

非線形剛性を有する環境物体モデルの一推定法

An Estimation of Environmental Model with Non-linear Stiffness

80816053 佐藤正堯 (Masataka Sato) Supervisor 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

1 序論

近年、内視鏡を用いた低侵襲外科手術が急速に普及している。低侵襲外科手術は患者にとって負担が少ないという利点がある一方、医師にとっては限られた空間、視野の中で自由度の少ない鉗子を捜査しなければならないという難易度の高い手術である。そこで、内視鏡外科手術の技術的な問題点を解決するための方法として手術支援ロボットの開発に注目が集まっている。手術支援ロボットの多くはマスタ・スレーブ型と呼ばれる術者側と患者側のインターフェースが分離された遠隔操作型の構成をとっている。マスタ・スレーブロボットは遠隔操作だけでなく、スレーブが触れる環境物質からの反力を推定することもできる。反力推定することでロボットが環境物質の判別を行うこともできる。本研究では、2自由度鉗子を用いて物質を掴んで引っ張る動作に対応し、実験機と環境物質の初期は位置に依らない非線形剛性モデルを提案する。

2 加速度制御に基づくバイラテラル制御

2.1 外乱オブザーバ

外乱オブザーバに基づいた加速度制御系を図1に示す。図1において、 x_{ref} は加速度参照値を、 x_{res} は位置応答値を、 I_{ref} はモータの電流参照値を、 f_{load} はモータに加わる負荷力を、 f_{dis} は外乱オブザーバにより推定された外乱を表す。また、 M はロボットの質量を、 K_t は推力定数を、 g_{dis} は外乱オブザーバにおける低域通過フィルタ (LPF) のカットオフ周波数を s はラプラス演算子を表す。なお、添え字の n はノミナル値を示す。

2.2 反力推定オブザーバ

外乱オブザーバは、外乱 f_{dis} における内部干渉力、摩擦力また質量や推力定数のモデル化誤差を同定することにより、ロボットに加わる外力 f_{ext} を推定することができる。ここで、外力の推定のために反力推定オブザーバを用いる。反力推定オブザーバのブロック線図を図2に示す。 M_r は同定した質量を、 g_{reac} は反力推定オブザーバの LPF のカットオフ周波数を示している。ここでは、負荷力 f_{load} には外力 f^{ext} と摩擦力 f^{fric} 、 $D\dot{x}^{res}$ のみがあると仮定している。反力推定オブザーバにおいて外力 f^{ext} は (1) 式に示すように LPF を通して推定される。

$$\hat{f}^{ext} = \frac{g_{reac}}{s + g_{reac}} f^{ext} \quad (1)$$

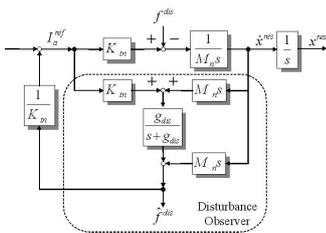


図 1: DOB

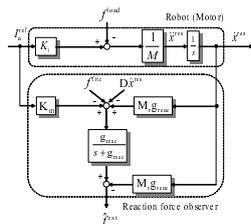


図 2: RFOB

2.3 4ch コントローラ

バイラテラル制御では、人によって操作されるマスタロボットと遠隔環境と接触するスレーブロボットの2種類のロボットを用いる。本研究で用いるバイラテラル制御は4チャンネル制御器であり、マスタロボットとスレーブロボットの位置・速度・力が情報として伝達される。4チャンネル制御器は仮想モード空間(力は和のモード、位置は差のモード)で表現することができる。和のモードの力 f_c と差のモードの位置 x_d は次式のように定義される。

$$f_c = \hat{f}_m^{ext} + \hat{f}_s^{ext} \quad (2)$$

$$x_d = x_m - x_s \quad (3)$$

(2) 式, (3) 式を加速度次元で表現すると, (4) 式で表される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

(5) 式, (6) 式を満足するために, (7) 式, (8) 式に示すように、和のモードでは力制御を行い、差のモードでは位置制御を行う。

$$\ddot{x}_c = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{x}_d \rightarrow 0 \quad (6)$$

$$\ddot{x}_c^{ref} = -2C_f (\hat{f}_m^{ext} + \hat{f}_s^{ext}) \quad (7)$$

$$\ddot{x}_d^{ref} = -2C_p(s) (x_m - x_s) \quad (8)$$

(7) 式, (8) 式より、マスタとスレーブの加速度参照値は、(9) 式, (10) 式で表される。

$$\ddot{x}_m^{ref} = C_p(s) (x_s^{res} - x_m^{res}) - C_f (\hat{f}_m^{ext} + \hat{f}_s^{ext}) \quad (9)$$

$$\ddot{x}_s^{ref} = C_p(s) (x_m^{res} - x_s^{res}) - C_f (\hat{f}_m^{ext} + \hat{f}_s^{ext}) \quad (10)$$

ここで、 $C_p(s) = K_p + K_v s$ は位置制御器であり、 $C_f = K_f$ は力制御器である。

3 2自由度鉗子ロボット

開閉方向、直動方向の2自由度を持つ鉗子ロボットの開発を行った。鉗子ロボットの制御には前述したバイラテラル制御を

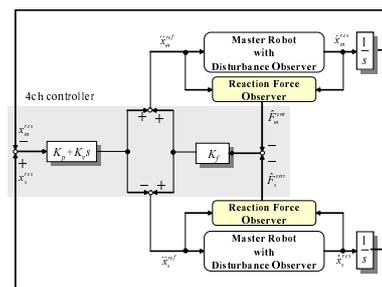
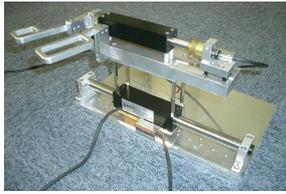
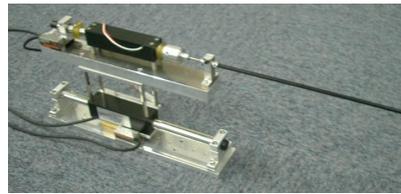


図 3: 4チャンネル制御器



(a) マスタ



(b) スレーブ

図 4: 2 自由度鉗子ロボット

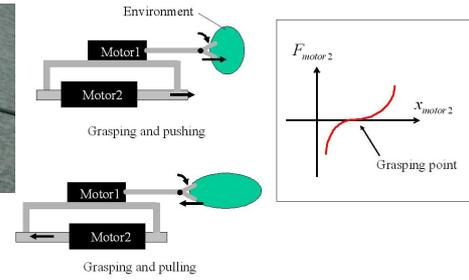


図 7: 提案モデル

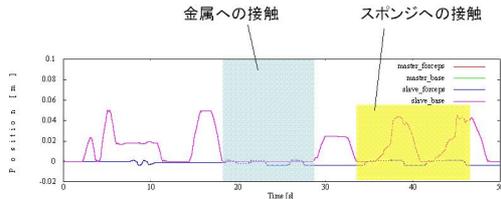


図 5: 位置応答

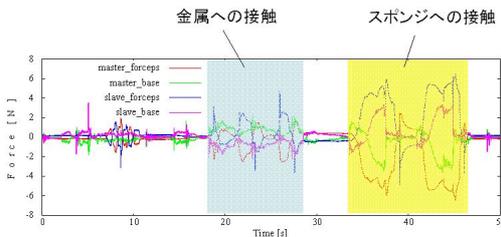
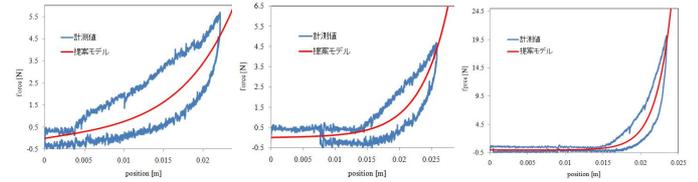


図 6: 力応答



(a) ウレタン (b) セルロース (c) ナイロン

図 8: 実験結果

の際のパラメータ $k_1 \sim k_4$ の比較を行った．結果は図 8 のようになり，パラメータ $k_1 \sim k_4$ は表のようになった．表より，各ス

表 1: 実験結果 (パラメータ)

	k_1	k_2	k_3	k_4
ウレタン	145	0.011	143	0.011
セルロース	227	0.019	225	0.019
ナイロン	489	0.017	478	0.017

用いるため，2つの自由度ともリニアモータを用いて駆動を行う．マスタロボット，スレーブロボットをそれぞれ図 4(a), 4(b) に示す．マスタロボット上部のグリップを動かすことで，スレーブロボットが鉗子閉閉と直動運動をする．

2 自由度鉗子ロボットを用いた実験を行い，位置応答と力応答を計測した．位置応答はマスタ・スレーブの各自由度で完全に一致した．また，力応答は図 6 のようになり，硬い物質（金属）と柔らかい物質（スポンジ）のどちらに触れても良好な応答が得られることが分かった．

4 非線形剛性を有する物質のモデル化

非線形剛性を有する物質のモデル化を行った．モデル化に際して，以下の 3 点を考慮した．1 つ目は，剛性は押しこむ距離とともに大きくなるため指数関数を採用した．2 つ目は，押しこみと引っ張りの 2 方向の剛性が表わせるようにした．3 つ目は，実験機と環境物質の初期位置を表わすことができるようにした．これらを考慮した図 7 のようなモデルは式 (11) で表わされる．

$$F = \exp k_1 (x - k_2) - \exp k_3 (k_4 - x) \quad (11)$$

上式において k_1 と k_3 は押しこみ方向と引っ張り方向の剛性を表わし， k_2 と k_4 は実験機から環境物質までの初期位置を表わしている．

5 実験

提案したモデルを用いて環境物質の識別ができるかを確認するため，環境物質として材質の異なるスポンジ 3 種類を用いて実験を行った．各環境物質を押しこみ，位置応答と力応答の計測値から最小二乗法によるフィッティングを行った．また，そ

ポンジの材質によって k_1 と k_3 の値が大きく違い，材質が硬くなるほど値も大きくなっている．このことから，提案モデルによる環境物質の識別は可能であると考えられる．また， k_2 と k_4 の値は各環境物質によって等しく，実験機と環境物質の距離を表わした．

6 結論

本論文では非線形剛性を有する環境物質のモデルを提案した．提案モデルは押し込み・引っ張りの 2 方向の剛性を表わすことができ，実験機と環境物質の初期位置に依らない．また，提案モデルを用いて環境物質の判別ができるかを実験によって確認した．本提案手法により，手術支援マスタ・スレーブシステムを用いた触診などに応用可能であると考えられる．

参考文献

- [1] 下野 誠通, 桂 誠一郎, 大西 公平”環境モデルに基づく実世界力覚情報再現のための双方向モーションコントロール” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 126, No. 8, pp. 1059-1068, 2006
- [2] T. Murakami, F. Yu and K. Ohnishi, ”Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 259-265(1993)
- [3] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, ”Motion Control for Advanced Mechatronics,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 56-67(1996)