

力感覚を伝達できる手術用鉗子システムの制御系設計と評価

Control systems design and evaluation for robotic surgical forceps with force sensation feedback

○ 池西群之（金沢工業大学） 澤田隆之（金沢工業大学）

藤木信彰（金沢工業大学） 高嶋徹（金沢工業大学） 鈴木亮一（金沢工業大学）

Tomoyuki IKENISHI, Kanazawa Institute of Technology
Takayuki SAWADA, Kanazawa Institute of Technology
Nobuaki FUJIKI, Kanazawa Institute of Technology
Toru TAKASHIMA, Kanazawa Institute of Technology
Ryoichi SUZUKI, Kanazawa Institute of Technology

Abstract: A control systems design method for robotic surgical forceps with force sensation feedback has been proposed in this paper. The proposed surgical forceps system has been constructed by master-slave systems with different mechanism without force sensors or pressure sensors. The surgical forceps system has been evaluated by several experiments on force detection and tracking control. The experimental results show that the proposed design method is able to detect contact force on the slave system and is also able to feedback force sensation on the master system.

Key Words: Internal model control, master-slave system, force control

1. 緒言

手術用ロボットの需要は増え，更なる高度化が求められている．手術用ロボット da Vinci は操作性に優れたシステムであり，マスタとスレーブが同機構型で構成され制御される．しかしながら，力覚のフィードバックを行う機能を有していないことから，鉗子先端にかかる力を術者が感じることはできない．

力覚を使用者に伝達する研究はいくつか行われているが⁽¹⁾⁽²⁾，鉗子先端部に力センサや圧力センサを取り付けることは困難であること，また鉗子先端部の可動域が少ないことから，鉗子先端にかかる力を推定することは難しい問題とされている．

そこで，本論文では，力センサや圧力センサを用いずに鉗子先端部の力感覚を伝達できる異機構型鉗子システムの制御法を提案する．また，実際に異なる種類の対象物について，スレーブ側で感じた力覚をマスタ側に伝達できることを実験により確認する．

2. 手術用鉗子システム

本研究で製作した手術用鉗子システムの外観を Fig. 1 に示す．図の上部は術者が操作するマスタ，下部は手術を実施するスレーブである．マスタシステムのアクチュエータはシャフトモータであるのに対して，スレーブのアクチュエータは DC モータからなる異機構型のシステムとなっている．

Fig. 2 にシステム構成図を示す．術者の操作量をリニアエンコーダで読み取り，スレーブ側の鉗子の開閉角度を決定する．また，スレーブ側で感じる力を力センサを用いずに，提案する制御系設計法で推定し，その力覚をマスタ側に伝達できる構成となっている．

3. 内部モデル制御による力の推定とマスタスレーブシステムへの応用

内部モデル制御と状態フィードバックを併用した制御系は，目標追従特性，外乱除去特性，外乱推定特性を持つことが知られている⁽³⁾．この外乱推定特性をマスタスレーブ型の力制御へ応用するブロック線図を Fig. 3 に示す．

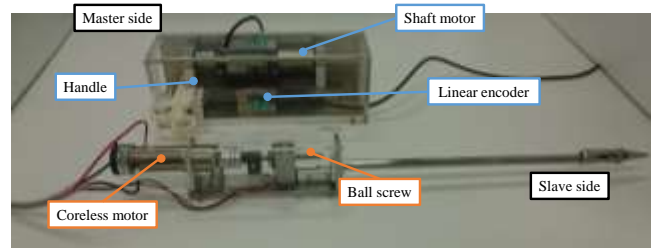


Fig. 1 Surgical forceps system

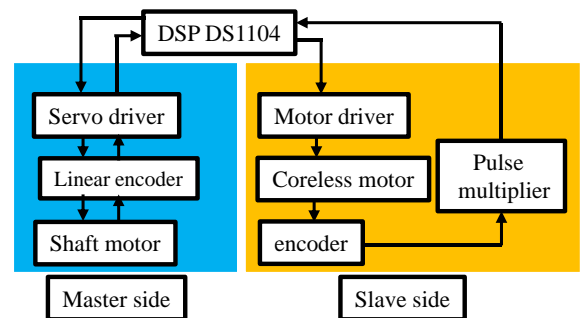


Fig. 2 System configuration

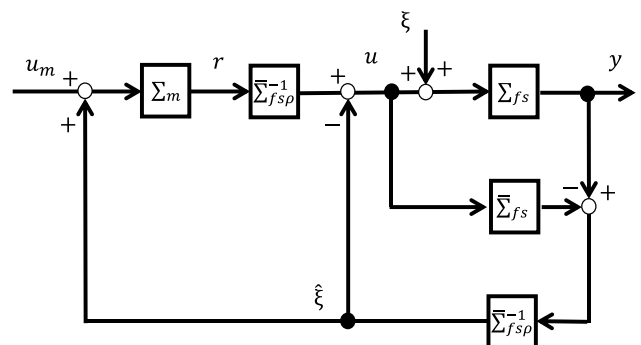


Fig. 3 Block diagram of proposed controller

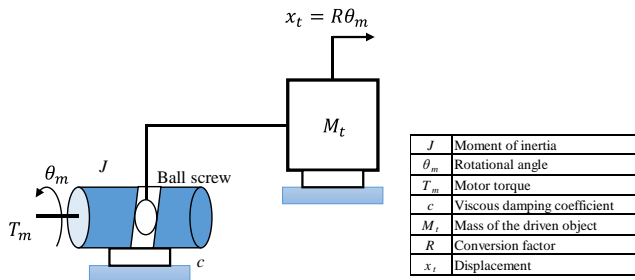


Fig. 4 Slave model

術者がマスタ側のハンドを開閉させると，マスタのモデル Σ_m を通して開閉量に応じた目標入力 r が出力される．スレーブシステム Σ_{fs} の入力端に加わる外乱を ξ として推定できる機能を有しており，システム Σ_{fs} と数式モデル $\bar{\Sigma}_{fs}$ との差を近似逆システム $\bar{\Sigma}_{fs}^{-1}$ を通して， ξ が得られる．このことは，鉗子先端部にかかる力を接触力(外乱)として，力センサや圧力センサを用いることなく検知できることを意味する．この検知された接触力 ξ を術者に伝達することで，術者への力覚フィードバックが可能となる．

スレーブシステムの運動方程式は次のとおりである．

$$J\ddot{\theta}_m + c\dot{\theta}_m = T_m \quad (1)$$

ただし， J はボールねじと DC モータの慣性モーメントの総和， c はねじ軸とモータ軸にかかる粘性減衰係数の総和とする．ここで $T_m = u$ ， $x = (\theta_m \quad \dot{\theta}_m)^T$ として(1)式を状態空間表現すると

$$\bar{\Sigma}_s : \begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{c}{J} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{pmatrix} u \\ y = (1 \quad 0)x \end{cases} \quad (2)$$

を得る．(2)式に $u = F^T x + v$ ， $F^T = (f_1 \quad f_2)$ として状態フィードバックを施すと，

$$\bar{\Sigma}_{fs} : \begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{f_1}{J} & \frac{f_2 - c}{J} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{pmatrix} v \\ y = (1 \quad 0)x \end{cases} \quad (3)$$

となる．(3)式の伝達関数から，逆システムの伝達関数は次のようになり，

$$\bar{\Sigma}_{fs}^{-1}(s) = Js^2 - (f_2 - c)s - f_1 \quad (4)$$

式(4)をプロパーにするため， $(\rho s + 1)^2$ を掛けると

$$\bar{\Sigma}_{fs\rho}^{-1}(s) = \frac{\left[\left\{ \frac{(c - f_2)}{\rho^2} - \frac{2J}{\rho^3} \right\} s - \left(\frac{f_1}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^4} \right) \right]}{s^2 + \frac{2}{\rho}s + \frac{1}{\rho^2}} + \frac{1}{\rho^2} \quad (5)$$

を得る．ここで，近似逆システムの入力を γ ，出力を w ，状態を z として近似逆システム $\bar{\Sigma}_{fs\rho}^{-1}$ を状態空間表現すると

$$\bar{\Sigma}_{fs\rho}^{-1} : \begin{cases} \dot{z} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\rho^2} & -\frac{2}{\rho} \end{pmatrix} z + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \gamma \\ w = -\left(\frac{f_1}{\rho^2} + \frac{J}{\rho^4} \right) \frac{(c - f_2)}{\rho^2} - \frac{2J}{\rho^3} z + \frac{J}{\rho^2} \gamma \end{cases} \quad (6)$$

を得る．以上を用いて，Fig. 3 に示す制御系を構築する．なお，制御パラメータは $\rho = 0.007$ ，慣性モーメントは $J = 1.003 \times 10^{-3} [\text{kgm}^2]$ ，粘性減衰係数は $c = 0.01 [\text{Ns/m}]$ である．

4. 力覚フィードバックの評価実験結果

樹脂，スポンジ，ストローを把持対象物として，スレーブ側の鉗子先端部で把持した．この時，把持対象物からの反力を推定する．また，制御対象物の実際の反力はデジタルフォースゲージを使用して測定した結果，樹脂 6.49[N]，スポンジ 3.8[N]，ストロー 2.35[N] であった．Fig. 5 に実験結果を示す．実測値との誤差はあるが，樹脂からストローまでの異なる対象物を把持した時の反力を推定でき，術者に力覚の違いをフィードバックできることがわかる．

次に，Fig. 6 に目標追従特性の実験結果を示す．マスタとスレーブの間の可動比が 10:1 であるため，スレーブ側の出力を 10 倍して図に示す．Fig. 6 より，マスタ側の操作量をスレーブ側に伝達できていることが読み取れる．

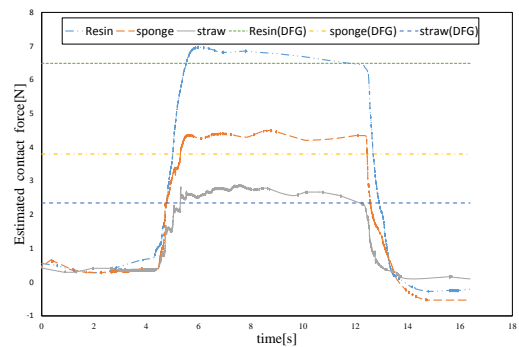


Fig. 5 Estimation of contact force

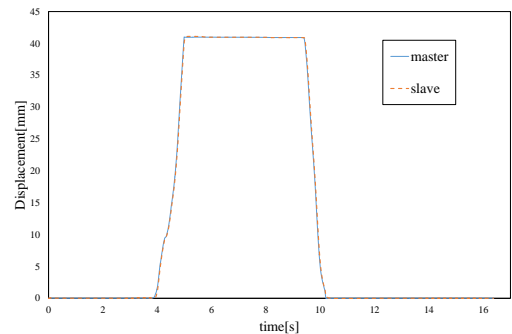


Fig. 6 Tracking property

5. 結言

本論文では，圧力センサや力センサを用いずに鉗子先端部の力感覚を伝達できる異機構型鉗子システムの制御法を提案した．内部モデル制御とフィードバックを併用した制御系設計方法が優れた目標追従特性と力覚伝達性能を有し，鉗子先端部の力を術者に伝達できることを評価実験により確認した．

参考文献

- 光石衛，医療用ロボティクス，日本脈管学会 Online publication, vol. 46, pp. 759-767, 2006
- 藪元弘一，中島和夫，森川靖男，北島政樹，手術支援ロボットのための力検出器を用いないバイラテラル制御 日本機械学会論文集(C編)，73巻727号，pp. 778-783, 2007
- 小林伸明，鈴木亮一，長谷川智士，土肥雅晴，内部モデル制御と最適レギュレータの極限的性質を用いた外乱推定とその実験検証，日本機械学会論文集(C編)，70巻695号，pp. 1984-1991, 2004