

Robust Control of Master - Slave Robotic System
Considering Environmental Uncertainty and Communication Delay

○伊藤 智 (長岡技術科学大学) 林 鋭渠 (長岡技術科学大学) 正 滑川 徹 (長岡技術科学大学)

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

This 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; e.g., 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. Experimental results show the effectiveness of our proposed approach for various environmental uncertainties.

Key Words: Master-Slave System, Robot Manipulator, Impedance Shaping, Robust Control, μ -Synthesis, Environmental Uncertainty, Communication Delay

1 はじめに

宇宙環境での基地建設, 深海での保全作業, 原子炉での点検作業, および災害現場での救出活動など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。

これまで, 環境やオペレータの特性の不確かさを考慮した研究^{(1) (2)}や, 通信による伝達遅延を考慮した研究^{(3) (4)}が行われている。しかし, これらの不確かさや伝達遅れに対して統合的な補償が行われておらず, また多自由度ロボットに対する適用例も少ない。したがって, 環境やオペレータ特性の不確かさ, および通信による伝達遅延に対して統合的にロバスト性能を保証する制御系設計を行う必要がある。

本研究では, 2 自由度 SICE-DD ロボットマニピュレータ⁽⁵⁾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一般化プラントを構成する。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, 制御実験により提案法の有効性を検証する。

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・スレーブシステムを 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 4 つの要素から構成する。

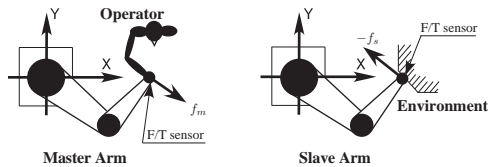


Fig. 1 Master-Slave System with 2 DOF Manipulators

2.1 マスタおよびスレーブのダイナミクス

マスタおよびスレーブの数学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 はそれぞれマスタと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。ここで, 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 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ との関係が順運動学 $P(\theta)$ により次式で与えられるとする。

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

(3) 式の両辺を時間微分することにより, エンドエフェクタの速度と関節角速度との関係は, ヤコビアン $J(\theta)$ を用いて次式で与えられる。

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

さらに, (4) 式の両辺を時間微分することにより, 加速度の関係式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が, 次式の機械インピーダンスモデルを持つように設定する⁽⁶⁾。ここでは, そのためのインピーダンス制御則を導出する。

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

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

ここで, 両アームのインピーダンス Z_m, Z_s を

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

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

のように与えることにより (6),(7) 式を次式のように表現する.

$$Z_m(s)\dot{X}_m = f_{km} + f_m \quad (10)$$

$$Z_s(s)\dot{X}_s = f_{ks} - f_s \quad (11)$$

$M_m, M_s, D_m, D_s, K_m, K_s$ はそれぞれ 2×2 行列で, マスタとスレーブのインピーダンスモデルにおける質量行列, 粘性係数行列, バネ定数行列である. 本稿では, マスタとスレーブのインピーダンスにおいてバネ定数 $K_m = K_s = 0$ とした. f_{km}, f_{ks} は, マスタとスレーブのアクチュエータによる力であり, X, Y 軸に対応して, それぞれ $f_{km} = [f_{kxm}, f_{kym}]^T$, $f_{ks} = [f_{kxs}, f_{kys}]^T$ とする. (6) 式を (5) 式に代入したものを, さらにマスタの運動方程式 (1) 式に代入することにより, マスタのインピーダンス制御則は次式のように導かれる.

$$\begin{aligned} \tau_m = & M(\theta)\{M_m J(\theta)\}^{-1}\{-M_m \dot{J}(\theta)\dot{\theta} - D_m J(\theta)\dot{\theta} \\ & + f_m + f_{km}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) - J^T(\theta)f_m \end{aligned} \quad (12)$$

同様に, スレーブの制御則は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \tau_s = & M(\theta)\{M_s J(\theta)\}^{-1}\{-M_s \dot{J}(\theta)\dot{\theta} - D_s J(\theta)\dot{\theta} \\ & - f_s + f_{ks}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J^T(\theta)f_s \end{aligned} \quad (13)$$

これらの制御則により, ロボットに (6), (7) 式のような見かけ上のインピーダンス特性を持たせることができる. また, (8), (9) 式のインピーダンスを適当に設定することで機械系の操作性を任意に指定できる.

2.3 オペレータおよび環境のダイナミクス

オペレータと環境の特性をそれぞれ以下の機械インピーダンスモデルを用いて表現する.

$$M_{op}\ddot{X}_m + D_{op}\dot{X}_m + K_{op}X_m = f_{op} - f_m \quad (14)$$

$$M_{env}\ddot{X}_s + D_{env}\dot{X}_s + K_{env}X_s = f_s \quad (15)$$

f_{op} はオペレータの筋力による外力である. ここで, オペレータおよび環境のインピーダンス $Z_{op}(s), Z_{env}(s)$ を

$$Z_{op}(s) = M_{op}s + D_{op} + \frac{K_{op}}{s}, \quad (16)$$

$$Z_{env}(s) = M_{env}s + D_{env} + \frac{K_{env}}{s} \quad (17)$$

として, (14), (15) 式を次式のように表現する.

$$Z_{op}(s)\dot{X}_m = f_{op} - f_m \quad (18)$$

$$Z_{env}(s)\dot{X}_s = f_s \quad (19)$$

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

3 制御系設計

3.1 フィードバック制御系の構成

線形化されたマスタおよびスレーブの各軸アームに対して, 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 Fig.2 のように構成する. X, Y 軸のコントローラ K_x, K_y を各軸独立に設計を行い, 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.

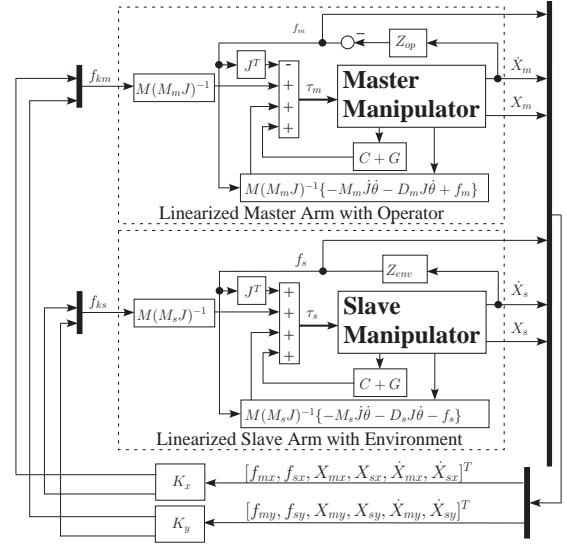


Fig. 2 Feedback Control System

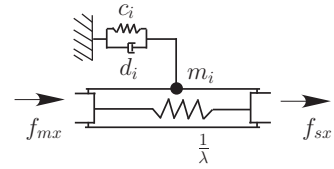


Fig. 3 Intervening Impedance Model

3.2 制御目的の設定

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性能指標を設定する⁽²⁾. マスタ・スレーブシステム自体を Fig.3 に示すようなある種の仮想インピーダンスで表す⁽²⁾.

$$e = x_m - x_s, \quad e_d = \lambda \frac{f_{mx} + f_{sx}}{2} \quad (20)$$

$$f_{mx} - f_{sx} = Z_i(s)v_{ms} \quad (21)$$

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

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. (20) 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. (21) 式は外力に対する平均速度の挙動を示している. これにより, マスタ・スレーブシステムは仮想的なインピーダンス $Z_i(s)$ を持つように動作する. 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, ばね定数を表している. また, このとき外力に対する目標速度 v_{msd} を

$$v_{msd} = \frac{1}{Z_i} (f_{mx} - f_{sx}) \quad (22)$$

として, 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する. 以上より, 制御性能の指標として e_{rel}, e_{abs} を次式のように定義し, これを小さくすることを制御目的とする.

$$e_{rel} = e_d - e, \quad e_{abs} = v_{msd} - v_{ms} \quad (23)$$

3.3 マスタとスレーブの変動を考慮したインピーダンスモデル

マスタとスレーブの変動を考慮した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による変動を考慮したインピーダンスモデルを次式で表現する。

$$Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx}(s) + \delta Z_{mx}(s) \quad (24)$$

$$Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx}(s) + \delta Z_{sx}(s) \quad (25)$$

$\hat{Z}_{mx}(s), \hat{Z}_{sx}(s)$ は、マスタとスレーブのノミナルインピーダンスモデルである。

$$\hat{Z}_{mx}(s) = m_m s + d_m \quad (26)$$

$$\hat{Z}_{sx}(s) = m_s s + d_s \quad (27)$$

また、 $\delta Z_{mx}(s), \delta Z_{sx}(s)$ は、それぞれのインピーダンスの変動であり、次式で与えられる。

$$\delta Z_{mx}(s) = \delta m_m s + \delta d_m \quad (28)$$

$$\delta Z_{sx}(s) = \delta m_s s + \delta d_s \quad (29)$$

ただし、 $\delta m_m, \delta d_m, \delta m_s, \delta d_s$ は、それぞれマスタとスレーブのインピーダンスモデルの質量、粘性係数の変動を表している。これらの変動範囲を次のように定義する。

$$|\delta m_m| \leq \Delta m_m, |\delta d_m| \leq \Delta d_m \quad (30)$$

$$|\delta m_s| \leq \Delta m_s, |\delta d_s| \leq \Delta d_s \quad (31)$$

ここで、変動の最大値 $\Delta m_m, \Delta d_m, \Delta m_s, \Delta d_s$ を用いて重み関数 $W_m(s), W_s(s)$ を次式のように定める。

$$W_m(s) = \Delta m_m s + \Delta d_m \quad (32)$$

$$W_s(s) = \Delta m_s s + \Delta d_s \quad (33)$$

したがって、次式のように書くことができる。

$$|\delta Z_{mx}(j\omega)| = \sqrt{\delta m_m^2 \omega^2 + \delta d_m^2} \leq \sqrt{\Delta m_m^2 \omega^2 + \Delta d_m^2} \quad (34)$$

$$= |W_m(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R$$

$$|\delta Z_{sx}(j\omega)| = \sqrt{\delta m_s^2 \omega^2 + \delta d_s^2} \leq \sqrt{\Delta m_s^2 \omega^2 + \Delta d_s^2} \quad (35)$$

$$= |W_s(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R$$

ここで、 $\|\Delta_m(s)\|_\infty \leq 1, \|\Delta_s(s)\|_\infty \leq 1$ となる伝達関数 $\Delta_m(s), \Delta_s(s)$ を用いることにより、(24), (25) 式は以下の関係式で表現される。

$$Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx}(s) + \delta Z_{mx}(s) \\ = \hat{Z}_{mx} + W_m \Delta_m \quad (36)$$

$$Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx}(s) + \delta Z_{sx}(s) \\ = \hat{Z}_{sx} + W_s \Delta_s \quad (37)$$

3.4 オペレータと環境のモデル化誤差を考慮したインピーダンスモデル

インピーダンスモデルで表現されるオペレータと環境のモデル化誤差の取り扱いについて述べる。モデル化誤差を含むオペレータと環境のインピーダンスを次式で表現する。

$$Z_{op}(s) = \hat{Z}_{op}(s) + \delta Z_{op}(s) \quad (38)$$

$$Z_{env}(s) = \hat{Z}_{env}(s) + \delta Z_{env}(s) \quad (39)$$

$\hat{Z}_{op}(s), \hat{Z}_{env}(s)$ はオペレータと環境のノミナルインピーダンスモデルであり次式で与えられる。

$$\hat{Z}_{op}(s) = m_{op} s + d_{op} + \frac{k_{op}}{s} \quad (40)$$

$$\hat{Z}_{env}(s) = m_{env} s + d_{env} + \frac{k_{env}}{s} \quad (41)$$

また、 $\delta Z_{op}(s), \delta Z_{env}(s)$ はインピーダンスのモデル化誤差であり次式で与えられる。

$$\delta Z_{op}(s) = \delta m_{op} s + \delta d_{op} + \frac{\delta k_{op}}{s} \quad (42)$$

$$\delta Z_{env}(s) = \delta m_{env} s + \delta d_{env} + \frac{\delta k_{env}}{s} \quad (43)$$

ここで、 $\delta m_{op}, \delta d_{op}, \delta k_{op}, \delta m_{env}, \delta d_{env}, \delta k_{env}$ はそれぞれ、オペレータと環境のインピーダンスモデルの質量、粘性係数、バネ定数の変動を表している。これらの変動範囲を次のように定義する。

$$|\delta m_{op}| \leq \Delta m_{op}, |\delta d_{op}| \leq \Delta d_{op}, |\delta k_{op}| \leq \Delta k_{op} \quad (44)$$

$$|\delta m_{env}| \leq \Delta m_{env}, |\delta d_{env}| \leq \Delta d_{env}, |\delta k_{env}| \leq \Delta k_{env} \quad (45)$$

変動の最大値 $\Delta m_{op}, \Delta d_{op}, \Delta k_{op}, \Delta m_{env}, \Delta d_{env}, \Delta k_{env}$ を用いて重み関数 $W_{op}(s), W_{env}(s)$ を次式のように定める。

$$W_{op}(s) = \Delta m_{op} s + \Delta d_{op} - \frac{\Delta k_{op}}{s} \quad (46)$$

$$W_{env}(s) = \Delta m_{env} s + \Delta d_{env} - \frac{\Delta k_{env}}{s} \quad (47)$$

したがって、 $\delta Z_{op}(s), \delta Z_{env}(s)$ の大きさは次式のように表現できる。

$$|\delta Z_{op}(j\omega)| = \sqrt{\delta d_{op}^2 + (\delta m_{op} \omega - \frac{\delta k_{op}}{\omega})^2} \\ \leq \sqrt{\Delta d_{op}^2 + (\Delta m_{op} \omega + \frac{\Delta k_{op}}{\omega})^2} \quad (48)$$

$$= |W_{op}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R$$

$$|\delta Z_{env}(j\omega)| = \sqrt{\delta d_{env}^2 + (\delta m_{env} \omega - \frac{\delta k_{env}}{\omega})^2} \\ \leq \sqrt{\Delta d_{env}^2 + (\Delta m_{env} \omega + \frac{\Delta k_{env}}{\omega})^2} \quad (49)$$

$$= |W_{env}(j\omega)|, \quad \forall \omega \in R$$

ここで、 $\|\Delta_{op}(s)\|_\infty \leq 1, \|\Delta_{env}(s)\|_\infty \leq 1$ となる伝達関数 $\Delta_{op}(s), \Delta_{env}(s)$ を用いることにより、変動を含んだオペレータと環境のインピーダンスモデルは以下の関係式で表現される。

$$Z_{op}(s) = \hat{Z}_{op}(s) + \delta Z_{op}(s) \\ = \hat{Z}_{op} + W_{op} \Delta_{op} \quad (50)$$

$$Z_{env}(s) = \hat{Z}_{env}(s) + \delta Z_{env}(s) \\ = \hat{Z}_{env} + W_{env} \Delta_{env} \quad (51)$$

3.5 むだ時間の取り扱い

むだ時間による安定性の問題を扱う場合に、Fig.4 に示すようなむだ時間 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 $0 < L < L_{max}$ に対して次の不等式が成り立つ⁽⁴⁾。

$$|e^{-j\omega L} - 1| \leq \left| \frac{2.1j\omega}{j\omega + \frac{1}{L_{max}}} \right| \quad (52)$$

これより、次式の重み関数 W_t と不確かさ Δ_t ($\|\Delta_t\|_\infty \leq 1$) を用いて、むだ時間 e^{-Ls} ($0 < L < L_{max}$) を乗法的な摂動として取扱う。

$$W_t(s) = \frac{2.1s}{s + \frac{1}{L_{max}}} \quad (53)$$

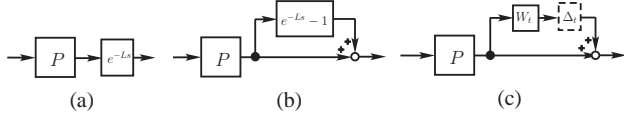


Fig. 4 Time Delay Uncertainty

3.6 一般化プラントの構成

マスタとスレーブの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性を保証し、かつ設定した制御性能を実現させるために Fig.5 の一般化プラントを構成する。 d_m, d_s はマスタおよびスレーブに加わる力外乱である。重み関数 W_d は d_m がマスタ・スレーブシステムの共振周波数付近で小さくなるように選択する。 W_{rel}, W_{abs} は制御性能に対する重みであり、 W_{um}, W_{us} は過大な制御入力を抑えるための重みである。

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、仮想変動 Δ_{perf} ($\|\Delta_{perf}\|_\infty \leq 1$) を導入し、 Fig.6 に示した 6 ブロックの対角ブロック行列の不確かさ Δ_{mss} をもつシステムのロバスト安定化問題に帰着させる。

$$\Delta_{mss} = \text{diag}[\Delta_{op}, \Delta_{env}, \Delta_m, \Delta_s, \Delta_t, \Delta_{perf}] \quad (54)$$

このとき、ロバスト制御性能条件は次式で与えられる。

$$\sup_{\omega \in R} \mu_{\Delta_{mss}} [F_l(P(j\omega), K(j\omega))] < 1 \quad (55)$$

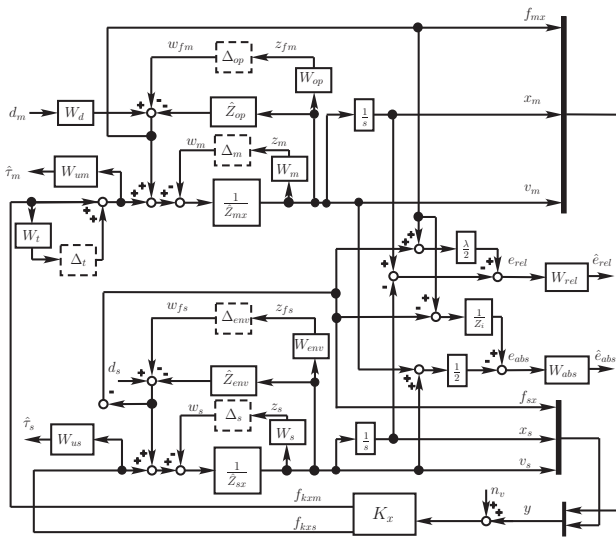


Fig. 5 Generalized Plant with Uncertainties

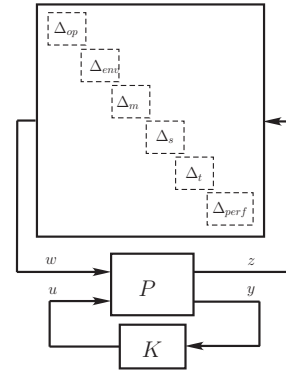


Fig. 6 Robust Performance Problem

3.7 コントローラの計算

以下の設定で、MATLAB を用いて 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。重み関数 $W_{rel}, W_{abs}, W_{um}, W_{us}, W_d$ 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、マスタとスレーブのモデル変動、オペレータおよび環境のモデル化誤差が 10% 以内と設定した。

以上の設定により、1 回のイタレーションで構造化特異値が 1 以下となった。 Fig.7 に μ の値を示す。

4 制御実験による検証

4.1 実験環境

Fig.8 に示すように、バネを用いて実験環境を構成した。なお、2 軸先端部分には、マスタアーム、スレーブアームともに力センサが取り付けられている。

遅れ時間は 10[msec] とし、環境のパラメータ変動としてバネ定数の変動を考え以下に示す 3 種類のケースで実験を行った。

- [1] スレーブがバネに拘束されない場合。
- [2] スレーブがバネ ($k_1 = 30.0[\text{N/m}]$) に拘束される場合。
- [3] スレーブがバネ ($k_2 = 110.0[\text{N/m}]$) に拘束される場合。

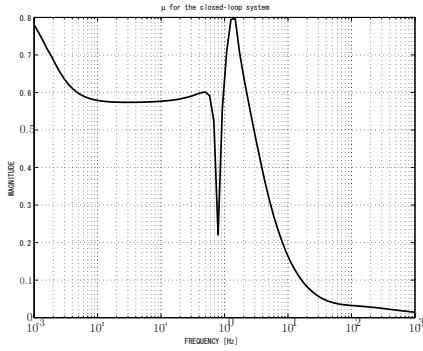


Fig. 7 μ plot of the closed-loop system

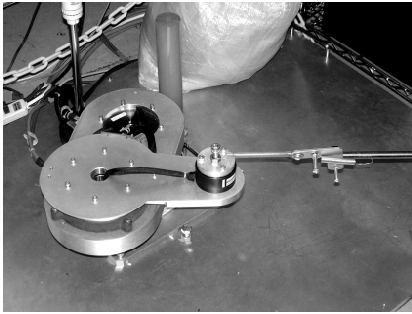


Fig. 8 Slave Manipulator and Spring Environment

4.2 実験結果と考察

提案した μ -シンセシスによる方法と性能比較を行うために Fig.9 に示すような PD 制御を用いた力帰還型マスタ・スレーブシステムを構成した. スレーブ側に対して位置フィードバックを行っているが, ノイズの増幅によるアームの振動を抑えるために次式のような極を一つ付加した PD コントローラ $K_{PD}(s)$ を用いて, 微分動作の影響による高周波領域でのゲイン上昇を抑えるようにした.

$$K_{PD}(s) = \frac{K_D s + K_P}{as + 1} \quad (56)$$

ここで, $a = 7 \times 10^{-3}$ とし, 比例ゲイン K_P と微分ゲイン K_D は, 各実験環境において Table1 のように調整した.

μ -シンセシスによるコントローラについては, ケース 1, ケース 2, ケース 3 のそれぞれの環境において, 同一のものを使用した. また, 設計された X, Y 軸のコントローラ K_x, K_y は同一のものを用いているため, Y 軸方向の結果のみを示した.

Fig.10 はケース 1 において μ -コントローラと力帰還型コントローラを用いたときのマスタとスレーブの Y 軸方向位置応答と力応答を示している. ケース 1 においてどちらのコントローラも位置応答, 力応答ともに安定している. ここで, 力応答がマスタ側とスレーブ側で一致せずスレーブ側が常に 0 となっているのは, スレーブが拘束されていないためである.

Fig.11 は, 同様にケース 2 における結果を示している. μ -コントローラはバネによる環境の変化に対して位置応答, 力応答ともに安定している.

Fig.11 は, 同様にケース 3 における結果を示している. μ -コントローラは, ケース 2 からケース 3 へとバネ定数の増加による環境の変化に対しても位置応答, 力応答ともに安定している.

Table 1 Parameters of the controller $K_{PD}(s)$

	Case1	Case2	Case3
K_P	550	450	350
K_D	100	80	50

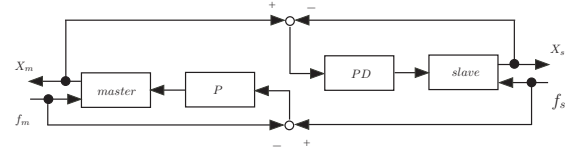


Fig. 9 Force Reflecting Servo Type (FRST)

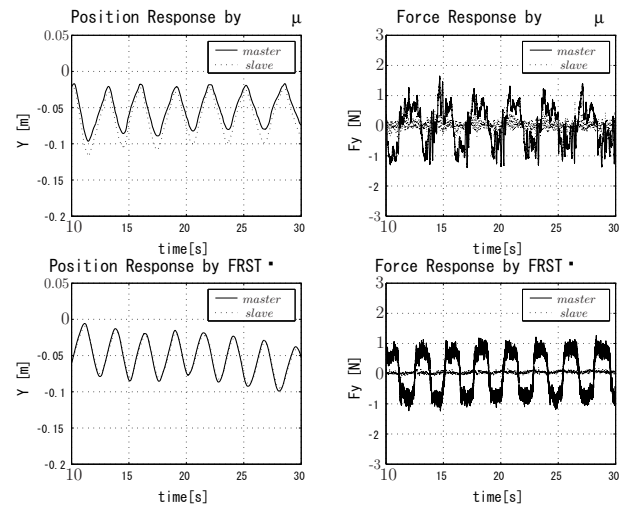


Fig. 10 Case1: Slave Free

Fig.13 は, ケース 1, ケース 2, ケース 3 のそれぞれの環境において μ -コントローラと力帰還型コントローラを用いたときの Y 軸方向位置応答について, それぞれマスタとスレーブの誤差の絶対値を取ったものを示している. μ -コントローラ的位置応答誤差についてケース 1 で若干大きくなっているが, 環境の変化に対して位置誤差が小さく抑えられている.

Fig.14 は, 同様に Y 軸方向力応答についてそれぞれマスタとスレーブの誤差の絶対値を取ったものを示している. μ -コントローラは, 環境の変化に対して力応答誤差が小さく抑えられている.

したがって, 設計した μ -コントローラは, むだ時間および環境の変化に対して良好なロバスト性能を有しているといえる.

5 おわりに

本研究では, 2 自由度マスタ・スレーブシステムのダイナミクスをインピーダンス整形を用いて見かけ上非干渉・線形化した. 見かけ上線形化された 2 台のロボットアームによるマスタ・スレーブシステムと環境およびオペレータをまとめて一般化プラントを構成した. 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特性と環境の不確かさおよび遅れ時間を考慮したロバスト制御系を構成した. 2 台の 2 自由度 DD ロボットマニピュレータにより構成したマスタ・スレーブシステム

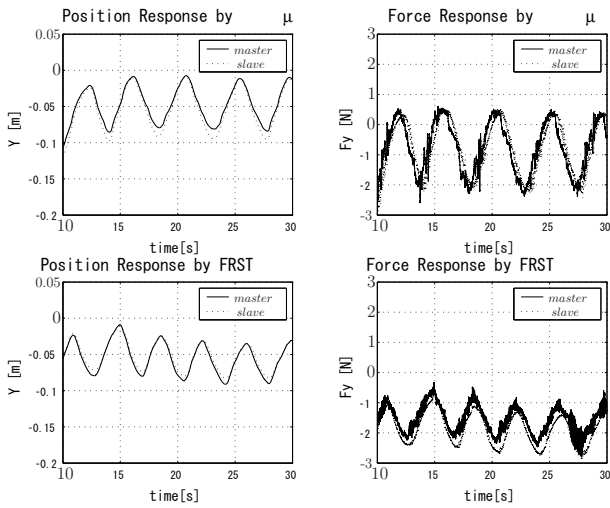


Fig. 11 Case2: Slave Restricted by k_1

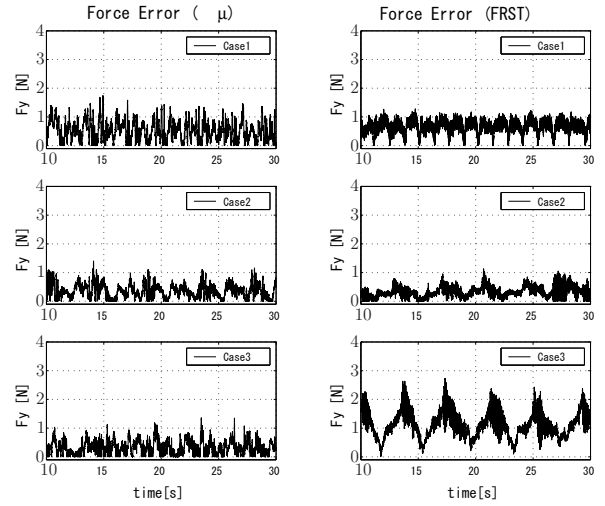


Fig. 14 Force Error between Master and Slave

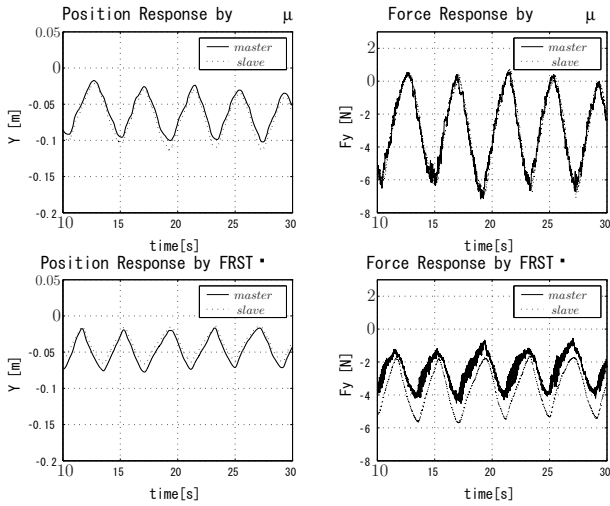


Fig. 12 Case3: Slave Restricted by k_2

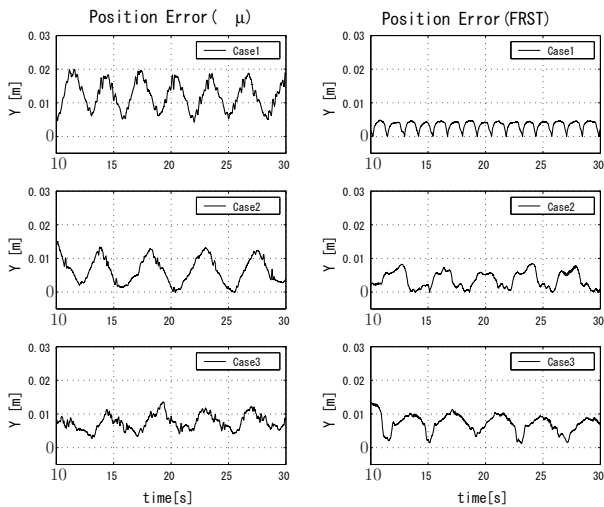


Fig. 13 Position Error between Master and Slave

ムに対して、求めた μ -シンセシスによるコントローラを用いて制御実験を行い、提案法の有効性を確認した。

今後の課題として、フィードフォワード制御器を追加して 2 自由度制御系を構成することが考えられる。これにより、閉ループ系特性とは独立して目標値応答特性を指定することができ、目標値追従特性が改善されることが期待できる⁽⁷⁾。また、本稿ではむだ時間を乗法的な摂動として取り扱うことにより、むだ時間による安定性の問題を \mathcal{H}_∞ 制御理論の枠組みで議論した。今後、むだ時間系の代表的な制御方法として知られるスミス補償器による方法⁽⁸⁾が考えられる。

参考文献

- (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 (1994)
- (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ボスト制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.836-845(1996)
- (3) G.M.H. Leung and B. A. Francis, Bilateral Controller for Teleoperators with time Delay via μ -Synthesis, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, 1995, pp 105-116.
- (4) 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)
- (5) 計測自動制御学会編, ロボット制御の実際, コロナ社,(2003)
- (6) 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)
- (7) 野波健蔵 編著, 西村秀和・平田光男 共著, MATLAB による制御系設計, 東京電機大学出版局,(1998)
- (8) Z.J.Palmer, *Time-Delay Compensation-Smith Predictor and its Modifications*, The Control Handbook (ed. William S. Levine), CRC Press, Section 10.8 (1995)