

テレイドジスタンスの研究 第21報

- インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (III) -

(物理的相似変換によって拡張したシステムの性質)

機械技術研究所 舘 晴 安川電機製作所 ○ 崎 泰輔

Study on Tele-existence (XXI)

- Some Properties of Extended Impedance Controlled M.S.S. -

Mechanical Engineering Laboratory Susumu Tachi Yaskawa Electric Mfg.Co.Ltd. Taisuke Sakaki

ABSTRACT : We have proposed impedance controlled master slave system and extended the system by physical similarity transformation. In this paper, we show some properties of the extended system about stability, the simultaneous transformation of velocity and force, and the physical relationship between the master and slave environments.

1 はじめに 操作感のテレイド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、また、物理的相似変換を適用して速度と入出力条件について変換可能なようにシステムを拡張した。<sup>2,3,4)</sup> 本報告では、この拡張したシステムのいくつかの性質について述べる。

2 物理的相似変換による拡張 インピーダンス制御型マスタ・スレーブは、各アームの手先の機械的インピーダンス<sup>1)</sup>を直接かつ独立に制御することを特徴としている。Fig.1 にその概念図を示す。このシステムは、①各アームのインピーダンスを等しくする、②等しくしたインピーダンスのパラメータの値の大小をかえる、③各アームで独立にインピーダンスを変更し把持した対象物の動特性を仮想的にかえる、ということが可能で、操作者にいろいろな臨場感を与える自由度を持つ。

さらに、物理的相似変換<sup>5)</sup>を適用して各インピーダンスを調整し、物理的な一般性を保ちながら臨場感を供与するように動作速度・入出力条件を変換することができる。このように拡張したシステムにおけるインピーダンスの調整法を以下に示す。<sup>4)</sup>

【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。

ここで支配的な物理法則をつぎの3つと仮定し、各式を代表値<sup>6)</sup>の関係式で表している。 $\rho$ は密度、 $l$ は長さ、 $\mu$ は粘性係数、 $t$ は時間の代表値をあらわす。

$$\text{慣性;} f_1 = f \alpha = \rho l^4 / t^2 \quad (1)$$

$$\text{粘性;} f_v = b v = \mu l v = \mu l^2 / t \quad (2)$$

$$\text{弾性;} f_k = k l \quad (3)$$

【定理2】 操作環境と作業環境の幾何学的相似比と動作速度の比  $v^*$  を指定し、各環境のインピーダンスを適当に調整すれば相似則は満足される。すなわち、支配的な物理法則が定理1と同じ場合、幾何学的相似比  $l^*$  と密度の比  $\rho^*$  を定め動作速度の比  $v^*$  を指定し

たとき、各環境のインピーダンスパラメータ (慣性・粘性・弾性) の比を、

$$m / m^* = \rho^* l^{*3} \quad (4)$$

$$b / b^* = \rho^* l^{*2} v^* \quad (5)$$

$$k / k^* = \rho^* l^* v^{*2} \quad (6)$$

と設定すれば相似則は満足される。ただし、

$$l^* = l / l', \quad \rho^* = \rho / \rho', \quad v^* = v / v'$$

【定理3】 操作環境と作業環境の幾何学的相似比  $l^*$  を定めたととき、各環境における対象物の物理的性質 (密度・粘性・弾性) の比を適当にきめるようなインピーダンスパラメータの比が存在し、かつ、相似則を満足する。幾何学的な相似比  $l^*$  を定め、密度比  $\rho^*$ 、粘性の比  $\mu^*$ 、弾性の比  $k^*$  のいずれかを指定する。このときインピーダンスパラメータの比は、例えば密度の比  $\rho^*$  により、それぞれ、

$$m / m^* = b / b^* = k / k^* = \rho^* l^{*3} \quad (7)$$

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、

$$f / f^* = \rho^* l^{*4} \quad (8)$$

となる。ただし、

$$\mu^* = \mu / \mu', \quad k^* = k / k'$$

3 安定性の保存 上に述べた物理的相似変換では、マスタ・スレーブの相互の安定性が保存される。

マスタ系の運動方程式を、慣性・粘性・弾性の各行列  $M, B, K$  をもちいて、

$$M \ddot{X}_m + B \dot{X}_m + K X_m = 0 \quad (9)$$

とする。これを演算子  $s_1$  を用いてラプラス変換し、その特性方程式を、

$$s_1^2 I + s_1 M^{-1} B + M^{-1} K = 0 \quad (10)$$

として、その解を  $s_{1i} (i = 1, \dots, 6)$  とすると、安定条件は、解の実部を  $\text{Re}(s_{1i})$  とすると、

$$\text{Re}(s_{1i}) < 0 \quad i = 1, \dots, 6 \quad (11)$$

である。また、スレーブ系の運動方程式を、同様に、

$$M' \ddot{X}_s + B' \dot{X}_s + K' X_s = 0 \quad (12)$$

とする。これを演算子  $s_2$  をもちいてラプラス変換し

て特性方程式を,

$$s^2 I + s_2 M^{-1} B' + M^{-1} K' = 0 \quad (13)$$

とし, その解を  $s_{2j}$  ( $j = 1, \dots, 6$ ) とすると, 安定条件は,

$$\text{Re}(s_{2j}) < 0, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (14)$$

である。ところで速度の相似変換を行ったとき, 各系の時間と動特性の関係は, 式(4)-(6)より時間の比を  $t^* = t'/t'$  ( $t' > 0$ ) とすると,

$$t^* = s_2/s_1 \quad (15)$$

また, 定理2より, 行列  $M, B, K, M', B', K'$  の各々の要素  $m, b, k, m', b', k'$  に対し,

$$k/m = k'/(m't'^2), \quad b/m = b'/(m't') \quad (16)$$

よって, (16) を (10) にほどこすとこの特性方程式は,

$$(t^*s_1)^2 I + (t^*s_1) M'^{-1} B' + M'^{-1} K' = 0 \quad (17)$$

これと (15) よりマスタ系を変換した系はスレーブ系と等価となる。また, 各系の解の関係は, (15) から適当な並べかえによって,

$$s_{2j} = t^* \cdot s_{1j}, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (18)$$

となり安定性は保存される。また, 入出力条件の変換 (定理3) ではマスタ系とスレーブ系は明らかに等価となりこの場合も安定性は保存される。 (証明終)

**4 各環境の物理的關係** 物理的相似変換を施した場合の各環境の物理的關係を, 各アームの動作で生じる力積を比較することで示す。

力積  $I_f$  は, 時間  $t_s$  から  $t_e$  において加えられた力  $f(t)$  に対し次のように定義される。

$$I_f = \int_{t_s}^{t_e} f(t) dt \quad (19)$$

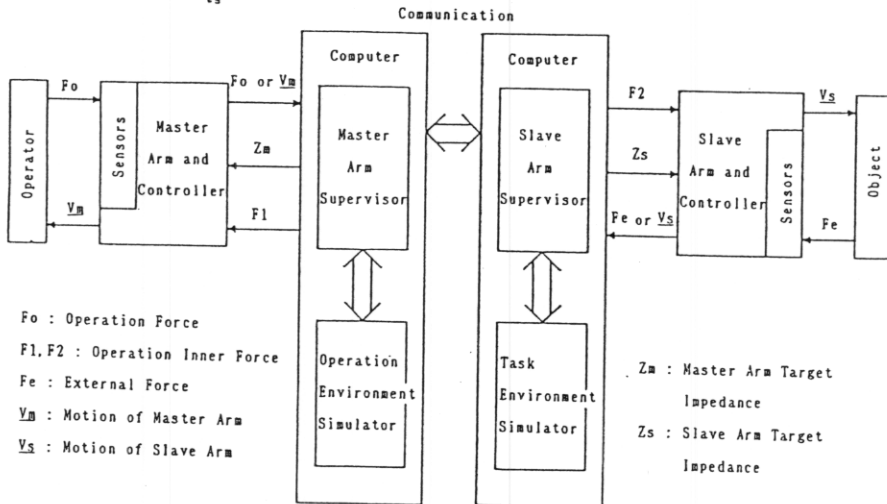


Fig.1 Basic Concept of Impedance Controlled Master Slave System

《参考文献》 1) 館・榊ほか; 第27回SICE学術講演会(1988) 2) 館・榊; 第6回日本ロボット学会学術講演会(1988) 3) 館・榊; 第28回SICE学術講演会(1989) 4) 館・榊; 第7回日本ロボット学会学術講演会(1989) 5) 江守; 模型実験の理論と応用, 技報堂出版(1973)

まず, 速度変換の場合を考える。定理2で, 簡単のため  $\rho^* = \rho^* = 1$  とすると, マスタへの操作力の時間履歴  $f_m(t)$  とスレーブの出力の時間履歴  $f_s(t)$  は次の関係を持つ。

$$f_s(t) = (1 / v^*) \cdot f_m(t / v^*) \quad (20)$$

これより, マスタとスレーブの力積をそれぞれ  $I_m, I_s$  とすると,  $\rho^* = \rho^* = 1$  の場合の速度変換における各力積の関係は, 次で与えられる。

$$I_m / I_s = v^* \quad (21)$$

力積は運動量の変化をあらわす。したがって, 速度変換の場合, アームが接触する対象物に与える運動量は  $1 / v^*$  となる。

また, 入出力条件の変換の場合は, 定理3より, 同様にして, 各力積の関係は次で与えられる。

$$I_m / I_s = \rho^* \cdot \rho^{*4} \quad (22)$$

**5 二つの変換を同時に実行できるか?** 速度と入出力条件の変換を同時に行うと, 変換を規定するパラメータ選択の自由度が減少する。

各変換の相似条件は定理2と定理3から, これらを同時に満たす条件は,

$$v^* = \rho^* \quad (23)$$

である。つまり, 速度比  $v^*$  と幾何学的相似比  $\rho^*$  を等しくとることが必要である。残るひとつのパラメータである密度の比  $\rho^*$  もふたつの変換に共通しているので, 速度と入出力条件の変換を独立に設定することはできない。