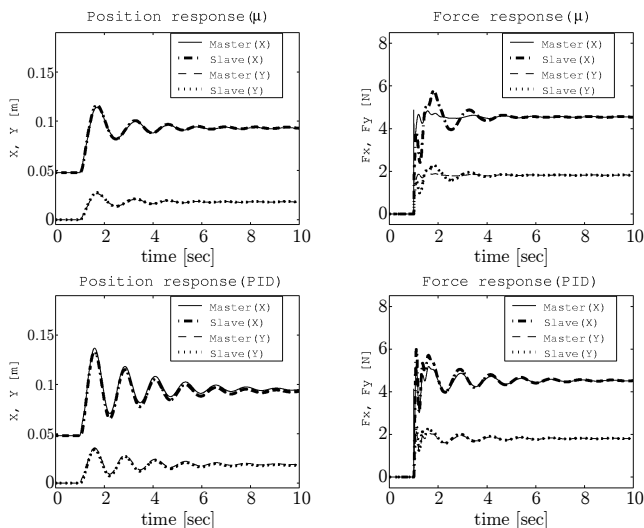


Fig. 8 Nominal operator and envi. without time delay

5. おわりに

本研究では 2 台の 2 自由度マニピュレータを用いたマスタ・スレーブシステムを構築し、それに対して環境、モデルの不確か

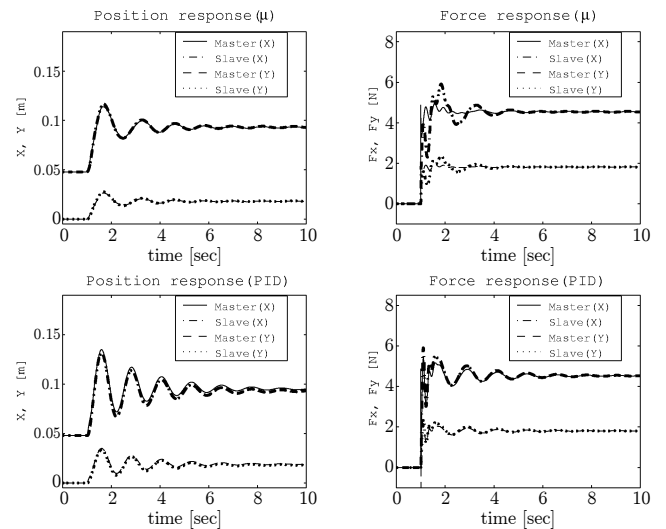


Fig. 9 Nominal operator and envi. with time delay

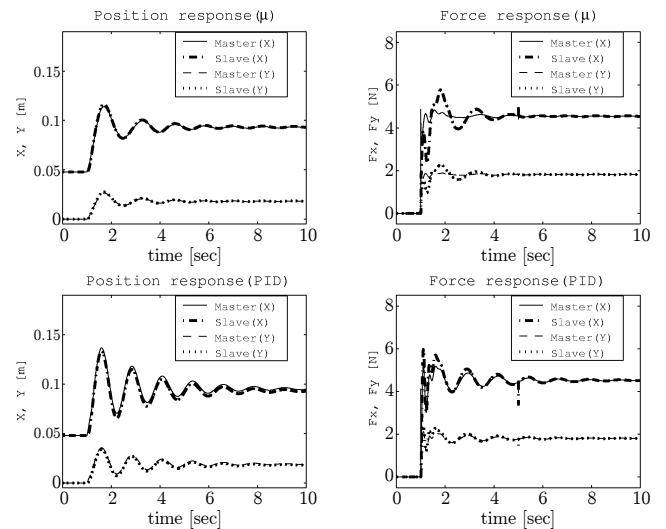


Fig. 10 Changing operator and envi. without time delay

さと通信時間遅れを考慮したロバスト制御系をインピーダンス整形と μ -シンセシスにより構成した。また提案法の有効性を制御シミュレーションで確認した。今後制御実験により、理論と制御性能の検証を行う。

文献

- (1) 滑川徹, 佐竹靖, 藤田政之, 環境の不確かさを考慮したマスタスレーブシステムの H_∞ 制御に対する一考察, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 94, 神戸.
- (2) 吉川恒夫, 横小路泰義, 細谷徳男, 井村順一, 環境とオペレータ特性の不確かさを考慮したマスタ・スレーブシステムのロバスト制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.836-845, (1996)
- (3) 計測自動制御学会編, ロボット制御の実際, コロナ社, (2003)
- (4) 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男, 仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 60(572), pp.1337-1343, (1994)
- (5) 汐月哲夫, インターネットを介した双方向遠隔制御における伝達遅延問題, 計測と制御, 41(7), (2000)