

バイラテラル遠隔操作における再現性と操作性 Reproducibility and Operability in Bilateral Teleoperation

80221387 飯田 亘 (Wataru Iida) Supervisor 大西 公平 (Kouhei Ohnishi)

1 序論

バイラテラル遠隔操作は、以前から様々な手法が提案されているが、それらを統一的に評価する試みはあまり行われていない。そこで本研究では、“再現性”と“操作性”という新しい評価指標を定義して定量的な特性解析・評価を行う。さらに定義した指標を用いて新しい制御系を設計し、特性解析、シミュレーションおよび実験により、本研究の有効性を確認する。

2 モーションコントロール

本研究で用いるバイラテラル鉗子ロボットは、マスター・スレーブ共に3相同期リニアモータにより駆動され、それぞれ1自由度の直線運動のみ行う。エンドエフェクタの位置を X 、モータ慣性を M 、モータに働く力を F とすると、動力学はラプラス表現を用いて次式で表される。

$$Ms^2X = F \quad (1)$$

3 現実の力制御

力制御では力情報の検出が必要である。しかし、現実にはセンサノイズや計算速度等の影響で、力の検出周波数帯域が制限されてしまう。センシング帯域を考慮した現実の力制御系を図1に示す。なおこれは、外乱オブザーバ[1]を用いたロバスト加速度制御系に基づいている。

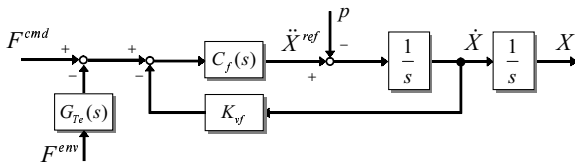


図 1: 現実の力制御系

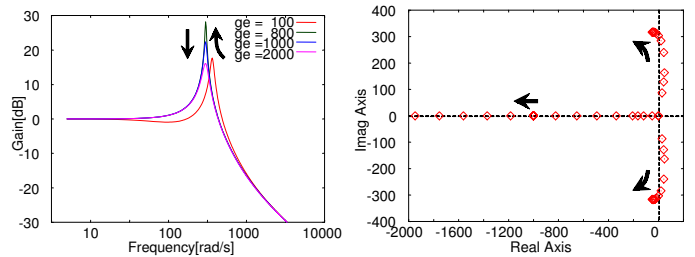
力指令値 F^{cmd} と環境反力 F^{env} の関係は、

$$F^{cmd} - G_{T_e}(s)F^{env} = \left(\frac{1}{C_f(s)}s^2 + K_{vf}\right)X + \frac{1}{C_f(s)}p \quad (2)$$

となる。 $C_f(s)$ は力制御器、 K_{vf} は安定化のためのダンピングゲイン、 p は高周波外乱による影響である。また、センシング帯域 g_e [rad/s] を制限するために低周波域通過フィルタ $G_{T_e}(s)$ を用いる。1次のフィルタは次式で表せる。

$$G_{T_e}(s) = \frac{g_e}{s + g_e} \quad (3)$$

$C_f(s)$ に固定値を、環境にバネ・ダンパモデルを適用し、 g_e を変化させた場合のボード線図および根軌跡を図2に示す。(a)では、センシング帯域によってピークゲインが変わるが、共振周波数は変わらない。(b)より、センシング帯域が狭いと極が右半平面に位置して系は不安定だが ($g_e < 620.0$)、十分に広ければ安定化できることがわかる。



(a) ボード線図

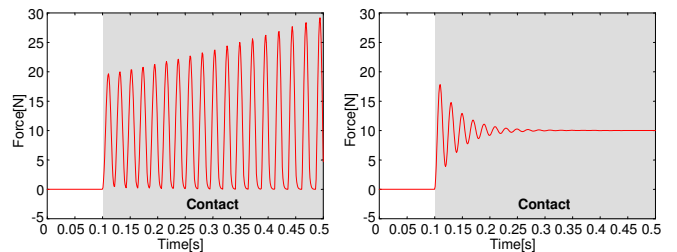
$g_e = 100.0 \rightarrow 2000.0$

(b) 根軌跡

$g_e = 0.0 \rightarrow 2000.0$

図 2: 力制御系におけるセンシング帯域の影響

次に、エンドエフェクタを環境へ接触させて 10.0N のカステップ入力を与えるシミュレーション結果を図3に示す。センシング帯域が狭い $g_e = 600.0$ の場合には不安定化を招き、その力応答は発散してしまうが、十分に広い帯域 $g_e = 1000.0$ では安定に収束している。この理由としては、図2(b)において $g_e = 600.0$ の極が右半平面に位置しているためであると説明できる。



(a) $g_e = 600.0$

(b) $g_e = 1000.0$

図 3: 力制御における接触動作シミュレーション

4 バイラテラル遠隔操作

ハイブリッド行列を用いて、マスターとスレーブの位置・力関係を次式のように定式化する [2]。

$$\begin{bmatrix} F_m \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ -F_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで X, F , 添え字の m, s はそれぞれ位置, 力, マスタ, スレーブを表す. 環境のインピーダンス Z_e を導入し, マスタにおける位置・力関係式を次式のように得る.

$$F_m = (H_{11} - H_{12}Z_e)(H_{21} - H_{22}Z_e)^{-1}X_m = Z_t X_m \quad (5)$$

Z_t は操作者が感じるインピーダンスであり, これが環境インピーダンス Z_e に等しければ, 操作者は対象物体の触覚を正確に得られる. 式 (5) を拡張して次式を得る.

$$\begin{aligned} F_m &= \left(\frac{-H_{12}}{H_{21} - H_{22}Z_e}Z_e + \frac{H_{11}}{H_{21} - H_{22}Z_e} \right) X_m \\ &= (P_r Z_e + P_o) X_m \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) において, P_r, P_o をそれぞれ “再現性”, “操作性” と定義する. 操作者は環境インピーダンス Z_e を感じたいので, $P_r = 1$ という条件が最も重要である. その上で $P_o = 0$ ならば環境反力以外を感じることはないが, このような理想応答は実現不可能である.

そこで, 再現性を満たすことを第一に考えて設計する. そのためには, 以下のようなハイブリッドパラメータを選択すれば良い. 外乱オブザーバを用いた加速度制御系に基づいて設計すると, 図 4 を得る. $C_p(s), C_f(s)$ はそれぞれ位置制御器, 力制御器である.

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

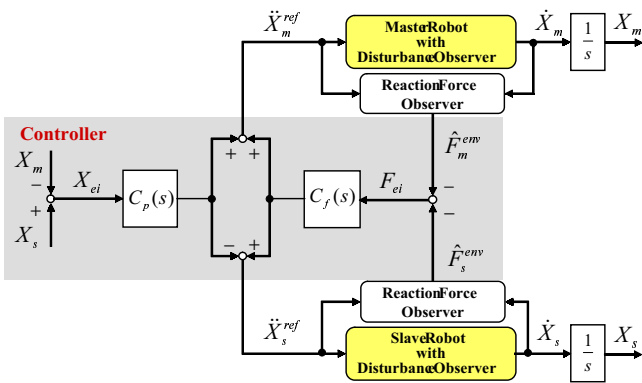


図 4: バイラテラルコントローラ (等倍)

設計した制御系について解析を行う.

まず, 制御ゲイン (位置ゲイン K_p , 力ゲイン K_f) あるいは周波数を変化させて, $P_r - P_o$ 線図を描く. 再現性 (横軸) は 1 に近いほど, 操作性 (縦軸) は 0 に近いほど良い. 図 5 のゲイン変化の結果から, 制御ゲインにより指標を操作できることがわかる. 各ゲインが最大値 $K_p = 10000.0$, $K_f = 50.0$ の時には, $(P_r, P_o) = (0.983, 3.10)$ となっており, 良好な結果である. また周波数変化の結果から, 低域と高域では完全な再現性を実現できることがわかる.

次に, 力のセンシング帯域 g_e を変化させた場合について根軌跡を描く. 力制御と同様に, センシング帯域が十分広い場合には系を安定化できる.

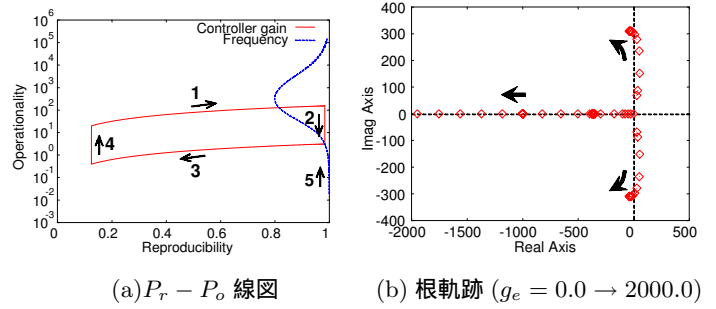


図 5: 設計した制御系の解析

5 実験

バイラテラル鉗子ロボットを用いて, 接触動作の実験を行った. 操作者がマスタのハンドルを素早く握り, スレーブで硬いアルミニウム板を約 2.0 秒間掴んだ時の実験結果を, 図 6 に示す. 硬い環境への急激な接触にもかかわらず, 安定な動作を示している. 再現性が良いため, マスタはスレーブとほぼ同様の動作をし, 互いに良好に追従している. また操作性も良いため, 操作者は軽い操作力でマスタを扱える. そのためアルミニウム板の硬い質感を, 違和感なく自然に感じ取ることができる.

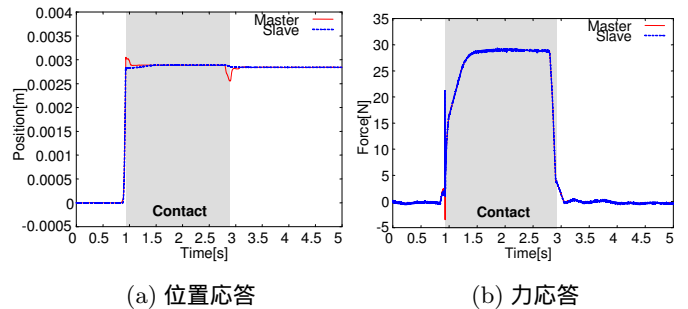


図 6: バイラテラル遠隔操作における接触動作実験

6 結論

本研究ではバイラテラル遠隔操作において, 再現性と操作性という新しい評価指標を定義し, 定量的な特性解析・評価を行った. これにより, 異なる手法の性能を統一的に評価することができるようになった. 再現性を満足するように制御系を設計し, 特性解析, シミュレーションおよび実験により, 本研究の有効性を確認した.

参考文献

- [1]K.Ohnishi, M.Shibata, T.Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol.1 no.1, pp.56-67, 1996
- [2]D.A.Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.9 no.5, pp.624-637, 1993