

205 テレイゲジスタンスの研究 第20報
 -インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム(II)-
 (物理的相似変換を応用した操作能力の拡張)
 機械技術研究所 館 嘉 安川電機製作所 ○輔 泰輔

Study on Tele-existence (XX)
 -Extended Impedance Controlled M. S. S.-
 Mechanical Engineering Laboratory Susumu Tachi Yaskawa Electric Mfg. Co. Ltd. Taisuke Sakaki

1 はじめに 操作感のテレイゲジスタンス技術としてインピーダンス制御型マスタ・スレーブを提案している^{1,2,3)}。従来のバイラテラル系では、①マスタとスレーブに介在するインピーダンス⁵⁾の物理的意味、②伝送遅れ、③操作の補助、④物理条件の異なる環境での操作感が課題となるが³⁾、提案している基本システムでは①②③を解決する手法を提案した^{2,3)}。本報告では、基本システムを拡張することで④を解決する。即ち、物理的相似変換によって、異形状・異入出力条件・異動作速度下で動作するマスタ・スレーブの制御法を提案する。

2 操作能力の拡張 スレーブは、一般に作業環境によって人間の腕とは形状・動作速度・入出力条件が異なり、マイクロマニピュレータから宇宙用アームまで様々である。従来は幾何学的関係による力や運動の情報をもとに操作しているが、環境をリアルに把握しながら作業するには、マスタ・スレーブの動作と環境を物理現象の観点から考えた物理的相似関係として捉えるべきである。

第1に、アームを人間の能力を超えて高速あるいは低速に動作させる場合、普通と感じる程度の速度で操作者は作業を行うが、スレーブ側ではこの動作に適当な変換を施し目的の速度で動作させる。第2に、入出力条件の変換を行えば、例えばマイクロマニピュレータが握んだ血管をゴムホースのように感じながら手術を容易に行うことも可能となる。

マスタ・スレーブの動作を物理的相似関係で捉え、マスタとスレーブが異形状・異動作速度・異入出力条件の場合でも相似則⁴⁾を満たすようにインピーダンスを調整すれば、物理的な一般性を失うことなく臨場感を供与できる。

3 操作能力の拡張方法

①第17報で提案した基本システムにおいては、マスタとスレーブのインピーダンス整合を行うが、このとき操作環境と作業環境で同じ物理現象が生じ、相似則が成立する。

【定理1】操作環境と作業環境の両者とも等しい目標インピーダンスを設定すれば、両者の間で相似則は自然に満たされる。

具体的には支配的な物理法則を次の3つと仮定し、各式を代表値⁴⁾の関係式で表す。

$$\text{慣性の法則: } F_i = M a = \rho \ell^4 / t^2$$

$$\text{粘性力: } F_v = D V = \mu \ell \cdot t^2 / t$$

$$\text{バネ力: } F_e = K \ell$$

但し ρ は密度、 ℓ は長さ、 μ は粘性係数、 t は時間の代表値を表す。

バイナンバー⁴⁾により無次元化すると、

$$\pi_1 = F_i / F_v = \rho \ell^2 / (\mu t)$$

$$\pi_2 = F_e / F_v = K t / (\mu \ell)$$

ここでスレーブの各パラメータは対応するマスタの各パラメータに'をつけて表す。

マスタ・スレーブのインピーダンスが等しい、即ち、 $M = M'$, $D = D'$, $K = K'$ であるとき、次が成立する。

$$\pi_1 = \pi_1', \quad \pi_2 = \pi_2' \quad (\text{証明略})$$

②作業を行う速度を変換し操作者の能力を拡張する。あらかじめ目標とする作業をマスタシステムのみでシミュレートして動作内容を記憶し、相似則に従って作業速度を変換した後、作業内容をスレーブシステムに送信して目標速度で作業を遂行する。

【定理2】操作環境と作業環境での幾何学的相似比 ℓ^* が決まっているとき、動作速度の比 V^* を指定して各環境におけるインピーダンスの比を適当に決めれば相似則は満足される。

即ち支配的な物理法則を定理1と同じとし、幾何学的相似比 ℓ^* と密度の比 ρ^* を定め、動作速度の比 V^* を指定したとき各環境に於けるインピーダンスの比を、

$$M / M' = \rho^* \ell^{*3}$$

$$D / D' = \rho^* \ell^{*2} V^*$$

$$K / K' = \rho^* \ell^* V^{*2}$$

と決めれば相似則は満足される。但し、

$$\ell^* = \ell / \ell', \quad \rho^* = \rho / \rho', \quad V^* = V / V'$$

とする。(証明略)

また、作業速度の変換は、具体的にはマスタの操作力からスレーブの内部トルクへの変換と考えられる。これについての原理を次に示す。

【系2-1】定理2を満たすマスタとスレーブにおいて $\rho^* = 1$, $\ell^* = 1$ とし、作業速度の比を V^* とすると、マスタへの操作力の時間履歴 $F_m(t)$ とスレーブの内部トルクの時間履歴 $F_s(t)$ は次の関係を持つ。

$$F_s(t) = (1/V^*) F_m(t/V^*) \quad (\text{証明略})$$

③幾何学的な比だけではなく、対象物の材質まで含めた物理的相似関係から入出力条件を変換する。

【定理3】操作環境と作業環境の幾何学的相似比 ℓ^* を定めたとき、各環境における対象物の物理的性質（密度・粘性・剛性）の比を適当に決めるようなインピーダンスの比が存在し、かつ、相似則を満足する。このとき幾何学的な比とインピーダンスの比により、マスタ・スレーブの入出力条件の比は決定される。

即ち、支配的な物理法則を定理1と同じとし、幾何学的な相似比 ℓ^* を定め、密度の比 ρ^* 、粘性の比 μ^* 、剛性の比 K^* のいずれかを指定する。このときマスタ・スレーブのインピーダンスの比は、例えば密度の比 ρ^* により、

$$M/M' = D/D' = K/K' = \rho^* \ell^{*3}$$

と定まり、かつ相似則を満足する。このときマスタとスレーブの入出力条件は

$$F/F' = \rho^* \ell^{*4}$$

但し、 $\ell^* = \ell/\ell'$, $\rho^* = \rho/\rho'$, $\mu^* = \mu/\mu'$, $K^* = K/K'$ である。（証明略）

4 制御実験

1) 作業速度の変換実験。定理2と系2-1に示した原理を用いてマスタ・スレーブ間の作業速度の変換実験を行う。 $\rho^* = 1$, $\ell^* = 1$ とし作業速度の比を $V^* = 2/3$ とすると、マスタ

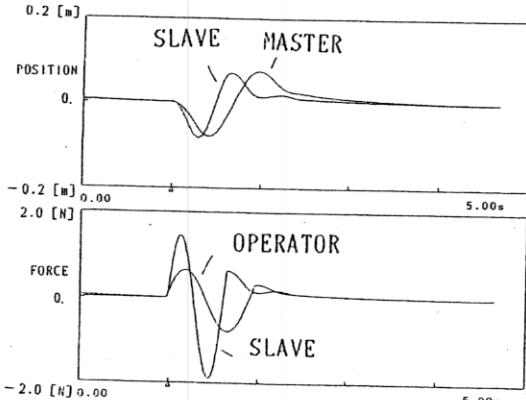


Fig. 1 Experimental Results of velocity Transformation by Physical Similarity

とスレーブの各インピーダンスは次のように設定できる。

$$\begin{aligned} M_0 &= 0.5 [\text{Kg}], B_0 = 20.0 [\text{N}/(\text{m/s})] \\ &\quad , K_0 = 40.0 [\text{N/m}] \\ M_s &= 0.5 [\text{Kg}], B_s = 30.0 [\text{N}/(\text{m/s})] \\ &\quad , K_s = 90.0 [\text{N/m}] \end{aligned}$$

第17報で用いたDDアームをマスタとして操作し、その操作力を変換しスレーブの内部トルクとして、同じアームに加える。Fig. 1にマスタへの操作力とマスタの変位、スレーブへの内部トルクとスレーブの変位の各時間履歴を示す。相似則に沿って変換されたインピーダンスと内部トルクに対し、スレーブは物理的相似関係を保ちながらマスタの動作の $V^* = 2/3$ だけ時間的に圧縮されて動作している。

2) 入出力条件の変換実験。 $\rho^* = 2$, $\ell^* = 10$ とし、マスター・アームと対象物モデルの各インピーダンスを次のように設定する。定理3より、スレーブ側ではこの $1/\rho^* \ell^{*3} = 0.5 \times 10^{-3}$ 倍のインピーダンスを持つ。

$$\begin{aligned} M_0 &= 0.05 [\text{Kg}], B_0 = 1.0 [\text{N}/(\text{m/s})] \\ &\quad , K_0 = 0.1 [\text{N/m}] \\ M_s &= 0.01 [\text{Kg}], B_s = 5.0 [\text{N}/(\text{m/s})] \\ &\quad , K_s = 5.0 [\text{N/m}] \end{aligned}$$

双方向力情報伝送方式³⁾を用いて、マスタではDDアームを操作しスレーブは計算機内でシミュレートする。Fig. 2にマスタとスレーブの位置と力の時間履歴を示す。スレーブはマスタに對し、定理3に示したように $1/\ell^* = 0.1$ 倍の位置で追従し操作者へ $\rho^* \ell^{*4} = 2.0 \times 10^4$ 倍の反力を返している。

5 まとめ テレイギジスタンスの研究の一環として、異なる物理条件で動作するマスタ・スレーブの制御法を提案し、その有効性を実験にて検証した。

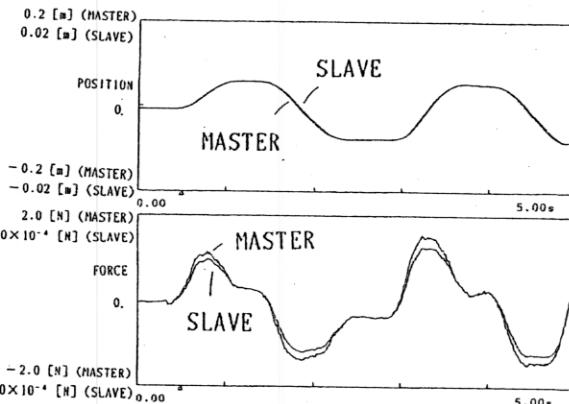


Fig. 2 Experimental Results of Force Transformation by Physical Similarity

《参考文献》 1) 舘・榎ほか；第27回SICE学術講演会(1988) 2) 舘・榎；第6回日本ロボット学会学術講演会(1988) 3) 舘・榎；第28回SICE学術講演会(1989) 4) 江守：模型実験の理論と応用，技報堂出版(1973) 5) H. Hogan : Impedance Control I II III, ASME Trans., March (1985)