

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に関する実験的検証

Experimental Verification of the 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)

○伊藤智 (長岡技術科学大学)

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

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において有効な手法とされるマスタスレーブ型の遠隔操縦システムに関する研究が、近年盛んに行われている^{(1) (2)}。

本研究では、2台の2自由度 SICE-DD ロボットマニピュレータを用いてマスタ・スレーブシステムを構築し、インピーダンス整形と μ -シンセシスを用いて環境とオペレータ特性の不確かさ、および遅れ時間に対してロバスト性能を有する制御系の設計を行う。また、提案法の有効性を制御実験により検証する。

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、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つの要素で構成される。

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。また、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 $X = [x, y]^T$ とすると、加速度の関係式は次式で与えられる。

$$\ddot{\theta} = J^{-1}(\theta)(\ddot{X} - \dot{J}(\theta)\dot{\theta}) \quad (3)$$

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⁽³⁾。

$$M_m\ddot{X}_m + D_m\dot{X}_m + K_mX_m = Z_m\dot{X}_m = f_{km} + f_m \quad (4)$$

$$M_s\ddot{X}_s + D_s\dot{X}_s + K_sX_s = Z_s\dot{X}_s = f_{ks} - f_s \quad (5)$$

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、バネ定数は $K_m = K_s = 0$ として取り扱う。 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。(1)、(3)、(4) 式より、マスタのインピーダンス制御則は次式となる。

$$\tau_m = M(\theta)\{M_mJ(\theta)\}^{-1}\{-M_m\dot{J}(\theta)\dot{\theta} - D_mJ(\theta)\dot{\theta} + f_m + f_{km}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) - J^T(\theta)f_m \quad (6)$$

同様に、スレーブの制御則は次式のように導かれる。

$$\tau_s = M(\theta)\{M_sJ(\theta)\}^{-1}\{-M_s\dot{J}(\theta)\dot{\theta} - D_sJ(\theta)\dot{\theta} - f_s + f_{ks}\} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J^T(\theta)f_s \quad (7)$$

2.3 オペレータおよび環境のダイナミクス

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、その入出力関係は次式で表される。

$$Z_{op}(s)\dot{X}_m = f_{op} - f_m, \quad Z_{env}(s)\dot{X}_s = f_s \quad (8)$$

ここで、 f_{op} はオペレータの筋力による外力である。

3. 制御系設計

3.1 フィードバック制御系の構成

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、これらを同一のものとする。以下、 K_x の設計について述べる。

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ある種のインピーダンスの形で表すことを考える⁽²⁾。

$$e = x_m - x_s, \quad e_d = \lambda \frac{f_{mx} + f_{sx}}{2} \quad (9)$$

$$f_{mx} - f_{sx} = Z_i(s)v_{ms}, \quad v_{ms} = \frac{v_m + v_s}{2} \quad (10)$$

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。また、このとき外力に対する目標速度 v_{msd} を

$$v_{msd} = \frac{1}{Z_i}(f_{mx} - f_{sx}) \quad (11)$$

とする。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。

$$e_{rel} = e_d - e, \quad e_{abs} = v_{msd} - v_{ms} \quad (12)$$

3.3 むだ時間の取扱い

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。

$$W_t(s) = \frac{2.1s}{s + \frac{1}{L_{max}}} \quad (13)$$

3.4 マスタとスレーブのインピーダンスモデルの変動

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 $Z_{mx}(s), Z_{sx}(s)$ とする。

$$Z_{mx}(s) = \hat{Z}_{mx} + W_m \Delta_m, \quad Z_{sx}(s) = \hat{Z}_{sx} + W_s \Delta_s \quad (14)$$

$\hat{Z}_{mx}, \hat{Z}_{sx}$ は、マスタとスレーブのインピーダンスのノミナル値である。インピーダンスの変動は重み関数 $W_m(s), W_s(s)$ と伝達関数 $\Delta_m, \Delta_s (\|\Delta_m\|_\infty \leq 1, \|\Delta_s\|_\infty \leq 1)$ を用いて表される。

3.5 オペレータと環境のモデル化誤差

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モデルを $Z_{op}(s), Z_{env}(s)$ とする。

$$Z_{op}(s) = \hat{Z}_{op} + W_{op} \Delta_{op}, \quad Z_{env}(s) = \hat{Z}_{env} + W_{env} \Delta_{env} \quad (15)$$

$\hat{Z}_{op}, \hat{Z}_{env}$ は、オペレータと環境のインピーダンスモデルのノミナル値である。モデル化誤差は重み関数 W_{op}, W_{env} と伝達関数 $\Delta_{op}, \Delta_{env} (\|\Delta_{op}\|_\infty \leq 1, \|\Delta_{env}\|_\infty \leq 1)$ を用いて表される。

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.1 の一般化プラントを構成した。 d_m, d_s はマスタおよびスレーブに加わる力外乱であり、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.1 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 $\Delta_{perf} (\|\Delta_{perf}\|_\infty \leq 1)$ を含む 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。

$$\Delta_{mss} = \text{diag}[\Delta_{op}, \Delta_{env}, \Delta_m, \Delta_s, \Delta_t, \Delta_{perf}] \quad (16)$$

したがって、ロバスト制御性能条件は次式で与えられる。

$$\sup_{\omega \in R} \mu_{\Delta_{mss}} [F_l(P(j\omega), K(j\omega))] < 1 \quad (17)$$

4. 実験による検証

4.1 コントローラの計算

D-K イタレーションにより、コントローラを求めた。このとき、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 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。

4.2 実験結果と考察

制御実験は、スレーブアームにバネを伸び縮みさせ、アーム先端に取り付けられた力覚センサに繰り返し力をかける動作を行わせた。このとき、性能比較のため、力帰還型マスタ・スレーブシステムを構成した。Fig.2 はむだ時間を考慮した (8[msec]) 場合における、 μ -シンセシスと力帰還型の位置、力の誤差の応答を示したものである。Fig.2(a), (b) より、位置応答は、 X, Y 軸ともにマスタとスレーブの誤差が、 μ -シンセシスの方が力帰還型よりも若干小さい。Fig.2(c), (d) より、力応答も同様に、 $X,$

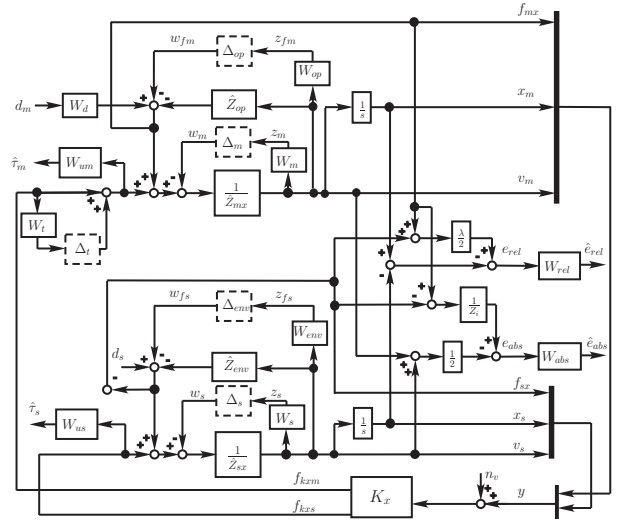


Fig. 1 Generalized Plant with Uncertainties

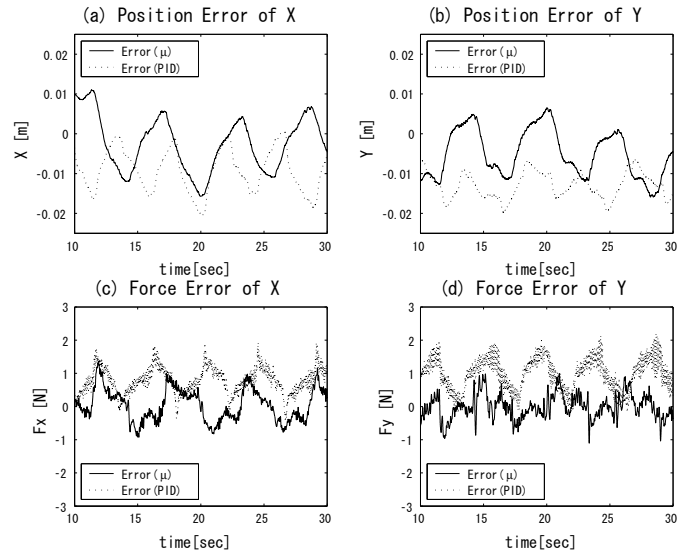


Fig. 2 Experimental results with time delay

Y 軸ともにマスタとスレーブの誤差が、 μ -シンセシスの方が力帰還型よりも小さい。また、力帰還型の力応答は、振動的な応答であった。

5. おわりに

本研究では、2 自由度マスタ・スレーブシステムに対して環境とモデルの不確かさ、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実験を行い確認した。

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バスト制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.836-845(1996)
- (3) 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)