力帰還型マイクロマニピュレータの安定性*

(第1報, 操縦・非把握状態に対応可能なモデルの提案)

菊池 誠^{*1}, 白石 昌武^{*2}

Stability of Force Feedback Micromanipulator (1st Report, Model Capable of Controlling both Grasping and Non-Grasping Conditions)

Makoto KIKUCHI^{*3} and Masatake SHIRAISHI

^{*3} Ibaraki National College of Tech.,
866 Nakane, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-8508 Japan

This paper describes the new design method for force feedback micromanipulator capable of controlling both grasping and non-grasping conditions. Micromanipulator is now actively applied in the medical field such as a brain surgery operation, a cancer test, etc. However, the problem of this application is the stability of the system itself. Thus the proposed method mainly focuses on the stability of the bilateral servo system used in the design of micromanipulator. For this aim, a mathematical manipulator model is proposed which can apply both in grasping and non-grasping conditions. The displacement transmission ratio and the rigidity transmission performance, which are key factors in this proposal, are actually measured in the hardware design with one degree freedom. Further a simulator is also proposed to analyze the manipulator operation, in particular, the abnormal self-exciting oscillation in the operation. As the result, the performance anticipated by the design is obtained by the machine and the simulator.

Key Words: Micromanipulator, Bilateral Servo System, Simulator, Displacement Transmission Ratio, Rigidity Transmission Performance

1. 結 言

力帰還操縦型マイクロマニピュレータは微細作業を容易にすることから, 外科手術や癌予防医療の分野で注目されている技術である。従来このマニピュレータにはバイラテラルサーボ系が採用されている。マニピュレータが物体を把握していない状態では, このシステムは操縦者の指の動きを縮小してマニピュレータの指にその動きを伝える。マニピュレータが物体を把握している状態では, 把握力を拡大して操縦者の指に伝える。たとえば指の変位を10分の1に縮小して力を10倍に拡大すると, 操縦者は把握物の実際の軟らかさ(以下, コンプライアンスと呼ぶ)を指で感じつつ大きさが10分の1の微細領域で作業ができる。これを利用することで, 手術が不可能であった微細部分の処置が可能となる。現在このようなシステムは実用化され, 作業を支援する方法⁽¹⁾⁻⁽³⁾として医療分野の一部に利用されている。しかし従来からバイラテラルサーボ系には安定性の点でいくつかの問題が残されている。

中でも物体把握時に把握物のコンプライアンスの違いにより, スレーブ側の減衰率が低下するという欠点に対してはその根本的解決が困難とされている。この場合サーボ系に異常振動をもたらすため, その安定性についての対策が検討されてきた。過去の研究例を見ると, スレーブ側とマスタ側の指制御系に力信号の変化率を負帰還する機能を加え, スレーブ側指制御系が物体を把握した時点でサーボ系の減衰率の低下を抑えている。それによって把握物のコンプライアンスの変化に対し安定性を維持し得る制御系を構成している⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。しかしながら, 本手法のキープポイントでもある操縦者の筋骨格系の特性とバイラテラルサーボ系の特性に起因する異常振動発生の問題は, 現在も未解決のままである。マニピュレータのスレーブ指の位置は, マスタ操縦用グリップから操縦者によって与えられる。その結果としての反力は, マスタ操縦用グリップを介して操縦者の指に伝達される。このような方式にあっては, 必然的に操縦者の指のコンプライアンスがバイラテラルサーボ系の安定性に影響を与える。操縦者の指の剛性が十分高ければ, 操縦者の指の押し戻され量は少なく, したがって異常振動は発生しにくい。しかし指の剛性が低くなると指が反力によって押し戻され, 同時に指の位置が変化するため, その変化がスレーブ側に

* 原稿受付 2001年12月28日。

^{*1} 正員, 茨城工業高等専門学校(〒312-8508 ひたちなか市市根866)。^{*2} 正員, 茨城大学工学部(〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。

E-mail: mkikuchi@ss.ibaraki-ct.ac.jp

伝達される。その結果バイラテラルサーボ系と把握物および操縦者の間に閉ループが形成され、ある条件下で指に異常振動が発生する。この原因は操縦者の筋骨格系の特性に依存するとして、従来から解決が非常に難しい問題とされている。

このような背景を踏まえ本研究では、操縦者の筋骨格系の特性に起因する問題を基本的な考察するため、物体非把握時の挙動を表現し得る新しい制御系モデルとその設計法を提案し、かつ把握実験によってモデルの妥当性を確認する。さらに操縦者が変わると、筋骨格系内の神経系の帰還ゲインや筋肉の特性などに代表される複数のパラメータが変化するという従来の手法を改善するために、考察対象となるシステム全体を計算機内に数学モデルとして構築する方法を提案する。

2. バイラテラルサーボ系の構築

操縦者の指にマスタ操縦用グリッパが装着されている場合、マニピュレータの状態は「操縦・非把握」と「操縦・把握」の2つに分類することができる。操縦者の筋骨格系の特性に起因する問題を考察するためには、少なくともこの2つの状態に対してマニピュレータを安定化する必要がある。それを前提に筋骨格系のモデルを推測することで、その特性に起因する問題を考察できると考えた。ここではその2つの状態を安定化する各パラメータの設計法と自作装置を用いた検証実験について述べる。

2.1 バイラテラルサーボ系のモデル

図1に本研究で採用したバイラテラルサーボ系全体のブロック線図を示す。ここで X_m : 操縦者がマスタ指に与える変位, X_g : マスタ系からスレーブ系への変位信号, X_s : スレーブ指の変位, F_c : 把握物からの反力, F_g : スレーブ系からマスタ系への力逆送信号, F_m : オペレータに戻される反力である。もしマスタ・スレーブ系が把握物のコンプライアンスをオペレータに正確に伝えるように設計されていれば、オペレータは把握物の硬さをバイラテラルサーボ系を介して間接的に手で感じることができる。

図2にマスタ系のブロック線図を、また、図3にスレーブ系のブロック線図を示す。ここで、 C_m : マスタ力センサのコンプライアンス, C_s : スレーブ力セ

Fig.1 Overall view of gripper system

ンサのコンプライアンス, μ_s : スレーブ力センサの粘性係数, m_s : スレーブ指の質量, F_s : スレーブ力センサに働く力, K_{mf} , K_{ss} : カフィードバックゲイン, K_{mp} : マスタからスレーブへの力伝達ゲイン, K_{sf} : スレーブからマスタへの力伝達ゲイン, K_{ms} : マスタからスレーブへの力伝達ゲイン, T_m , T_s : マスタおよびスレーブの進み要素の時定数である。また $G_m(s)$, $G_s(s)$ は、それぞれ二次遅れ要素として作られたマスタグリッパおよびスレーブ指の位置制御系の伝達関数である。

図2においてオペレータがマスタ側の指を動かすと、マスタの二次遅れ要素の出力と X_m との間にひずみが生じる。このひずみ量をコンプライアンス C_m のばねに貼り付けたひずみゲージで電気信号に変換して F_m を測定する。同様の方法により F_s も測定する。

図3では「操縦・非把握」状態を表現するために、従来のモデルにスレーブ力センサの動特性を考慮した部分 A を付加した。力センサは、図4に示すようにスレーブ指先端部分と根元部分を2枚の平行板ばねで連結した、摩擦と空気抵抗による微小な粘性抵抗をもつバネダンパ構造である。この構造の伝達関数をブロック線図で表現したのが図3の A である。操縦状態でスレーブ指が非把握の場合は、スレーブ指根元部分が動くことで先端部分が振動し、その振動が力の信号として帰還されることになる。この状態を表現するためには A の部分が不可欠である。さらにこの系の付加によって、把握物を変位入力-力出力系として取り扱うことも可能となる。

2.2 バイラテラルサーボ系の設計

設計仕様およびハードウェアの物理的制限を考慮し、想定される最も硬い把握物のばね定数 K_{max} , 非把握時のマスタ側でのばね定数 E , 変位伝達比 α , 力逆送比 β , 把握時のスレーブからの力の最大値 $F_{s,max}$,

Fig.2 Block diagram of master system

Fig.3 Block diagram of slave system

Fig. 4 Master gripper and Slave hand

スレーブへの変位の最大値 $X_{g\max}$ 、スレーブ変位負帰還ゲイン K_{sp} 、マスタ変位負帰還ゲイン K_{md} の各設計パラメータが予め与えられると仮定する。図 2、図 3 からマスタの変位と力、およびスレーブの変位と力の関係を求めると式(1)を得る。

$$\begin{bmatrix} X_m \\ F_m \end{bmatrix} = M_m M_{sf} \begin{bmatrix} X_s \\ F_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_m = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} C_m + G_m(s)K_{mf}(1+T_m s) & (C_m K_{mp} - K_{ms})G_m(s) \\ 1 & G_m(s)K_{mp} \end{bmatrix},$$

ここで、 $D = K_{mp}K_{mf}(1+T_m s)G_m(s) + K_{ms}$ 、

$$M_{sf} = \begin{bmatrix} q_{11}(s) & q_{12}(s) \\ K_{sf}P(s)m_s s^2 & K_{sf}P(s) \end{bmatrix},$$

$$q_{11}(s) = G_s(s)^{-1} + G_s(s)^{-1}P(s)m_s C_s s^2 + K_{ss}(1+T_s s)m_s s^2 P(s),$$

$$q_{12}(s) = G_s(s)^{-1}C_s P(s) + K_{ss}(1+T_s s)P(s),$$

$$P(s) = (\mu_s C_s s + 1)^{-1},$$

$$G_m(s) = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2} \cdot \frac{1}{K_{md}}, \quad G_s(s) = \frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \cdot \frac{1}{K_{sp}},$$

ω_m 、 ζ_m はマスタの二次遅れ要素の固有角周波数および減衰係数、また ω_s 、 ζ_s はスレーブの二次遅れ要素の固有角周波数および減衰係数である。

まず C_m 、 C_s を $K_{\max}$ の逆数の約 10 分の 1 程度に選ぶと、式(1)の静的な関係から K_{mp} 、 K_{mf} 、 K_{ms} 、 K_{sf} 、 K_{ss} は式(2)～式(6)と求まる。なお静的とは時間 $\rightarrow \infty$ 、つまりラプラス変換の s を 0 に限りなく近づけた状態を意味する。

$$K_{mp} = \frac{\alpha K_{sp} - E K_{ms}}{1 - E C_m} \quad (2)$$

$$K_{mf} = \frac{K_{md}(1 - E C_m)}{E} \quad (3)$$

$$K_{ms} = \frac{(1 - E C_m)K_m(\infty)K_{ss}}{\beta(K_m(\infty) - E)} + \frac{[\{\alpha\beta C_m + C_s(1 - E C_m)\}K_m(\infty) - \alpha\beta]K_{sp}}{\beta(K_m(\infty) - E)} \quad (4)$$

$$K_{sf} = \frac{K_{md}(1 - E C_m)}{E(\alpha K_{sp} - E K_{ms})} \{\alpha\beta K_{sp} - E(K_{sp}C_s + K_{ss})\} \quad (5)$$

$$K_{ss} = \frac{X_{g\max} - K_{sp}C_s F_{s\max}}{F_{s\max}} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha = X_s/X_m$ 、 $\beta = F_m/F_s$ で、 $K_m(\infty)$ は剛体把握時の等価ばね定数、 $X_{g\max}$ はハードウェアより制約される値、 $F_{s\max}$ はスレーブ把握力の最大値である。また、ばね定数 K の弾性体を把握した場合のマスタ側からみた剛性 $K_m = F_m/X_m$ は式(7)となる。

$$K_m(K) = \frac{\alpha\beta K}{1 + \alpha\beta \frac{K}{K_m(\infty)}} + \frac{E}{1 + \alpha\beta \frac{K}{K_m(\infty)}} \quad (7)$$

式(7)において、 $E=0$ 、 $\alpha\beta=1$ 、 $K_m(\infty) \gg K$ とおくと $K_m(K) \equiv K$ が成り立つことから、把握物のコンプライアンスが操縦者へ等価的に伝達されることがわかる。

次に ζ_s を決定する。まずスレーブ系の伝達関数 $G_{ss}(s)$ は、把握物のコンプライアンスを C_c とおくことで式(8)に示す 4 次系となる。

$$G_{ss}(s) = \frac{F_g}{X_g} = \frac{\omega_s^2 K_{sf}(m_s C_c s^2 + 1)}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (8)$$

ここで、 $a_0 = C_c C_s K_{sp} m_s$ 、

$$a_1 = C_c K_{ss} m_s T_s \omega_s^2 + 2C_c C_s K_{sp} m_s \zeta_s \omega_s + C_c C_s K_{sp} \mu_s,$$

$$a_2 = C_c m_s (K_{ss} + K_{sp} C_s) \omega_s^2 + 2C_c C_s K_{sp} \mu_s \zeta_s \omega_s + (C_c + C_s) K_{sp},$$

$$a_3 = (C_c C_s K_{sp} \mu_s + K_{ss} T_s) \omega_s^2 + 2(C_c + C_s) K_{sp} \zeta_s \omega_s,$$

$$a_4 = \{(C_c + C_s) K_{sp} + K_{ss}\} \omega_s^2$$

なおマイクロマニピュレータ技術では、スレーブ部分が十分小さい場合、近似的にスレーブ力センサの粘性係数 $\mu_s \rightarrow 0$ 、スレーブ指の質量 $m_s \rightarrow 0$ とおくことができる。したがってこの条件下で $G_{ss}(s)$ は式(9)と近似できる。

$$G_{ss}(s) = \frac{F_g}{X_g} = \frac{\omega_{ss}^2}{s^2 + 2\zeta_{ss} \omega_{ss} s + \omega_{ss}^2} \cdot \frac{1}{K_{sp}} \quad (9)$$

ここで、 $K_{sp} = K_{sp}(C_s + C_c)E_{rs}$ 、 $E_{rs} = 1 + \frac{K_{ss}}{K_{sp}(C_s + C_c)}$ 、

$$\omega_{ss} = \omega_s \sqrt{E_{rs}}, \quad \zeta_{ss} = \frac{\zeta_s}{\sqrt{E_{rs}}} + \frac{(E_{rs} - 1)\omega_s T_s}{2\sqrt{E_{rs}}}$$

ω_{ss} 、 ζ_{ss} はスレーブ系の二次遅れ要素の固有角周波数および減衰係数である。スレーブ系では、「把握」と「非把握」の両方の状態で安定性を確保する必要がある。「非把握」では把握物のコンプライアンス C_c が無限大となるので、 $\omega_{ss} = \omega_s$ および $\zeta_{ss} = \zeta_s$ となる。すなわち「非把握」の状態では、スレーブの二次遅れ要素の減衰係数 ζ_s がそのままスレーブ系の減衰係数 ζ_{ss} となる。そこで、スレーブ系で共振が発生しないための限界の減衰率約 0.707 (M_p 値=1 となる減衰率) より多少余裕を持たせて、 $\zeta_{ss} = 0.8 \sim 0.9$ と設定できる。

次に「把握」の状態から T_s を決定する。式(8)より ζ_{ss} の値は把握物のコンプライアンス C_c によって変化する。把握物のばね定数 K (ただし $K = 1/C_c$) を変化さ

せると, ζ_s の値はある K の値で式(10)に示す最小値 $\zeta_{s\min}$ をとる.

$$\zeta_{s\min} = \sqrt{\omega_s T_s (2\zeta_s - \omega_s T_s)}, \quad (T_s \neq 0) \quad (10)$$

この最小値 $\zeta_{s\min}$ を十分大きく (ζ_s の場合と同じ理由で約 0.8 以上) とれば, スレーブはすべての K に対して安定となる. 減衰率の最小限界値を $\zeta_{\min}$ とおくと, $\zeta_{s\min} \geq \zeta_{\min}$ なる条件より T_s の範囲は式(11)によって選ぶことができる.

$$\frac{\zeta_s}{\omega_s} - \frac{1}{\omega_s} \sqrt{\zeta_s^2 - \zeta_{\min}^2} \leq T_s < \frac{\zeta_s}{\omega_s} \quad (11)$$

次に ζ_s を決定する. 無操作の場合, $F_m = 0$ および $F_c = 0$ であるから, マスタの二次遅れ要素を安定にすればシステム全体は安定になる. その場合 ζ_s の値は ζ_s の場合と同じ理由で 0.8~0.9 の範囲に設定できる. 次に T_m は最後に残ったパラメータであるから, 式(8)または式(9)で示される系に対して極配置法や根軌跡法などを用いても求めることができる. ここでは, 「操縦・把握」状態でバイラテラルサーボ系を安定に保つことを前提に, その系に対してパラメータ平面法を適用することで T_m を決定する.

2.3 バイラテラルサーボ系の製作法

上述の設計方法に従いバイラテラルサーボ系の製作法を示す. まず設計の基本となるパラメータを $K_{md} = 204.0$ [v/m], $C_m = 88.0$ [μ m/N], $K_{sp} = 213.6$ [v/m], $C_s = 88.0$ [μ m/N], $X_{g\max} = 11$ [v], $F_{s\max} = 3.43$ [N], $E = 58.8$ [N/m], $K_{g\max} = 1960$ [N/m], $\omega_m = 25.7$ [rad/s], $\omega_s = 17.9$ [rad/s], $\zeta_m = 0.85$, $\zeta_s = 0.9$, $\zeta_{s\min} = 0.71$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 2$, $K_m(\infty) = 1960$ [N/m] と設定する. また「操縦・把握」状態のバイラテラルサーボ系全体の減衰係数を $\zeta = 0.8$ とする. 以上の基本となる値より, 設計に必要なパラメータは, $K_{mj} = 3.45$ [v/N], $K_{ss} = 3.19$ [v/N], $K_{mp} = 12.9$ [v/m], $K_{sf} = 6.73$ [v/N], $K_{ms} = 1.598$ [v/N], $T_m = 0.0042$ [s], $T_s = 0.0214$ [s] と求まる. これらのパラメータを用い, 図4に示す1自由度のバイラテラルサーボ系を製作する. なお上述のパラメータを用い式(7)の剛性を計算すると, $K_m \approx 439$ [N/m] となる.

Fig.5 Displacement transfer ratio of the system

Fig.6 Rigidity of master system

Fig.7 Rigidity of slave system

2.4 非把握時の動作実験

物体を把握する場合, まず図4に示す非把握状態からスタートする. その非把握時における変位伝達特性の測定結果を図5に示す. 指の変位 X_m はマスタ二次遅れ要素内のポテンシオメータで, また把握力 F_m はマスタ操作用グリッパに貼り付けたひずみゲージで測定される. X_s , F_s も同様に測定する. 図5によると変位伝達特性は傾き約 0.491, 切片約 -0.031 なる直線で近似できる. この近似直線から, マスタ変位が約 10[mm] になるとスレーブ変位は約 5[mm] になることがわかる. このことは, 非把握時において変位伝達比 α が約 0.5 に保たれることを意味しており, これは設計の目標値と一致する.

2.5 把握時の動作実験

マスタ指が 10[mm] 程度内側に動くと, スレーブ指は約 5[mm] 内側に動く. このときスレーブ指は把握物に接触するので, これ以降が把握状態となる. 図6は, 硬さ 490[N/m] の物体を把握した場合のマスタ変位 X_m と力 F_m の関係を測定した結果である. この図によると, マスタ変位の増加に伴い力も比例して増加することがわかる. 最小自乗法による近似直線の傾きから, マスタ側からみた把握物の硬さは約 420[N/m] と求まる. この結果は, 式(7)より求めた理論値 439[N/m] とおおよそ一致する. 図7はこの場合のスレーブ変位 X_s と力 F_s を示したものである. この図によると, スレーブ側で検出できる硬さは把握物体の硬さとほぼ等しい 499[N/m] となる. 図5, 図6および図7の結果から, 製作したバイラテラルサーボ系は非把握時には位置制御系として, また把握時にはコンプライアンス制御系として動作することが確かめられ, ほぼ想定した性能が得られた.

3. シミュレータの構築

バイラテラルサーボ系が, 操縦者の筋骨格系の特性により安定性にどのような影響を与えるかをより効率よく調べるため, 操縦者—バイラテラルサーボ系—把握物からなる等価システムを計算機内に構築する. プ

ログラム言語として Matlab と Simulink (Mathworks 社製) を使用して図 1 の系をプログラム化した。マスタ部分には図 2 を、またスレーブ部分には $\mu_s = 15.1 [\text{Ns/m}]$, $m_s = 0.01 [\text{kg}]$ として図 3 を用いた。生体分野での把握物の数学モデルとしては、2 個のばねと 1 個のダンパからなる 3 要素粘弾性モデルを想定するのが一般的である。しかし本研究では、振動問題における安定性をより厳しい条件で与える、単一ばねによる弾性モデルを採用した。また筋骨格系モデルには、大きな反力が帰還された場合でも指が押し戻されない程度の剛性の大きさを持つ、PI 補償を施した二次系を仮定した。そして PI 補償器の値を変えることで、極配置が異なる 2 種類の操縦者モデルを作成し、その極配置の違いが系全体にどのような影響を与えるかを考察した。

3.1 操縦者の筋骨格系モデル

図 8 に筋骨格系のブロック線図を示す。図中一点鎖線の上部分が PI 補償、下部が仮定した二次系モデルで、神経系の階層の高い部分からの目標を入力 X_{mb} 、出力を X_m 、外乱を F_m とした。 K_0 , K_1 , K_2 および K_3 は、操縦者内部の神経系および筋骨格系の機能を表わすゲインであり、 K_p および K_i は PI 補償器の比例及び積分ゲインを示す。まず図 8 の系で、外乱 F_m による影響を抑制する 2 種類の PI 補償を極配置法により設計した。極配置は、系 1 として $(-9.3804 + 11.5816i)$, $(-9.3804 - 11.5816i)$, -1.4594 , 系 2 として $(-3.2204 + 3.6269i)$, $(-3.2204 - 3.6269i)$, -13.7793 を設定した。系 2 は系 1 に比べて極が実軸の近くにあり、系 1 よりも振動的な挙動を示す系である。また系 1 を与える各機能のゲインは、 $K_0 = 1 [\text{kg}]$, $K_1 = 389 [\text{s}]$, $K_2 = 12$, $K_3 = 0.05198 [\text{N/m}]$, $K_p = 400$ および $K_i = 519.7 [1/\text{s}]$ である。系 2 を与える各ゲインは系 1 と比較して $K_p = 200$ だけが異なり、他の $K_0 \sim K_3$ および K_i は系 1 と同じである。

3.2 系全体への影響

筋骨格系の特性が上記の系 1 および系 2 のように異なった場合、2.5 節で示した把握動作時に、操縦者—バイラテラルサーボ系—把握物からなる系がどのように変化するかを、構築したシミュレータで調べた。その結果を剛性で示したのが図 9 である。これによると、把握前では $K_m \approx 58 [\text{N/m}]$ 、スレーブ側での剛性 $K_s = F_s/X_s$ は $K_s = 0 [\text{N/m}]$ 、把握後には $K_m \approx 470 [\text{N/m}]$, $K_s = 490 [\text{N/m}]$ になっており、おおよそ設計値、理論値および実験値と一致する。また比例ゲイン K_p の違いで系全体の過渡応答は立上り時に大きく変化することがわかる。このことは操縦者の特性の違いが系全体の安定性に影響を与えることを示唆している。

Fig.8 Block diagram of skeletal-muscular system

Fig.9 Transient response of the rigidity by different K_p

4. 結 言

本報告では、変位縮小力拡大型バイラテラルサーボ系の安定性を向上させる研究の一環として、非把握時と把握時を考慮した数学モデルとそれに基づく一設計法を提案した。そしてこの設計法が妥当であることを実機で確認した。さらにその数学モデルに従うシミュレータが実機の挙動を忠実に表現できることを示した。加えて、提案したシミュレータを利用することで、操縦者の特性が制御系全体の安定性に影響を与えることを確認した。今後は本シミュレータを利用して、操縦型マイクロマニピュレータの異常振動を防止するための方策を、操縦者の筋骨格系の特性を考慮しながら追求する必要がある。

文 献

- (1) M. Shirashi and H. Watanabe: Pneumatic Assist Device for Gait Restoration, Trans. ASME, J. Dyn. Syst., Meas., Cont., 118, 1 (1996) 9.
- (2) 菊池 誠, 白石昌武: ヒューマンダイナミクスの特性写像とその制御性の評価 (第1報) —立位姿勢制御系の同定とその極配置—, 精密工学会誌, 65, 6 (1999) 840.
- (3) M. Shirashi, S. Sugano and S. Aoshima: High Accuracy Positioning in SCARA-type Robot by Sensor-based Decoupling Control, Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng., 122, 1 (2000) 166.
- (4) 菊池 誠, 松島皓三: バイラテラルサーボ系の安定性について, 筑波大学大学院修士論文, (1988)
- (5) 新井健生, 中野栄二: 異構造マニピュレータ間におけるバイラテラルマスタスレーブ制御, 日本ロボット学会誌, 4, 5 (1986) 3.