

リニアモータを用いた力覚再現システムの研究

A Study on Tactile Recreation System Using Linear Motor

80222197 黒川浩正 (Hiromasa Kurokawa) Supervisor 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

1 緒論

現在，遠隔操作ロボットは極限環境や内視鏡手術などの分野など多くの分野で使用されつつあるが，操作においてきわめて重要な触覚が得られないという今日まで全く解決されていない問題が存在する．特に，微細作業を行う際における触覚技術が希求されている．以上に鑑み，本論文ではバイラテラル制御により遠隔地の作用反作用則の再現を行うばかりでなく，位置・力のスケーリングを新たに導入することで触覚伝送特性の向上を図る．

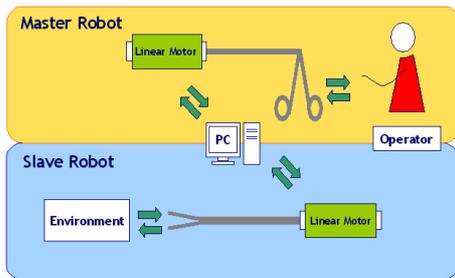


図 1: Example of an informationally connected system

2 バイラテラルシステム

この章では，触覚伝送装置として用いる鉗子ロボットのモデリングを示し，外乱オブザーバ，反力推定オブザーバについて述べる．本研究で使用しているバイラテラルシステムは1自由度である．したがって，次の方程式が得られる．リニアモータの機械的な運動方程式，電気的な運動方程式はそれぞれ eq.(1), eq.(2) のように表される．

$$F = M\ddot{X} + D\dot{X} \quad (1)$$

$$F = K_t I_a \quad (2)$$

ここで， F は発生する力， M はリニアモータの移動子の質量， $D(\dot{X})$ は粘性係数， K_t はトルク定数， I_a はモータに流す電流を表わす．

3 バイラテラルシステムの構成

バイラテラルシステムで利用できる情報には「力」「位置」情報がある．マスタ・スレーブロボットが理想的なバイラテラル制御が表現できるとき，eq.(3), eq.(4) を満足する．

$$F_m^{res} = -F_s^{res} \quad (3)$$

$$X_m^{res} = X_s^{res} \quad (4)$$

本論文では，位置と力のフィードバックをマスタ・スレーブの双方向に行う方式として，「位置・力対称型」を採用する．

4 スケーリング

4.1 スケーリング

製品開発，バイオ分野，医療分野などマイクロオペレーションと人手を必要とする微細作業は多く存在する．これらの作業を自立的に行うことのできるマイクロロボットは現段階では実現困難な状況にある．微細作業は人間と対象物とスケールの違いから人間にと手ストレスフルな作業である．人間と対象物をテレオペレーションで結ぶことにより，このような問題を解決できると考えられる．

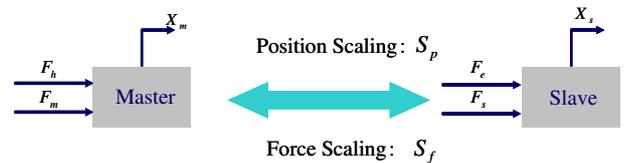


図 2: Single Degree of Freedom Teleoperation

マスタロボット，スレーブロボットはそれぞれ次の運動方程式で表わされる．

master:

$$u_m = M_m s^2 X_m - F_m \quad (5)$$

slave:

$$u_s = M_s s^2 X_s - F_e \quad (6)$$

ここで， $u_m, u_s, M_m, M_s, X_m, X_s$ は，それぞれマスタ，スレーブのアクチュエータの発生力，質量，変位を示す． F_m は操作者がマスタロボットに加える力， F_s はスレーブが環境から受ける力を表わす．環境がスレーブロボットと接触しているときは eq.(8) で表わされる．また，操作者は eq.(7) で表わされる．

operator :

$$F_{op} - F_m = (M_{op} s^2 X_m + D_{op} s X_m + K_{op} X_m) = Z_{op} X_m \quad (7)$$

environment :

$$F_e - F_s = (M_e s^2 X_s + D_e s X_s + K_e X_s) = Z_e X_s \quad (8)$$

ここで, $M_{op}, D_{op}, K_{op}, M_e, D_e, K_e$ はそれぞれ操作者, 環境のインピーダンスパラメータを表わす. Z はインピーダンスを表わし, 添え字 op, e はそれぞれ操作者と環境を表わす.

F_{op} は操作者が発生する力, F_e は環境から受ける力を表わす. 理想的なバイラテラル制御が表現できる時 $u_m = F_s, s_s = F_m, X_m = X_s$ を満たす. 環境がパッシブな状態であるとき $F_e = 0$ である.

バイラテラルシステムにおける位置のスケーリングと力のスケーリングは, 外乱オブザーバに基づく加速度制御系により位置制御と力制御を加速度次元の統合することにより独立に設計できる.

$$X_m = S_p X_s \quad (9)$$

$$u_m = S_f F_e \quad (10)$$

$$u_s = \frac{F_e}{S_f} \quad (11)$$

ここで S_p, S_f はそれぞれ位置のスケール比, 力のスケール比である.

eq.(5) ~ eq.(11) より,

$$F_{op} + S_f F_e = M_m s^2 X_m + Z_{op} X_m + \frac{S_f}{S_p} Z_e X_m \quad (12)$$

$$\frac{F_{op}}{S_f} + F_e = M_s s^2 X_s + \frac{S_p}{S_f} Z_{op} X_s + Z_e X_s \quad (13)$$

eq.(12), eq.(13) より, $S_f = S_p$ の時, スケーリングによる環境, 操作者にそれぞれインピーダンスには影響を与えないことを示す. 一方, $S_f \neq S_p$ の時, スケーリングによる環境, 操作者それぞれの見かけ上のインピーダンスに影響を与える. マスタ・スレーブの遠隔操作において, $S_f = S_p$ のとき透明性が成立する.

4.2 安定性

ブロック線図から, マスターにおけるクローズドループの力から位置に対するの伝達関数は以下のように表わされる.

$$\frac{X_m}{F_h} = -\frac{A}{B} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} A = & M(s+g) \\ & \{s^3 + MK_f g s^2 + (K_p + K_v s)s \\ & + (1 + S_{f1} S_{p1}) MK_f g (K_p + K_v s)\} \\ & + (K_e + K_d s)(s^2 + 2MK_f g s) \end{aligned} \quad (15)$$

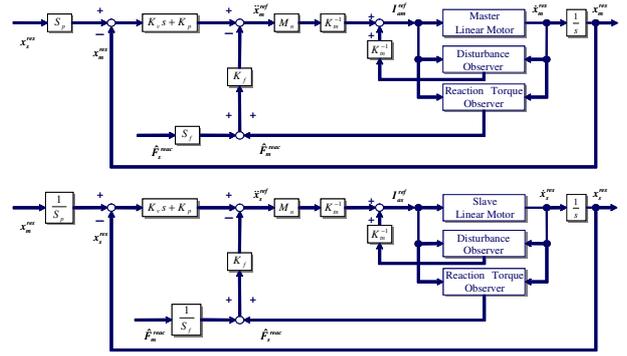


図 3: The block diagram of bilateral control

$$\begin{aligned} B = & M(s+g) \\ & \{M s^2 (s+g)(S^2 + 2(K_p + K_v s) \\ & + (K_e + K_d s)[s^3 + (K_e + K_d s)s^2 + (K_p + K_v s)s \\ & + (1 + S_{f2} S_{p2} M K_f g (K_p + K_v s))]\} \end{aligned} \quad (16)$$

5 実験

バイラテラル鉗子ロボットを用いて実験を行った. スケール比を $S_f = 0.1, S_p = 0.1$ と設定し, スレーブで金属片を把持した. その結果を図 4, 5 に示す.

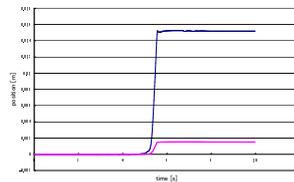


図 4: 位置応答

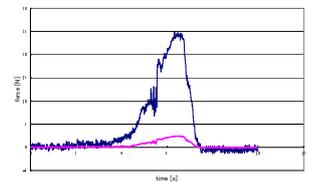


図 5: 力応答

6 結論

本研究ではバイラテラル制御において加速度制御系により位置制御と力制御を加速度次元で統合することにより位置・力のスケーリングを独立に設計できることを示した. これにより, 触覚伝送特性の向上を図った. 新たに製作した鉗子ロボットを用いた実記実験により明らかになった.

参考文献

- [1] T.Miyazaki: "Parallel Control Method for a Bilateral Master Slave Manipulator" Journal of the Robotics Society of Japan, vol.7 no.5, pp.446-452, 1989