

# バイラテラル制御による環境インピーダンスの動的推定

## Dynamical Estimation of Environmental Impedance by Bilateral Control

80716765 武井貴義 (Takayoshi Takei) Supervisor 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

### 1 緒論

近年、低侵襲性外科手術が注目されるようになってきている。低侵襲性外科手術は、患者の肉体的な負担が少なく、手術後の回復も早いという利点がある [1]。現在では、手術支援ロボットを用いたロボット手術に関する研究も盛んに行われ [2]、また、手術に関する教育支援や臓器の安全野についての基準参考値を知るといった観点から、インピーダンスなどの環境情報を数値データとして推定し保存することも必要になると考えられる。そこで本研究では、バイラテラル遠隔操作システムを用いた実環境における環境インピーダンスの推定法について述べる。外乱オブザーバ [3][4] を用いた 4ch バイラテラル制御器によって環境反力を推定し [5]、その力情報を元にして、スレーブの初期位置によらずに環境インピーダンスを推定する。

### 2 環境のモデル化

本論文では慣性による影響が剛性・粘性の影響に比べて非常に小さいとして、環境モデルをバネダンパ系で考える。このとき、環境からの反力  $F_s$  は式 (1) のように導かれ、環境インピーダンスはバネ係数  $k_{ave}$  と粘性係数  $d_{ave}$  として表される。 $x_s$  はスレーブの位置を表し、 $x_{ini}$  はバネの自然長を表す。

$$F_s = k_{ave}(x_s - x_{ini}) + d_{ave}\dot{x}_s \quad (1)$$

ここで、式 (1) における剛性値  $k_{ave}$  と粘性値  $d_{ave}$  は、環境表面  $x_{ini}$  から現在位置  $x_s$  までの区間における平均的な変化値から求まるインピーダンス値と考えることができる。しかし、環境への侵入深さにある依存する環境に対して動的な作業を行う際には、値が平均化されてしまうことによって微小時間内でのインピーダンスの変化が不明瞭となり、環境の変化が起こりやすい場合における指標として不十分であると考えられる。そこで以下の式 (3) のように動的に変化するインピーダンス値  $k_{dyn}$  と  $d_{dyn}$  を用いたモデルも考える。

$$F_s(t_n) - F_s(t_{n-a}) = k_{dyn}(x(t_n) - x(t_{n-a})) + d_{dyn}(\dot{x}(t_n) - \dot{x}(t_{n-a})) \quad (2)$$

$$= Z_{dyn}(x(t_n) - x(t_{n-a})) \quad (3)$$

$$Z_{dyn} = k_{dyn} + d_{dyn}s \quad (4)$$

これらの関係を図で示したものが Fig. 1 となる。ここで  $t_{n-a}$  は現時刻よりも微小時間前の時刻を表す。 $t_{n-a}$  は  $t_n$  から微小時間遡った時刻である。

### 3 環境推定のための動的推定法

式 (1) には初期位置情報  $x_{ini}$  が含まれており、インピーダンス値を推定するためには事前に  $x_{ini}$  を知る必要が出てくる。そこで  $x_{ini}$  を使わずに推定を行うために、式 (5) を用いて以下の関係式 (6)–(9) に注目する。

$$k_{ave(n)}^* = \frac{x(n) - x_{ini}}{x(n)} k_{ave(n)} \quad (5)$$

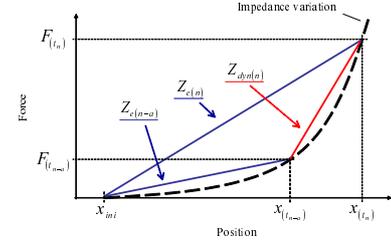


図 1: 環境インピーダンス値の動的変化

$$F(n) = k_{ave(n)}^* x(n) + d_e \dot{x}(n) \quad (6)$$

$$F(n-1) = k_{ave(n-1)}^* x(n-1) + d_e \dot{x}(n-1) \quad (7)$$

$$F(n) - F(n-1) = k_{dyn(n)}(x(n) - x(n-1)) + d_e(\dot{x}(n) - \dot{x}(n-1)) \quad (8)$$

$x(n)$  は現時刻  $t_n$  におけるスレーブの位置、すなわち  $x(t_n)$  のことであり、 $x(n-1)$  は現時刻  $t_{n-a}$  におけるスレーブの位置、すなわち  $x(t_{n-a})$  を表している。 $k_{ave}^*$  と  $k_{dyn}$  の関係を示した式が以下の式 (9)、式 (10) である。

$$F_{k(n)} = k_{ave(n)}^* x(n) \quad (9)$$

$$= k_{ave(n-1)}^* x(n-1) + k_{dyn(n)}(x(n) - x(n-1)) \quad (10)$$

式 (9) において、 $F_{k(n)}$  は時刻  $t_n$  における反力  $F_{s(n)}$  のうちの剛性項を示しており、位置に依存する反力を表す。ここで  $x(n)$  と  $x(n-1)$  の差分を一定値  $\Delta x$  として定め、 $\Delta x$  刻みでインピーダンス値を推定していく場合を考えると、式 (9)、式 (10) より以下の関係式 (11) が得られる。

$$k_{dyn(n)} = nk_{ave(n)}^* - (n-1)k_{ave(n-1)}^* \quad (11)$$

ここで、粘性係数は剛性係数に比べて微小時間による変化は小さく、また速度に依存する粘性項自体も位置に依存する剛性項に比べて微小変化による影響が小さく無視できると仮定し、 $d_{ave} = d_{dyn}$  とすると、式 (6)–(9) と式 (11) を解くことによって式 (12) と式 (13) が得られ、 $k_{dyn}$  と  $d_{dyn}$  を推定することができる。しかし、推定を行う際に  $\dot{x}(n)$  と  $\dot{x}(n-1)$  の差が 0 になる、すなわち式 (13) の分母が 0 になる場合は、これらの係数は理論的に推定できなくなってしまう。実際は、システム全体の分解能を無限に小さくすることは不可能であり、そのため分母が 0 になる場合に限らず非常に小さい値をとる場合も推定結果に誤差が出てしまう。これを防ぐため、 $\dot{x}(n)$  と  $\dot{x}(n-1)$  の差分について閾値を設定する必要がある。 $\dot{x}(n)$  と  $\dot{x}(n-1)$  の差分が設定した閾値よりも大きくなったときのみ式 (12) と式 (13) を用いて推定を行うことにし、 $\dot{x}(n)$  と  $\dot{x}(n-1)$  の差分が設定した閾値よりも小さい時は、 $\dot{x}(n)$  と  $\dot{x}(n-1)$  の差分が最後に閾値を越えた時刻における粘性値を現時刻の粘性値とし、 $k_{dyn(n)}$  を (13) を用いて推定することにする。

以上により、 $k_{dyn}$  と  $d_{dyn}$  を推定することが可能になり、スレーブや環境表面の初期位置があらかじめわからずとも、正確な値を得ることができる。

$$k_{dyn(n)} = \frac{\left(F_{(n-1)} - \frac{n}{n-1} \frac{x^{(n-1)}}{x^{(n)}} F_{(n)}\right) \dot{x}_{e(n)} + F_{e(n)} \left(\frac{n}{n-1} \frac{x^{(n-1)}}{x^{(n)}} \dot{x}_{(n)} - \dot{x}_{(n-1)}\right)}{\left(\frac{n}{n-1} \frac{x^{(n-1)}}{x^{(n)}} \dot{x}_{(n)} - \dot{x}_{(n-1)}\right) x_{e(n)} - \frac{x^{(n-1)} \dot{x}_{e(n)}}{n-1}} \quad (12)$$

$$d_{dyn} = \frac{F_{e(n)}}{\dot{x}_{e(n)}} - \frac{x_{e(n)}}{\dot{x}_{e(n)}} \frac{\left(F_{(n-1)} - \frac{n}{n-1} \frac{x^{(n-1)}}{x^{(n)}} F_{(n)}\right) \dot{x}_{e(n)} + F_{e(n)} \left(\frac{n}{n-1} \frac{x^{(n-1)}}{x^{(n)}} \dot{x}_{(n)} - \dot{x}_{(n-1)}\right)}{\left(\frac{n}{n-1} \frac{x^{(n-1)}}{x^{(n)}} \dot{x}_{(n)} - \dot{x}_{(n-1)}\right) x_{e(n)} - \frac{x^{(n-1)} \dot{x}_{e(n)}}{n-1}} \quad (13)$$

$$x_{e(n)} = x_{(n)} - x_{(n-1)} = \Delta x \quad (14)$$

$$\dot{x}_{e(n)} = \dot{x}_{(n)} - \dot{x}_{(n-1)} \quad (15)$$

$$F_{e(n)} = F_{(n)} - F_{(n-1)} \quad (16)$$

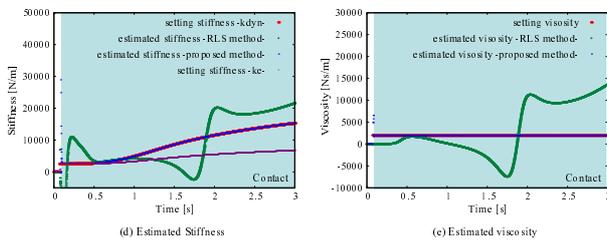


図 2: シミュレーション結果

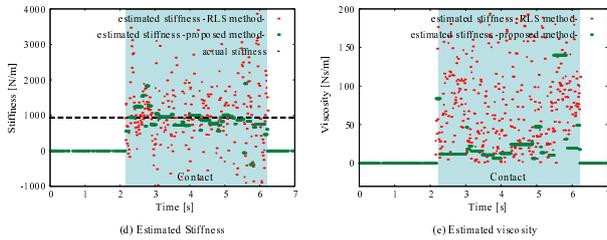


図 3: 実験結果

#### 4 シミュレーションと実験

この手法の有効性を確認するため、シミュレーションと実験を行った。シミュレーションにおいて、環境の剛性値は侵入深さに依存する 3 次関数を与え、粘性値は 1000[Ns/m] とした。シミュレーション結果が Fig. 2, 実験結果が Fig. 3 である。実験においては剛性係数が  $k_e = 980$ [N/m] の市販のばね秤を環境として用いた。

Fig. 2, Fig. 3 において、(d) は環境剛性値の設定値に加えて、固定トレースゲイン方式を用いて推定した剛性値と提案手法を用いて推定した剛性値を示している。Fig. 2 では、設定値として  $k_{dyn}$  と  $k_e$  の 2 種類があるが、 $k_{dyn}$  は式 (3) における動的剛性値を表し、 $k_e$  は式 (1) における平均的な剛性値を表している。推定値は動的剛性値である  $k_{dyn}$  に追従することが求められる。(e) は環境粘性値として設定した値、固定トレースゲイン方式を用いて推定した粘性値と提案手法を用いて推定した粘性値を示している。シミュレーションではスレーブと環境表面は予め離れた位置に設置している ( $x_{ini} = 0.01$ [m])。結果の図において網掛けがされている部分はスレーブと環境が接触していることを表している。

これらの結果より、従来より用いられている最小二乗法を用

いる場合には、今回のような入力信号では、PE 性条件から推定結果に誤差が生じてしまうことがわかる。一方で、提案手法はどちらの入力に関しても正確な推定が可能となっていることがわかる。

この結果より、提案手法を用いることで、スレーブと環境表面が予め接触して設置されていない状況化でも実環境の動的インピーダンス値を推定することができることがわかる。

#### 5 結論

本研究では、一軸リニアモータを用いたシステムを用いたバイラテラル遠隔操作において、実環境のインピーダンス値を推定するための方法を提案した。本手法は外乱オブザーバを用いた 4ch バイラテラル制御器によって環境反力を推定し、その力情報を元にして、スレーブの初期位置によらずに実環境のインピーダンス値を推定することを可能とした。またその際に、従来のように初期状態からの変位を用いて環境情報を推定するのではなく、数サンプル前の位置・力情報との変位を用いて逐次的に推定を行い、推定結果はスレーブや環境の初期位置に依存せず、初期状態でスレーブと環境が離れた状態での環境情報の推定を可能にした。実験を行うことにより、提案した制御手法の有効性を確認できた。

#### 参考文献

- [1] Michael J. Mack: "Minimally Invasive and Robotic Surgery," *The Journal of the American Medical Association*, Vol. 285, No. 5, February 7th, 2001.
- [2] G. H. Ballantyne: "Robotic Surgery: A Current Perspective," *Surgical Endoscopy*, vol. 16, No. 10, pp. 1389–1402, 2002.
- [3] K. Ohnishi, N. Matsui and Y. Hori: "Estimation, Identification, and Sensorless Control in Motion Control System," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 8, pp. 1253–1265, August, 1994.
- [4] K. Ohnishi, M. Shibata and T. Murakami: "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 56–67, March, 1996.
- [5] T. Murakami, F. Yu and K. Ohnishi: "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-freedom Manipulator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, pp. 259–265, 1993.