

学術論文

相似バイラテラル制御による操作感覚の増幅

榎 泰 輔^{*1} 館 暲^{*2}

Amplification of Sensation of Manipulation by Scaled Bilateral Control

Taisuke Sakaki^{*1} and Susumu Tachi^{*2}

This paper proposes the scaled bilateral control system which amplifies the sensation of force, length, and dynamics in tele-manipulation. The bilateral control should be utilized in the teleoperation where the physical scales between the master and slave environments are different. Scaling rules are applied to design the bilateral system with an extension of the impedance control type bilateral control system. The response of amplified sensation and the contact stability of the system are discussed. Also, the proposed system is verified with the experiments with a pair of linear sliders.

Key Words: Bilateral Control, Scaling Rules

1. は じ め に

バイラテラル制御は、オペレータが機械のアームを使って遠隔作業を行なうテレオペレータの機能のひとつである。これはオペレータにリアルな力のフィードバックを与えることを目的とし、テレオペレーション技術の発展にともなってその制御系の構成方法も発達してきた。既に1950年代には電気式のマスタ・スレーブアームが開発され、バイラテラル制御の必要性が強調された[1]。しかし、その後開発された対称型、力逆送型、力帰還型といったバイラテラル制御では、制御によってアーム動特性を打ち消すことができないため操作性が低く抑えられていた。これを解決するために、近年、インピーダンス制御を適用したバイラテラル制御法が種々提案されている[9]~[14]。例えば、館・榎・井上らは、ロボットのアームをあたかも自分の腕のように扱う操作感覚のトレイグジスタンスの観点から、インピーダンス制御型のバイラテラル制御系を提案している[2]~[6]。これはマスタとスレーブの各アームの仮想動特性を独立に制御することができ、拡張性に富んだシステム構成となっている。以上のように、バイラテラル制御技術は、アームの動特性を調整することで、より優れた操作性をオペレータに与えることができるようになってきた。

しかしながら、従来のテレオペレーション技術では、長さや力などの物理的なスケールの異なる環境の間での遠隔操作にお

いて不十分な点が多かった。物理スケールの異なる遠隔操作とは、通常、スレーブアームとマスタアームおよびそれらの動作する環境のスケールが著しく異なる場合において考えられるものである。これには例えば、オペレータの動作と力を縮小するマイクロサージェリや、逆にオペレータの動作と力を増幅する建設・土木・電力作業用のロボットが考えられる[8][9][12]。このような遠隔操作では、従来、幾何学的な相似性のみを考慮して、動作(長さ)や力の増幅を取り扱ってきた。しかし、長さや力のスケールを単にそれぞれ幾何学的な相似になるように設定しても、動特性をふくむ物理的なスケールが正確に対応する保証がなく、また、マスタ・スレーブ間で着目する物理法則に従ったバイラテラル制御系を設計することができないという問題点がある。一方、物理スケールの異なる遠隔操作における安定性を検討した研究に文献[9]があるが、物理的な相似性を保存するように長さや力のスケールを変換する具体的な方法が明らかでない。以上のように、従来のテレオペレーション技術では2つの環境間の物理的相似性を無視していた。そのため、操作感覚の臨場性についての検討が不十分であった。

この論文では、文献[2]~[6]で開発したバイラテラル制御法をもとに、操作感覚を増幅するための実用的なバイラテラル制御系を提案する。臨場感を考慮して操作感覚の増幅を設計するため、バイラテラル制御系に相似則を適用する。マスタ・スレーブ間で成立する物理法則を指定し、相似則に従って臨場的に増幅された操作感覚を設計する。この制御系の構成を多自由度において議論する。また、アームに設定した仮想インピーダンスが十分小さいとき、物理的相似変換によって仮想的に増幅された環境をオペレータに提示でき、操作感覚を見かけ上増幅

原稿受付 1994年6月6日

^{*1}(株)安川電機 つくば研究所

^{*2}東京大学 先端科学技術研究センター

^{*}Yaskawa Electric Co.

^{**}RCAST, University of Tokyo

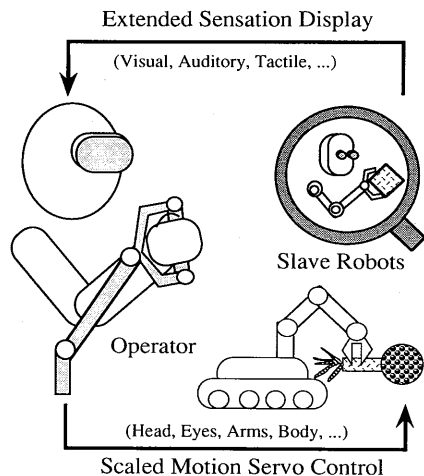


Fig. 1 Concept of scaled bilateral control

することを考察する。さらに、操作感覚を増幅したとき環境と接触したときの安定性をシミュレーションによって検討する。以上のようなシステムを相似バイラテラル制御系と呼ぶ。Fig. 1に概念図を示す。この論文では、第2章で相似バイラテラル制御系の構成と応答性、接触安定性について述べる。第3章では2台のスライダを用いた実験にて、提案する制御系の有効性を検証する。第4章で考察を行ない、第5章で結論を述べる。

2. スケールの異なる環境間での相似バイラテラル制御

2.1 バイラテラル制御における相似条件

スケールの異なる環境間のバイラテラル制御における相似条件を導く。以下の議論は多自由度系で行なう。

スケールの異なる環境間での遠隔操作において臨場感を考慮して操作感覚を増幅を設計するには、幾何学的な相似性だけでなく物理的な相似性を考慮することが有効である。操作感覚の増幅とは、オペレータが操作する対象物の動特性を見かけ上調整することである。オペレータはテレオペレータの操作を通じて対象物の動特性を感じるの、マスタ・スレーブの動特性が、ある物理的整合性を持つとき、増幅された動特性を持つ対象物を直接操作しているような感覚を持つことができる[2]～[4]。

この論文で適用する相似則とは物理的相似則とも呼ばれ、航空機などのモデル実験から実際の現象のデータを推定するとき用いられる[17]。このデータの変換には、幾何学的な相似関係だけでなく物理的な相似性を保つように各物理変数の相似関係を考慮する。ここで物理的相似性は、模型と原型とで対応するすべての独立した物理変数（長さ、時間、力など）が相似であることと定義される。すなわち、物理的な相似が成り立つ状態とは、すべての座標軸に対して、等しい物理現象が模型と原型とで起きることであり、現象を支配する物理法則を抽出し各物理量を基礎的な物理量に分解したとき、それらの基礎的な物理量間の関係が模型と原型との間で一致することが必要である。以下、この基礎的な物理量を代表値と呼ぶ。

スケールの異なる環境間での遠隔操作における相似条件を、

マスタ・スレーブ間で成り立たせる物理法則を設定して具体的に導出する。まず、直線運動と回転運動の各1自由度における相似条件を各々導く。次に、これらを多自由度系の運動における相似条件としてまとめる。なお、以下では相似条件を導く手順を具体的に示すためにある物理法則を仮定するが、仮定する物理法則によって、導かれる相似条件が異なることに注意されたい。

1) まず、直線運動における相似条件を1自由度で導く。ここでは、慣性・粘性・剛性・力の各変数に対し、次の3つの支配的な物理法則を仮定する。

$$\text{慣性力: } f_i = ma = \frac{\rho l^4}{t^2} \quad (1)$$

$$\text{粘性力: } f_v = bv = \mu lv = \frac{\mu l^2}{t} \quad (2)$$

$$\text{弾性力: } f_k = kl \quad (3)$$

ここで、 ρ, μ, l, m, b, k, t はそれぞれ密度、粘性係数、長さ、慣性、粘性、剛性、時間の各変数を代表する代表値である[17]。これらの法則をまとめて π ナンバと呼ばれる変数で表す。 π ナンバは、支配的な物理法則を代表値で表し、同じ変数どうしの比をとって無次元化したものである。マスタ側の物理法則およびスレーブ側の物理法則による各 π ナンバは、

$$\pi_{M1} = \frac{f_{Mi}}{f_{Mv}} = \frac{\rho_M l_M^2}{\mu_M t_M}, \quad \pi_{M2} = \frac{f_{Mk}}{f_{Mv}} = \frac{k_M t_M}{\mu_M l_M} \quad (4)$$

$$\pi_{S1} = \frac{f_{Si}}{f_{Sv}} = \frac{\rho_S l_S^2}{\mu_S t_S}, \quad \pi_{S2} = \frac{f_{Sk}}{f_{Sv}} = \frac{k_S t_S}{\mu_S l_S} \quad (5)$$

である。ここで、 π_{M1} は2つの力の代表値 f_{Mi}, f_{Mv} の比によるマスタの π ナンバである。 π_{M2} は2つの力の代表値 f_{Mk}, f_{Mv} の比によるマスタの π ナンバである。 π_{S1}, π_{S2} は各々マスタに対応するスレーブの π ナンバである。また、他の変数はマスタおよびスレーブの物理量の各代表値で、マスタとスレーブに対応して M あるいは S の添字をつけて表している。マスタとスレーブの間の相似条件は、次式のように、すべての対応する π ナンバどうしが等しいことである[17]。

$$\pi_{M1} = \pi_{S1}, \quad \pi_{M2} = \pi_{S2} \quad (6)$$

これより、インピーダンスの各パラメータの相似比は、次のようになる。

$$m^* = \frac{m_M}{m_S} = \rho^* l^{*3}, \quad b^* = \frac{b_M}{b_S} = \frac{\rho^* l^{*3}}{t^*}, \quad k^* = \frac{k_M}{k_S} = \frac{\rho^* l^{*3}}{t^{*2}},$$

$$l^* = \frac{l_M}{l_S}, \quad \rho^* = \frac{\rho_M}{\rho_S}, \quad t^* = \frac{t_M}{t_S} \quad (7)$$

ここで、バイラテラル制御は実時間($t^*=1$)で実行することから、インピーダンスの相似比 z_i^* は、マスタの目標インピーダンス $Z_{iM} = m_{MS}^2 + b_{MS} + k_M$ 、スレーブの目標インピーダンス $Z_{iS} = m_{SS}^2 + b_{SS} + k_S$ に対して、

$$z_i^* = \frac{Z_{iM}}{Z_{iS}} = m^* = b^* = k^* = \rho^* l^{*3} \quad (8)$$

となる。また、各アームが出力する力の代表値は式(1)～(3)より、

$$f_M = \frac{m_M l_M}{t_M^2} + \frac{b_M l_M}{t_M} + k_M l_M \quad (9)$$

$$f_S = \frac{m_S l_S}{t_S^2} + \frac{b_S l_S}{t_S} + k_S l_S \quad (10)$$

とそれぞれ2次系で表されるので、先の相似条件から力の相似

比は次のように求められる。

$$f^* = \frac{f_M}{f_s} = \rho^* l^{*4} = z_l^* l^* \quad (11)$$

以上をまとめると、相似バイラテラル制御を実現するための、直線運動における条件は、以下のようになる。

$$z_l^* = m^* = b^* = k^*, \quad f^* = z_l^* l^* \quad (12)$$

2) 次に、回転運動における相似条件を同様に1自由度で導く。ここでも慣性モーメント・粘性モーメント・弾性モーメント・力のモーメントの各変数に対し、次の3つの支配的な物理法則を考える。

$$\text{慣性のモーメント: } n_i = I\ddot{\theta} = \frac{\rho l^5}{t^2} \quad (13)$$

$$\text{粘性のモーメント: } n_v = d\dot{\theta} = \frac{\mu l^3}{t} \quad (14)$$

$$\text{弾性のモーメント: } n_k = c\theta = kl^2 \quad (15)$$

ここで、 I, d, c, θ はそれぞれ慣性モーメント、粘性モーメント、弾性モーメント、回転角度の各変数を代表する代表値である。これらの法則をまとめて π ナンバで表すと、1)と同様にして、回転のインピーダンスの各パラメータの相似比を次のように求めることができる。

$$I^* = \frac{I_M}{I_s} = \rho^* l^{*5}, \quad d^* = \frac{d_M}{d_s} = \frac{\rho^* l^{*5}}{t^*}, \quad c^* = \frac{c_M}{c_s} = \frac{\rho^* l^{*5}}{t^{*2}} \quad (16)$$

よってバイラテラル制御における回転のインピーダンスの相似比 z_r^* は、マスタの目標インピーダンス $Z_{rm} = I_M s^2 + d_M s + c_M$ 、スレーブの目標インピーダンス $Z_{rs} = I_s s^2 + d_s s + c_s$ に対して、

$$z_r^* = \frac{Z_{rm}}{Z_{rs}} = I^* = d^* = c^* = \rho^* l^{*5} \quad (17)$$

また、各アームが出力する力のモーメントの代表値は式(13)～(15)より、

$$n_M = \frac{I_M}{t_M^2} + \frac{d_M}{t_M} + c_M, \quad n_s = \frac{I_s}{t_s^2} + \frac{d_s}{t_s} + c_s \quad (18)$$

とそれぞれ2次系で表されるので、先の相似条件から力のモーメントの相似比は次のように求められる。

$$n^* = \frac{n_M}{n_s} = \rho^* l^{*5} = z_r^* \quad (19)$$

以上をまとめると、相似バイラテラル制御を実現するための回転運動における条件は、以下のようになる。

$$z_r^* = n^* = I^* = d^* = c^* \quad (20)$$

3) これらをまとめて多自由度系における運動の相似条件を導出する。多自由度系の目標インピーダンスをマスタ、スレーブに対しそれぞれ行列（インピーダンス行列） $Z_M(s), Z_S(s)$ とし、力およびモーメントのベクトル（以下単に力とする）を F としたとき、多自由度相似バイラテラル制御系の相似比は、インピーダンスと力に対してそれぞれ以下のような対角行列になる。

$$Z^* = \begin{bmatrix} z_l^* & & & \\ & z_l^* & & 0 \\ & & z_l^* & \\ & 0 & & z_r^* \\ & & & z_r^* \\ & & & & z_r^* \end{bmatrix}$$

$$F^* = \begin{bmatrix} f_1^* & & & & \\ & f_2^* & & & 0 \\ & & f_3^* & & \\ & & & n_1^* & \\ 0 & & & & n_2^* \\ & & & & & n_3^* \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここで、多自由度系のマスタ・スレーブの各目標インピーダンス行列を、

$$Z_M(s) = \begin{bmatrix} z_{lM1} & & & & \\ & z_{lM2} & & & 0 \\ & & z_{lM3} & & \\ & & & z_{rM1} & \\ 0 & & & & z_{rM2} \\ & & & & & z_{rM3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} s & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & s \end{bmatrix}$$

$$Z_S(s) = \begin{bmatrix} z_{lS1} & & & & \\ & z_{lS2} & & & 0 \\ & & z_{lS3} & & \\ & & & z_{rS1} & \\ 0 & & & & z_{rS2} \\ & & & & & z_{rS3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} s & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & s \end{bmatrix} \quad (22)$$

とした。また、マスタの各軸の目標インピーダンスのパラメータを直線・回転の各運動に対しそれぞれ、

$$z_{lMi} = [m_{Mi} \quad b_{Mi} \quad k_{Mi}]^T, \quad (23)$$

$$z_{rMi} = [I_{Mi} \quad d_{Mi} \quad c_{Mi}]^T, \quad (i, j=1, 2, 3)$$

とし、スレーブの各軸の目標インピーダンスのパラメータを直線・回転の各運動に対しそれぞれ、

$$z_{lSi} = [m_{Si} \quad b_{Si} \quad k_{Si}]^T, \quad (24)$$

$$z_{rSi} = [I_{Si} \quad d_{Si} \quad c_{Si}]^T, \quad (i, j=1, 2, 3)$$

とし、各軸のインピーダンスパラメータを s 領域に移すパラメータのベクトルを、

$$s = [s^2 \quad s \quad 1]^T \quad (25)$$

とした。また、式(12) (20) から、目標インピーダンスの各軸の相似条件を直線・回転の各運動に対し、

$$z_{li}^* = \rho_{li}^* l_{li}^{*3} I_3, \quad z_{ri}^* = \rho_{ri}^* l_{ri}^{*5} I_3 \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (26)$$

とする（ここで I_3 は3行3列の単位行列）。また、力の各軸の相似条件を力に対しそれぞれ、

$$f_i^* = \rho_{li}^* l_{li}^{*4}, \quad n_j^* = \rho_{ri}^* l_{ri}^{*5} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (27)$$

とした。

以上、相似バイラテラル制御系の相似条件を多自由度系において導出する手順を具体例によって示した。

2.2 相似バイラテラル制御系の構成

この節では、相似バイラテラル制御系の構成を説明する。制御系の構成を具体的に示すため、2.1節で説明した相似条件をもとにして述べる。

サーボ系をベースとしたマスタ・スレーブ・マニピュレータに適用する相似バイラテラル制御系を次のように構成する。Fig. 2 に制御系の構成を示す。外力情報と目標動特性モデルとから、マスタ・スレーブの各システムで独立にマニピュレータへの運動指令を生成する。外力情報は以下に示すように相似変

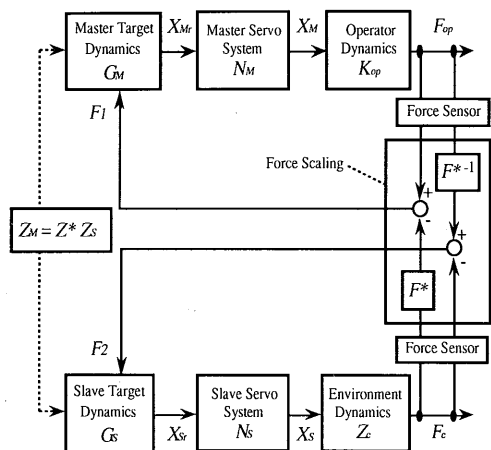


Fig. 2 Block diagram of scaled bilateral control

換したものをを用いる。動特性モデルは2.1節で説明した目標インピーダンスを、以下に示すようにそれぞれマスタ・スレーブに設定する。また、この制御系に用いるサーボ系は、ある固定されたものでなく、実際のシステム構成に応じて適用するものとする。ここで、 G_M はマスタの目標インピーダンス行列 $Z_M(s)$ の逆行列でマスタの目標動特性モデルを表す。 G_S はスレーブの目標インピーダンス行列 $Z_S(s)$ の逆行列でスレーブの目標動特性モデルを表す。これらは、インピーダンスの相似比 Z^* をもちいて、式(17)より、

$$G_S = Z^* G_M, \quad G_M = Z_M^{-1}(s), \quad G_S = Z_S^{-1}(s) \quad (28)$$

の関係がある。ここで、相似比は式(12)(20)の関係をみだす。また、 N_M, N_S はマスタ・スレーブのサーボ系の各伝達関数行列である。 K_{op} はオペレータの剛性行列、 Z_e は環境の動特性の行列である。 X_{Mr}, X_{Sr} はマスタ・スレーブの各位置指令値ベクトルである。 X_M, X_S はマスタ・スレーブの各位置ベクトルである。 X_{op} はオペレータの指令位置ベクトル、 X_e は環境の表面位置ベクトルである。 F_{op} はオペレータの発生した操作力ベクトル、 F_e はアームが環境にくわえた外力ベクトルである。 F_1, F_2 はマスタ・スレーブへ送る各力情報ベクトルを示す。以上の行列は 6×6 行列、ベクトルは6次元ベクトルである。

相似バイラテラル制御系の相似比と目標インピーダンスを次のようにして設定する。

1) 各相似比を決定する。2.1節で導いた相似条件では、3種類の相似比を各軸において決定する必要がある。それは長さの相似比、インピーダンス相似比、そして力の相似比である。式(12)(20)から、これらはすべて独立ではないので、たとえば力の相似比と長さの相似比を決め、相似バイラテラル制御の条件から、インピーダンスの相似比をもとめる。

2) 各目標インピーダンスを導出する。マスタとスレーブの目標インピーダンス行列は設定した相似比にしたがって決める。たとえばスレーブの目標インピーダンス行列 $Z_S(s)$ を決め、これとインピーダンスの相似比 Z^* よりマスタの目標インピーダンス行列 $Z_M(s)$ を導く。式(22)より、

$$z_{Mi} = z_{li}^* z_{Si}, \quad z_{rMj} = z_{rj}^* z_{rSj} \quad (i, j=1, 2, 3)$$

なので、

$$Z_M(s) = Z^* Z_S(s) \quad (29)$$

となる。同様にして、マスタからスレーブの目標インピーダンス行列を導くこともできる。

相似バイラテラル制御系は次のように動作を実行する。まず、操作力 F_{op} と外力 F_e を計測し、次のような相似変換を行なって各システムへの力情報 F_1, F_2 とする。

$$F_1 = F_{op} - F^* F_e, \quad F_2 = F_i^{-1} F_{op} - F_e \quad (30)$$

ここで、操作力、外力、マスタおよびスレーブへ送る力情報はそれぞれ6次元のベクトルである。次に、これらの力情報 F_1, F_2 と各アームの目標インピーダンス行列とから、各アームが追従すべき目標軌道を計算する。

$$X_{Mr} = G_M(s) F_1, \quad X_{Sr} = G_S(s) F_2 \quad (31)$$

ここで、導いた目標軌道はそれぞれ6次元のベクトルである。これらの軌道を追従するように各アームのサーボ・コントローラがはたらく。

2.3 相似バイラテラル制御系の応答性

この節では、相似バイラテラル制御系を適用したマスタ・スレーブマニピュレータを通して、オペレータが対象物を操作したときの応答性を解析する。以下では議論を簡単にするため1自由度系にて解析を進める。

オペレータがマスタに力を加えスレーブを環境に接触させたときのマスタの位置の応答性を、バイラテラル制御系の応答性として以下解析する。Fig. 2より応答性は、

$$G_{op} = \frac{X_M}{F_{op}} = \frac{N_M}{Z_M + Z^* N_S Z_e} \quad (32)$$

となる。すなわち、このバイラテラル制御系の応答性は、マスタの目標インピーダンス、インピーダンスの相似比、環境の動特性、各サーボ系の応答性に依存する。ここで、サーボ系の応答が理想的であるとして $N_M, N_S \rightarrow 1$ とすると、

$$G_{op} \rightarrow \frac{1}{Z_M + Z^* Z_e} \quad (33)$$

となる。さらに、仮想インピーダンスを十分小さくできたとして $Z_M \rightarrow 0$ とすると、

$$G_{op} \rightarrow \frac{1}{Z^* Z_e} \quad (34)$$

となる。

以上の解析結果から次のことがわかる。

1) マスタ・スレーブマニピュレータを通してオペレータが対象物を操作するとき、マスタに実現した仮想インピーダンスと、動特性を増幅した対象物とを合わせた動特性を、オペレータが感じる。相似バイラテラル制御系において、長さ、力およびインピーダンスはマスタとスレーブの間で物理的な相似をみたすことから、スレーブの接する環境の動特性を表すインピーダンス行列 Z_e は、Fig. 3に示すように、仮想インピーダンス Z_v に増幅されてオペレータに提示されることになる。

$$Z_v = Z^* Z_e \quad (35)$$

2) マスタ・スレーブに実現する仮想インピーダンスを制御系をできるだけ小さくすると、増幅した対象物の動特性を直接オペレータが感じることになり、操作感覚の臨場性を高めることができる。このとき、マスタとスレーブに設定可能な仮想インピーダンスを式(29)をもちいてスケールを等しくして比較し、その大きい方を設定値として採用する。2.4節で述べるよう

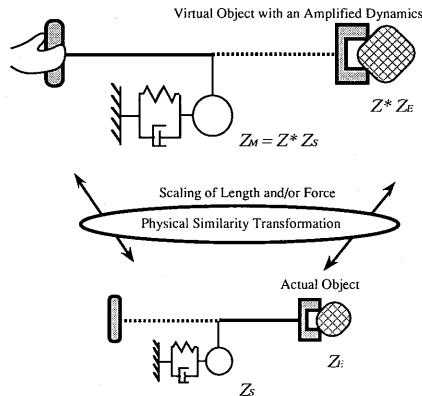


Fig. 3 Effect of virtually amplified object dynamics

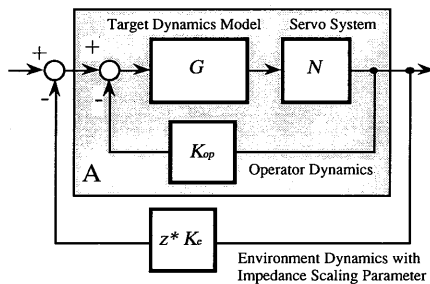


Fig. 4 Contact system of scaled bilateral control

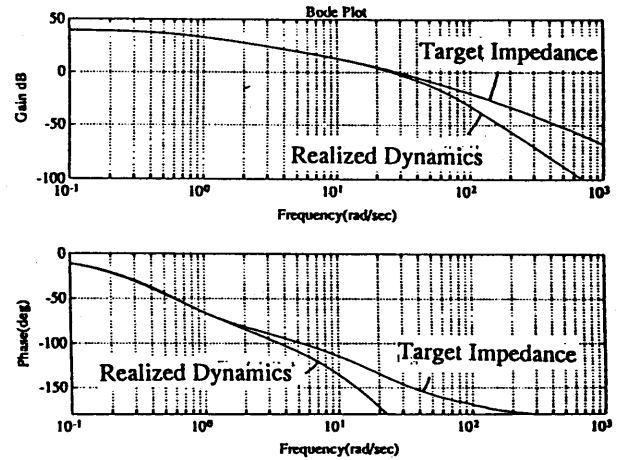
に、接触安定性を低下させない程度に仮想インピーダンスを小さくするものとする。

2.4 相似バイラテラル制御系の接触安定性

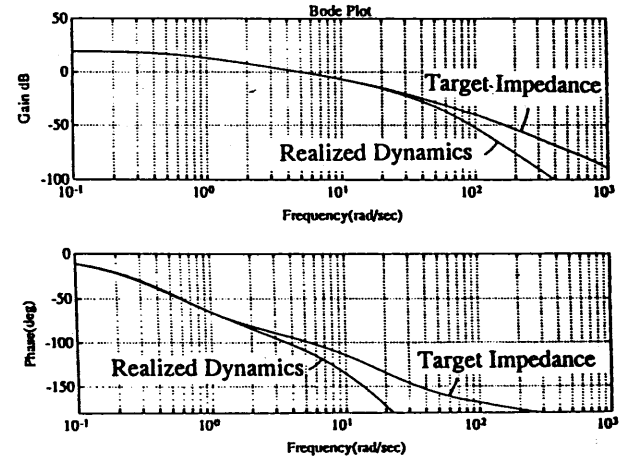
この節では、相似バイラテラル制御系の接触安定性について解析する。力制御を行なうマニピュレータと同様に、バイラテラル制御系でも接触安定性についての問題がある。以下、2.1節で導いた相似条件による相似バイラテラル制御系を例にとって接触安定性を解析する。簡単のため直線運動を行なう1自由度系で解析する。

インピーダンス制御などの力制御系を施したロボット・マニピュレータを、剛性の高い対象物に接触させると不安定になることがある。これを接触安定問題という。マニピュレータが環境に接触したとき、マニピュレータの制御系と環境の動特性とを結合した全体の動特性が一種のフィードバック系として表れる。このとき環境の剛性が高くなることが、フィードバック系のループゲインが大きくなることに相当し、系を不安定にすると考えられる[7][18]。マスタの操作によってスレーブが環境に接触するバイラテラル制御系でも、同様に、剛性の高い環境に接触すると制御系が不安定になることがある。

相似バイラテラル制御系の接触安定性を解析するため、Fig. 2に示した制御系をFig. 4のように等価変換する。これを相似バイラテラル制御の接触系という。ここでは後の解析を簡単にするため、マスタとスレーブのサーボ系の特性を等しいと仮定する。また、マスタの目標インピーダンスを z_o としてマスタとスレーブの目標動特性をそれぞれまとめて G で表す。さらに、環境の動特性を剛性 K_e で表す。



(a) $K_e=10[\text{N/m}]$, $z^*=10$



(b) $K_e=10[\text{N/m}]$, $z^*=100$

Fig. 5 Bode plot of scaled bilateral contact system

$$N=N_M=N_S, \quad G=G_M=\frac{1}{z^*}G_S=\frac{1}{z_o} \quad (36)$$

ここで、オペレータの剛性 K_{op} を一定値と仮定すると、図のブロックAで表したプラントに対して z^*K_e なるフィードバックゲインをかけたフィードバック系と、接触系をみなすことができる。このフィードバック系の一巡伝達関数 G_o は、式(12)から

$$G_o = z^*K_e \frac{N}{Z_o + K_{op}N} = \frac{f^*}{l^*} K_e \frac{N}{Z_o + K_{op}N} \quad (37)$$

となる。

以上の関係をもちいて、相似バイラテラル制御系の接触安定性を解析する。オペレータがマスタ・スレーブを操作して環境に接触したとき、Fig. 4で示したように接触はフィードバック制御系とみなせる。このフィードバック制御系の安定性が接触安定性を表す。環境の剛性と相似比のパラメータに対する接触安定性を、シミュレーションによって解析する。シミュレーションにはSIMULABを用いた。以下のシミュレーションは次の条件において行なった。ここではサーボ系としてP-PI型の位置サーボ系を例にとる。

目標インピーダンス： $z_o=(1[\text{kg}], 20[\text{Ns/m}], 10[\text{N/m}])$ 。

P-PI 型サーボ系の特性: $K_p=25$, $K_v=100$, $K_i=25$.

オペレータの剛性: $K_{op}=1$ [N/m].

Fig. 5 で示したのが解析結果である。式 (37) で導いた一巡伝達関数と目標インピーダンスとをボード線図にて示す。Fig. 5 (a) ではインピーダンスの相似比を $z^*=10$ とし, Fig. 5 (b) では $z^*=100$ とした。環境の剛性はどちらも $K_e=10$ [N/m] とした。どちらも目標インピーダンスに対して高周波領域で遅れが生じていることがわかる。これはサーボ系の位相遅れが影響したものである。目標インピーダンスのグラフはサーボ系の伝達関数が 1 の理想的な場合を示している。目標インピーダンスを実現した場合は安定余裕があり, したがって接触の安定性が高い。サーボ系の位相遅れがある場合, Fig. 5 (b) ではほとんど安定余裕がない。一方, Fig. 5 (a) では目標インピーダンスほどではないが安定余裕がある。

以上の解析結果から以下のような設計指針が導かれる。

- 1) 環境の剛性を高くしていくと接触は不安定になる。
- 2) インピーダンスの相似比を高くすると接触は不安定になる。

3) 接触安定性は, 環境の剛性とインピーダンスの相似比との積で決まる。

4) このインピーダンスの相似比は式 (12) をみたすので, 以上のことから, 力の相似比と長さの相似比との関係より, 力の相似比が高いほど, また長さの相似比が低いほど接触は不安定になることがわかる。

以上の設計指針によれば, 接触安定性を向上するには目標インピーダンスをある程度大きくする必要がある。一方, 2.3 節で解析したように応答性を向上するには目標インピーダンスをできるだけ小さくする必要がある。このように接触安定性の向上と応答性とはトレードオフとなる。実際には, 接触する環境の剛性をあらかじめ見積もり, そのなかで目標インピーダンスをできるだけ小さく設定して応答性を上げることになる。

3. 相似バイラテラル制御による遠隔操作実験

相似バイラテラル制御による遠隔操作の有効性を簡単な 1 自由度系において検証する。以下では, スレーブの力と長さのスケールを増幅したときの応答性を検証する実験を行なう。2.3 節で述べたように, 環境の動特性がこの相似条件にしたがって増幅されてオペレータに提示されることを確認する。

Fig. 6 に示すような 2 台のリニアスライダを 1 自由度のマスタ・スレーブ・システムとして用いる。各スライダは DC サーボモータによって駆動される。各スライダのテーブルに力センサを固定し, スライドする方向に作用する外力を計測する。テーブルの位置はモータの関節角度から求める。また, 速度は, 2 次のローパスフィルタをもちいて角度を微分して角速度をもとめ計算する。計算機では, 外力およびテーブルの位置・速度と設定した目標インピーダンスとから, 指令位置を計算する。計算機ではまた, 位置の P 制御と速度の PI 制御によりデジタルサーボ系を構成する。サーボ系によるトルク指令をモータドライバに出力する。力センサの定格は 50 [N], 制御周期は 3 [ms] である。対象物は柔らかいスポンジである。

以下では, スレーブの力と長さのスケールを増幅する実験を

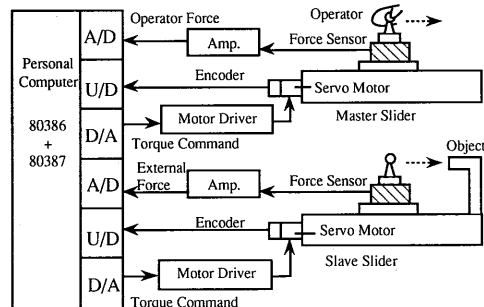
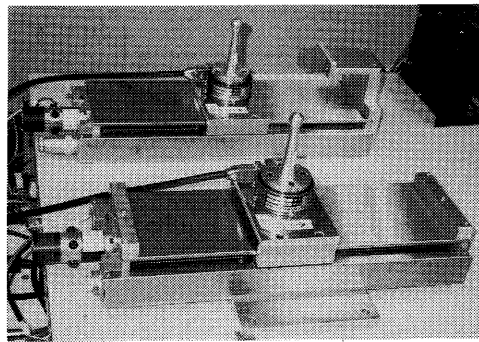


Fig. 6 Experimental setup and its control block

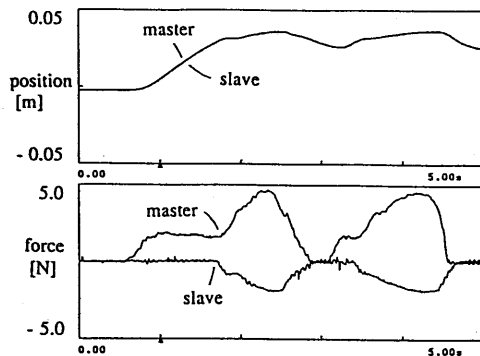
行なう。2 章で説明したアルゴリズムにしたがって, 各相似比を決める。

1) 力の増幅とこれにともなうインピーダンスの増幅。Fig. 7 (a) はマスタとスレーブの位置と力の時間履歴をしめしている。マスタとスレーブの運動は一致しているが, マスタの操作力はスレーブの外力に比べ 2 倍の値になっている。いいかえるとマスタの操作力は 1/2 に縮小されてスレーブの力として出力されている。これらの位置と力の関係から, 対象物のインピーダンス Z_e は $Z_v=z^*Z_e=2Z_e$ より, 2 倍に増幅されてオペレータに提示される。このことからオペレータは対象物の剛性が 2 倍に堅くなったように感じることになる。

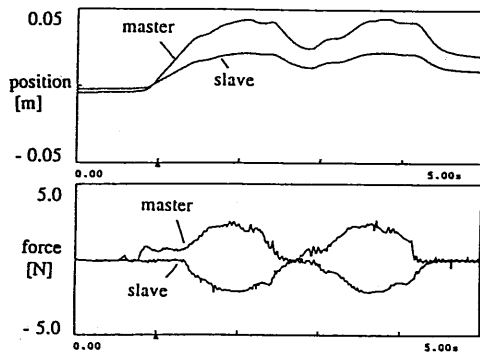
2) 長さの増幅とこれにともなうインピーダンスの縮小。Fig. 7 (b) において, マスタとスレーブの力のスケールは一致しているが, マスタの運動はスレーブの運動に比べ 2 倍の値になっている。いいかえるとマスタを操作する運動は 1/2 に縮小されてスレーブの運動として出力されている。これらの位置と力の関係から, 対象物のインピーダンス Z_e は $Z_v=z^*Z_e=0.5Z_e$ より 1/2 倍に増幅される。このことからオペレータは剛性が半分に柔らかくなったように対象物を感じるようになる。

3) 力と長さの増幅。Fig. 7 (c) で, マスタとスレーブの操作力と運動はそれぞれスレーブの外力と運動に比べスケールが 2 倍の値になっている。いいかえるとマスタを操作する力と運動はそれぞれ 1/2 に縮小されてスレーブの力と運動として出力されている。これらの位置と力の関係から, 対象物のインピーダンス Z_e は $Z_v=z^*Z_e=Z_e$ である。この場合, 環境は同じスケールの動特性としてオペレータに提示されたことになる。

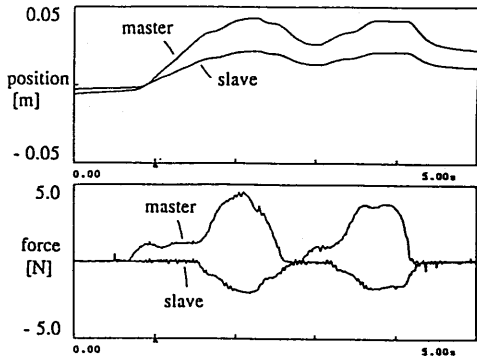
相似バイラテラル制御によって 2.1 節で導いた相似条件を保つようにマスタ・スレーブ間の力および長さを変換できることを検証した。力または長さを変換すると相似条件によりインピ



(a) Force amplification case. $f^*=2, l^*=1, z^*=f^*/l^*=2$. Z_s : (1[kg], 20[N/(m/s)], 10[N/m]). Z_m : (2[kg], 40[N/(m/s)], 20[N/m])



(b) Length amplification case. $f^*=1, l^*=2, z^*=f^*/l^*=0.5$. Z_s : (1[kg], 20[N/(m/s)], 10[N/m]). Z_m : (0.5[kg], 10[N/(m/s)], 5[N/m])



(c) Force and length amplification case. $f^*=2, l^*=2, z^*=f^*/l^*=1$. Z_s : (1[kg], 20[N/(m/s)], 10[N/m]). Z_m : (1[kg], 20[N/(m/s)], 10[N/m])

Fig. 7 Experimental results of scaled bilateral control

ーダンスの変換も同時に行なわれることも確認した。また、マスタ・スレーブ・マニピュレータを通してオペレータが対象物を操作するとき、マスタに実現した仮想インピーダンスと動特性を増幅した対象物とを合わせた動特性をオペレータが感じることを検証した。

4. 考 察

1) 2.1節でも述べたように、ここで導出した相似条件は固定ではない。相似条件は選択する物理法則によって変わらう

る。また、タスクによって物理法則を変えて操作感覚を変更することが可能である。これが相似バイラテラル制御系の特徴である。ただし、制御系の基本構成を変える必要はない。

2) 2.3節で解析したように、増幅度を上げたうえで硬い環境に接触する場合は接触安定性が低下する。このため増幅度を上げられないという問題が生じる。これを解決するため、文献[7]で提案しているような制御系を適用することを考える。これにより、より小さな仮想インピーダンスを実現できるため、接触の安定性が高くなり、かつ、応答性も向上できる。

3) 2.4節で考察したように、力の相似比が高く長さの相似比が低い場合には接触が不安定になりやすくなる。これは、例えばマイクロマニピュレータをスレーブとして力の増幅を行なった場合に相当する。ただし、長さの増幅率を表す対角行列を L^* とすると、これを同時に大きく設定した場合、 $Z^*=F^*L^{*-1}$ より Z^* の各パラメータを小さくすることができる。したがって、接触安定性を低下させずに制御系を構成できる。

4) バイラテラル制御系の接触安定性は、環境の動特性とともに一般にオペレータの動特性にも依存する。2.4節で解析した結果と同様にして、オペレータの剛性が高くなると相似バイラテラル制御系の安定性が低下する虞がある。これは、インピーダンスの相似比が低くなると顕著になる。すなわち、2.4節の解析結果とちょうど逆の結果が得られる。これは、Fig. 4の接触系を等価変換すると、 z^* の逆数が K_{op} に乗じられるからである。しかし、一般にオペレータの剛性は環境の剛性に比べて十分に低いと考えられるので、 z^* を極端に小さくしない限り、接触の不安定が生じることはないと考えられる。

5) また、オペレータあるいは環境の非線形な動特性により、このようなバイラテラル制御系が不安定になることが考えられる。この場合は、本論文で検討した範囲を越えるので詳述しないが、オペレータや環境の動特性が受動的であると仮定すると、いわゆる small gain 定理により制御系の入出力関係が安定であることを示すことができると考える[15][16]。

6) マスタ・スレーブの2台のロボットを1台とし、制御系の構成をマスタとスレーブで一体としたものが人力増幅器にあたる。この場合、実験1で示したように、マスタとスレーブの長さの比が1となるような相似バイラテラル制御系を適用することにあたる。このように考えると人力増幅器は、相似バイラテラル制御系を適用したマスタ・スレーブの特別な場合と捉えることができる。したがって、応答性や接触安定性を2章で述べたような方法と同様に解析することができる。ただし、ここで検討した人力増幅器は、文献[16]で提案されている Extender の制御系と大まかな構成が似ているものの、前者はアーム動特性を仮想インピーダンスに調節する点が異なる。また、仮想インピーダンスを実現する人力増幅器として計算トルク法を用いた文献[15]があるが、本論文で考察した制御系はより一般的なサーボ系を用いた構成となっている。

5. 結 論

この論文では、物理的なスケールの異なる環境間で、物理的な相似性を満足して動作する実用的な相似バイラテラル制御システムを提案した。また、提案したシステムの応答性と接触安

定性を解析し、操作感覚を増幅する機能を実験にて検証した。

提案する制御系は以下のような特徴をもつ。

1) 選択する物理法則にしたがった相似条件を導くことができる。例として慣性・粘性・弾性の各力に対応した物理法則を取り上げ具体的に相似条件を導いた。

2) 提案する制御系は下位のサーボ系の構成を選ばない実用的な構成をもつ。

3) 相似バイラテラル制御系の応答性を解析し実験にて検証した。相似条件に対応して増幅された環境の動特性がオペレータに提示される。また、このときサーボ系の応答性が理想的であるほど、各マニピュレータで設定する仮想インピーダンスが小さいほど、環境を操作する感覚の臨場性が向上する。

4) 相似バイラテラル制御系の接触安定性は、環境の剛性とインピーダンスの相似比との積で決まる。

今後、接触の安定化手法を適用した制御系の構築と多自由度マニピュレータを用いた実験にて、さらにシステムの有効性の検証を行なっていく所存である。

本研究を進めるにあたり、(株)安川電機 つくば研究所の川辺満徳氏、基礎研究所の井上康氏に貴重な助言をいただいた。ここに深謝します。

参 考 文 献

- [1] R. C. Goertz: "Fundamentals of General-Purpose Remote Manipulations," Nucleonics, vol. 10, no. 11, pp. 36-42, 1952.
- [2] 館, 榎: "インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム(I)", 日本ロボット学会誌, vol. 8, no. 3, pp. 1-12, 1990.
- [3] 榎, 館: "インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム(II)", 日本ロボット学会誌, vol. 8, no. 3, pp. 13-24, 1990.
- [4] T. Sakaki and S. Tachi: "Impedance Scaling of a Tele-Existence Master-Slave Manipulation System by Using Similarity

Transformation," Proc. ISMCR '92, pp. 295-302, Tsukuba, 1992.

- [5] T. Sakaki, Y. Inoue and S. Tachi: "Tele-Existence Virtual Dynamics Display Using Impedance Scaling with Physical Similarity," Proc. of ICAM '93, pp. 127-132, Tokyo, 1993.
- [6] 井上, 館, 荒井: "マスタスレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一方", 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 4, pp. 64-74, 1992.
- [7] 榎, 館: "サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における接触作業の安定化", 日本ロボット学会第4回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 167-172, 1994.
- [8] 仁尾: "VRのロボットへの応用", OHM, vol. 80, no. 3, pp. 40-48, 1993.
- [9] J. E. Colgate: "Power and impedance scaling in bilateral manipulation," Proc. of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, 1991.
- [10] B. Hanaford: "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," IEEE Trans. Rob. Autom, vol. 5, no. 4, 1988.
- [11] T. B. Sheridan and Staff: "MIT research in telerobotics," Proc. of the Workshop on Space Telerobotics, vol. 2, pp. 403-412, JPL Publication 87-13, 1987.
- [12] 福田, 谷江, 光岡: "マイクロマニプレータの制御", 日本機械学会論文集(C編), vol. 53, no. 493, pp. 1950-1956, 1987.
- [13] 横小路, 吉川: "理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御", 計測自動制御学会論文集, vol. 27, no. 1, pp. 56-63, 1990.
- [14] 古田, 小菅ほか: "仮想内部モデルに基づくマスタスレーブマニピュレータの制御", 計測自動制御学会論文集, vol. 24, no. 2, pp. 176-182, 1988.
- [15] 小菅, 藤澤, 福田: "仮想道具特性に基づくマン・マシン系の制御", SICE '93 予稿集, pp. 255-256, 1993.
- [16] H. Kazerooni, S. L. Houpt: "Dynamics and Control of Robotic Systems Worn by Humans," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 113, September, pp. 379-387, 1991.
- [17] 江守: "模型実験の理論と応用", 技報堂出版, 1985.
- [18] An, Atkeson, Hollerbach: "モデルに基づくロボットマニピュレータの制御, 実教出版, 1991.



榎 泰輔 (Taisuke Sakaki)

1960年11月5日生。1985年、九州大学理学部数学科を卒業。(株)安川電機製作所(現(株)安川電機)に入社。1987年から1989年、通産省機械技術研究所客員研究員。1989年から(株)安川電機研究所、つくば研究所研究員を経て現在に至る。IEEE/IAS 1991 Annual Meeting 論文賞を受賞。(日本ロボット学会正会員)



館 暲 (Susumu Tachi)

1946年1月1日生。1968年、東京大学工学部計数工学科卒業。1973年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士、東京大学助手。1975年通産省機械技術研究所研究員。その後主任研究員、遠隔制御課長、バイオロボティクス課長。1979年から1980年、マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989年、東京大学助教授。1992年、東京大学教授に就任、現在に至る。IEEE/EMBS 学会賞、通産産業大臣賞などを受賞。国際計測連合学会(IMEKO)ロボティクス会議議長を務める。(日本ロボット学会正会員)