ハプティックデバイスのための非線形外乱の補償

非会員 大橋 俊之 (東京大学)

非会員 Peter Korondi (ブタペスト工科大学)

正員 橋本 秀紀 (東京大学)

Nonlinear Disturbance Compensation for Haptic Device

Toshiyuki Ohashi, Non-member (University of Tokyo), Peter Korondi, Non-member (Technical University of Budapest), Hideki Hashimoto, Member (University of Tokyo)

The Sensor Glove II (SG II) is a glove type haptic device. The SG II supports 20 degrees of freedom which corresponds to the total D.O.F. of the human hand. It can measure the force and the angle of each joint and give force feedback in each joint. The motors move pulleys of the device through wires in tubes. It makes unexpected disturbances and makes device control difficulties. In this paper we control the SG II with a disturbance compensation based on a sliding mode observer. The sliding mode observer is an efficient scheme for compensating nonlinear disturbance. The results of the free motion experiment show its effectiveness.

キーワード：ハプティック、非線形外乱、スライディングモード、オブザーバ、モーションコントロール

1. まえがき

Virtual Reality の研究は近年、力覚のフィードバックを加えることで、臨場感を出し、作業の能率を上げようとする動きが盛んになってきている。人間はその作業の大部分を手で行ない、環境との接触はほとんど手により行なわれる。最終的には人間の手を全てカバーし、人間があたかも自分の手の機能が拡張したように感じられるインターフェースを作るのが目標である。しかしハプティックデバイスには幾つかの制約条件があり、特に限られたスペースに直接動力を供給するのは難しく、現在のアクチュエータの大きさでは、手をカバーするようなデバイスの多くはワイヤ・チューブ構造をとっているのが現状である。摩擦の大きいワイヤ・チューブ構造は制御が困難であり、現在、高い精度で実用に足りうるデバイスは存在していない。その結果、現在製品化され、注目されている Phantom⁽¹⁾ においては最大2本の指先をサポートするに留まる。

Sensor Glove II (SG II)⁽²⁾ は11自由度を有する Sensor Glove⁽³⁾ の研究成果を受けて製作したグローブ型の装着型ハプティックデバイスである。人間の手に対応して、1本指あたり4自由度、5本指で計20自由度を有する(図1)。本研究の目的はこの Sensor Glove II を用いて VR インターフェースを構築することである。

ハプティックデバイスの動作は物体と接触していないフリーモーションと接触するコンタクトに分けられる。

フリーモーションはハプティックデバイスの基本動作であり、環境との力とオペレータの力の差がなくなるように制御するのが基本的なスキームとなる。即ち、操作者の負担を減らし、動作時の違和感を減らすために摩擦を補償する制御系を設計する必要がある。そして、これを元として、VR インターフェースの構築を検討する。

図1 Sensor Glove II の写真(装着した状態)

Fig.1. Photo of Sensor Glove II (in the human hand)

本論文では、第2章で Sensor Glove II について説明し、第3章では今回提案する非線形外乱を取り除くための制御系としてスライディングモードを用いたオブザーバについて述べ、システムへ実装する。第4章ではフリーモーションの実験を通してその有効性を示す。

2. Sensor Glove II

〈2・1〉設計と構造 手の自由度をカバーするデバイスを設計するにはセンサ類の配置スペースと観測精度の問題がある。配置スペースに関してはデバイスの手と指の甲の部分しかなく、このスペースをフルに活用する設計を考えた。力フィードバックに関しては関節を直接駆動する方式が理想的ではあるがスペースと駆動トルクの大きさの問題からここでは間接駆動方式を採用した。また動力の伝達に関してはギアによる方式とワイヤ・チューブによる方法があるが、デバイスの重量、配置スペースを考慮してワイヤ・チューブによる方法を採用した。角度検出に関してはモータに付属するエンコーダを用いる。力の計測に関しては実装が容易でありスペースや精度の問題を考慮にいれストレインゲージを採用するに至った。

デバイスの構造は人差し指から小指までの構造は同一であり、親指の構造のみ少し異なっている。図2にデバイス（人差し指部分）の構造を示す。

図3はデバイスの1関節部分を取り出した機構図である。指とデバイスはテープにより固定される。それぞれの関節に対し、1つのモータが対応しており、20関節全ての関節を独立して20個のモータにより制御する。モータとプーリはワイヤ・チューブで接続され、人間の関節1つに対して2つのリンク機構で制御する。

図2 SG II の構造
Fig.2. Structure of SG II

〈2・2〉関節角度と関節トルクの算出 SG II は前述のように、プーリを使い、この回転角度をワイヤ・チューブで繋がれたモータのエンコーダによって算出する。この値は実際の人間の関節角度とは異なり、機構学によりモータで検出された角度から指の関節角度へ変換を行なう。

図4のように装着時にデバイスと操作者の指により4つのジョイントを持った5角形が3つ作られる。この5角形は1つの角度、ここではワイヤに繋がれたプーリの回転角度が決まれば他の全ての角度が求められる。オペレータの指の太さ、長さをあらかじめ測定し、装着した状態のそれぞれのリンクの長さを求めておく。この値を用いて関節角度、関節トルクが正確に算出される。

図4 デバイスの運動学
Fig.4. Kinematics of device

3. SG II の制御

〈3・1〉制御全体のスキーム 図5はシステム全体のスキームを示している。機構学から求められた指先の位置 P_{tip} と力 F_{tip} はVR シミュレータに入力されフィードバックされる力 F_{back} が出力される。このフィードバックの力は各関節へのトルク τ_{back} へ変換され、操作者の関節トルク τ_{joint} とつり合うよう制御される。

図5 全体のスキーム
Fig.5. Whole control scheme

フリーモーションはハプティックデバイスの基本的な動作と考えることができる。理想的には操作者が仮想の物体に接触していないときはまったく力を感じることなく自由に手を動かすことができることが望まれる。SG II に置き換えれば、力入力の値が小さければ小さいほど理想的といえる。フリーモーションではオペレータの指の角度 θ_h とデバイスの角度 θ の差 θ_{err} がストレインゲージによって検出されることが考えられる。つまり、この差を0にすることによりデバイスは人間の手の動きに追従することになる（図6）。なおこの図6は図5の点線内と等価であり環境からの力のない時の状態である。

〈3・2〉SG II の問題点 デバイスはワイヤ・チューブで構成され、また、手作りにより形状にむらがあるために、場所によって予測のできない摩擦が生じる。ここでコントローラにゲイン20のP制御を用いて位置制御を行なった結果を図7に示す。デバイスには非線形性が見られ、立ち上がりからグラフはきれいな曲線を描かず、また出力が3~5[V]あるにもかかわらず大きな摩擦のために動きは止まってしまう。

図 6 フリーモーション
Fig. 6. Block for free motion

図 7 位置制御の結果 (P=20)
Fig. 7. Result of position control (P=20)

ここで、フリーモーション（位置制御）を実現する制御系を構築する。SG II デバイスは構造が複雑であり、そのモデル化は困難である。通常、外乱を取り除くための制御はループゲインを大きくとるハイゲイン方式、加速度指令制御方式⁽⁴⁾、オブザーバを用いて外乱を推測し、抑圧する外乱オブザーバ方式⁽⁵⁾がある。ここではスライディングモードに基づいたオブザーバを構成する。VSS (Variable Structure System) 理論に基づくスライディングモードの設計はロバスト性を備えた制御方法である。VSS はパラメータ切換型のフィードバック制御で、状態空間内に設定した超平面の両側で制御を切換え、スライディングモード（すべり動作）を発生させる。スライディングモードの特徴は希望の超平面に状態を拘束すればパラメータ変動、非線形に強いシステムを実現できることである。非線形性の強い機械系の制御にはスライディングモードが有効である^{(6) (7)}。そこで本論文ではこのスライディングモードをベースとしたオブザーバ^{(9) (10) (8)}を用いて外乱補償を行ない SG II の制御を行なう。

〈3・3〉 スライディングモードをベースとしたオブザーバの原理 対象とするシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} + \Delta A_{21} & \bar{A}_{22} + \Delta A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{B}_2 + \Delta B_2 \end{bmatrix} u^\circ + \begin{bmatrix} 0 \\ E_2 \end{bmatrix} f(t) \cdots (1)$$

と記述できる。 $x_1 \in R^{n-m}$ 、 $x_2 \in R^m$ 、 $u^\circ \in R^m$ 、 $E_2 \in R^m$ 、 $\bar{A}_{ij}(i, j = 1, 2)$ 、 $\bar{B}_2$ は行列であり、既知である。 $\Delta A_{ij}(i = 2, j = 1, 2)$ 、 ΔB_2 は不確かな変動であり、 $f(t)$ は未知外乱を表す。

(1) でシステムの不確かさ、外乱を

$$\eta = \Delta A_{21}x_1 + \Delta A_{22}x_2 + \Delta B_2u^\circ + E_2f \cdots (2)$$

と置けば、

$$\dot{x}_2 = \bar{A}_{21}x_1 + \bar{A}_{22}x_2 + \bar{B}_2u^\circ + \eta \cdots (3)$$

となる。 x_2 の推定は次式のオブザーバで行なわれる。

$$\dot{\hat{x}}_2 = \bar{A}_{21}x_1 + \bar{A}_{22}\hat{x}_2 + \bar{B}_2(u^\circ + \nu) \cdots (4)$$

ν はスライディングコントローラからのフィードバック入力で、切替面

$$\sigma = x_2 - \hat{x}_2 \quad \sigma \in R^m \cdots (5)$$

を用いて、

$$\nu_i = M_i \text{sign}(\sigma_i) \cdots (6)$$

とする。

η が B_2 のレンジスペースに存在する ($\eta \in \text{Range}(B_2)$) ならば、スライディングモード ($\sigma = 0$ 、 $\dot{\sigma} = 0$) が生じる。⁽¹¹⁾

スライディングモードの大域的存在条件は、以下の式である。

$$\sigma_i \dot{\sigma}_i < 0 \cdots (7)$$

ここで、 σ_i はベクトル σ の i 番目の要素である。理想的なスライディングモードを発生するには ν の切換え周波数が限りなく高いことが必要である。

システムがスライディングモードにあるとき、不連続な ν は連続とみなせる等価入力 ν_{eq} に置き換えることができる。システムへの補助入力 u° を

$$u^\circ = u - \nu_{eq} \cdots (8)$$

とする。

システムがスライディングモードにあるとき、 $\dot{\sigma} = 0$ から $\eta = B_2\nu_{eq}$ となり、システムの外乱は ν_{eq} のフィードバックにより補償される。このとき、システムの動特性は

$$\dot{x}_1 = \bar{A}_{11}x_1 + \bar{A}_{12}x_2 \cdots (9)$$

$$\dot{x}_2 = \bar{A}_{21}x_1 + \bar{A}_{22}x_2 + \bar{B}_2u \cdots (10)$$

となり、補助入力 u° に対するシステムの応答は理想モデル（全てのパラメータが既知のモデル）の u に対する応答に一致する。実際のシステムにおいては等価入力 ν_{eq} を正確に計算するのは難しいが、 ν をローパスフィルタを通すことによって等価的に ν_{eq} に置き換えて推定する

図 8 スライディングモードを用いた補償
Fig. 8. Sliding mode based feedback compensation

ことができる。

全体では2つのループが存在する。オブザーバとスライディングモードコントローラのループは計算機内での信号処理ループであり、高周波での切替えにより理想的なスライディングモードを生じさせることができる。しかしながら、切替え周波数の高さには限界があり、切替えの不完全さは、小さなチャタリングをひき起こす。

スライディングモードコントローラとローパスフィルタを含む補償ループでは、ローパスフィルタによりチャタリングの影響を無視することが可能な外乱推定値 $\hat{v}_{eq}$ が得られる。実システムへフィードバックすることにより外乱の補償を行なう。

表 1 モータの値
Table 1. Rated values

モータとギアパラメータ		
定格トルク	τ_n	0.29 [Nm]
定格出力	P_{outn}	1.7 [W]
定格回転速度	ω_{mn}	55 [rpm]
減速比		1/80
トルク定数	K_{tn}	1.1459 [Nm/A]
電機子抵抗	R_{an}	8.6 [Ω]
電機子インダクタンス	L_{an}	2.7 [mH]
慣性モーメント	J_m	1.6e-3 [kgms ²]

〈3・4〉 SG II への導入

〈3・4・1〉 システムの式 表 1 はモータのパラメータである。制御系の設計を簡単にするために電機子インダクタンスを無視する。状態変数はモータの角度 θ と角速度 ω である。モータのモデルは、

$$\dot{x} = \bar{A}x + \bar{B}u^\circ \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで補助入力 u° はモータ電圧であり、

$$x = [\theta \ \omega]^T \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \bar{k}_\omega \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\bar{B} = [0 \ \bar{k}_u]^T \quad \dots\dots\dots (14)$$

図 9 ステップ応答 (左) シミュレーション
(右) 実システム

Fig. 9. Step response (L) simulation (R) real system

rated parameters は、

$$k_{\omega n} = \frac{K_{tn}K_{tn}}{R_{an}J_n} = -95.4278 \text{ [1/s]} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$k_{un} = \frac{K_{tn}}{R_{an}J_n} = 83.2776 \text{ [r/Vs}^2\text{]} \quad \dots\dots\dots (16)$$

である。

モデルの正当性を評価するためにモータからデバイスの接続部分を取り外しモータのみの状態でゲイン 20 のフィードバックループでステップ応答を測定し、シミュレーションの結果と比較してみた。その結果を図 9 に示す。

デバイスに使われているモータはハーモニックギアを使用しており、通常のモータに比べてはるかに高い摩擦をもっている。立ち上がりの部分、出力電圧が 15V のあたりでは同じ時定数を持っていることが図 9 からわかる。

制御の目的はシステムの挙動を補償により外乱を含まない理想モデルに等しくすることであり、このモータのモデルをデバイスの理想モデルとして用いる。

〈3・4・2〉 外乱補償 全体のコントロールスキームを図 10 に示す。3.3 においてシステムには2つのループがあることを述べた。今回の実験においては両ループともサンプリング時間 1[ms] で処理しているが、実際にはオブザーバとスライディングモードコントローラの計算機内で処理されるループは実システムのループよりも高い周波数で処理し、外乱の推定を行なうことができる。

図 10 における添字 k は k 番目のサンプリング時間における各パラメータの値を示しており、3.4.3 の離散時間系の変換までは省略して説明する。

外乱補償の制御則は次のように与えられる。

$$u^\circ = u - \hat{v}_{eq} \quad \dots\dots\dots (17)$$

u は PID コントローラからの入力であり、 $\hat{v}_{eq}$ はオブザー

図 10 全体のコントロールスキーム
Fig. 10. Overall controller scheme

図 11 チャタリング現象
Fig. 11. Discrete-time chattering phenomenon

バの信号 v_{eq} の近似である。

オブザーバは次式により ω を推定する。

$$\dot{\hat{\omega}} = \bar{k}_\omega \hat{\omega} + \bar{k}_u (u^0 + v) \quad (18)$$

v が不連続なもとで理想的な切換面は次式のように与えられる。

$$\sigma_\omega = \omega - \hat{\omega} = 0 \quad (19)$$

スライディングモードへの誘導はリレーの形式を用いて、

$$v = k_\sigma \text{sign}(\sigma_\omega) \quad (k_\sigma > 0) \quad (20)$$

となる。また、リレー式のオブザーバにおいてスライディングモードが存在する条件は

$$k_\sigma > \max\{|\nu_{eq}|\} \quad (21)$$

である。 ν_{eq} の近似は v に対して以下の 3 次のローパスフィルタを用いることにより得る。

$$T_c^3 \ddot{\nu}_{eq}^{(3)} + 3T_c^2 \ddot{\nu}_{eq}^{(2)} + 3T_c \dot{\nu}_{eq}^{(1)} + \nu_{eq} = v \quad (22)$$

ここで (i) は i 番目の時間に関する微分を表す。

〈3・4・3〉離散時間系の変換 連続時間におけるロバスト性は制御信号 v の高い周波数での切換とハイゲインによって実現される。スライディングモードは他のオブザーバ方式と比較して高いサンプリング周波数を必要とする。充分な周波数が得られなければ σ は図 11 で示されるように切換面 $\sigma = 0$ の付近で振動し、システムに影響が与えられる。

図 11 において T^k は k 番目のサンプリングにおける時間である。離散時間でのオブザーバにおいては $\nu_{eq} = 0$ であってもフィードバック信号 ν^k は $+k_\sigma$ と $-k_\sigma$ との間を交互に切り換わることになる。(18) のオブザーバ内の不連続の項 v は不確かな変動を抑圧し、外乱を取り除く働きがある。

チャタリングを抑えるために、なるべく ν^k の変動を少なくする。ここで、 ν_{eq} は連続であることを考え、次式のように、サンプリング区間において、 ν_{eq} に変更を加えていくことでゲインを抑え変動を少なくすることで、チャタリングを抑える。

$$\nu^k = \hat{\nu}_{eq}^{k-1} + k_\sigma \text{sign}(\sigma_\omega^k) \quad (23)$$

ここで k は k 番目のサンプリング区間を表している。

4. 実験

〈4・1〉フリーモーション実験 フリーモーション実験を行なった。オペレータはデバイスに手を挿入し人差し指の根本の第一関節のみを動かす。ストレインゲージにより検出された関節トルクは角度の誤差に比例していると仮定し、その値 $[Nm]$ に係数 K を掛け、角度の誤差とした。従来の PID 制御によるフリーモーションと比較してみる。PID のパラメータについて説明する。オブザーバを有する方はモータのみのモデルを考慮したパラメータの設計を行ない、立ち上がり時間 $40[ms]$ 、オーバーシュート 5%、整定時間 $0.4[s]$ の特性を持たせ、 $K_{po} = 50$ 、 $K_{do} = 0.1$ 、 $K_{io} = 1.0$ とした。またオブザーバゲイン $M = 5.5$ とフィルタのカットオフ周波数 $100[Hz]$ はシステムの動作を観測しながら調整を行ない、安定した動作においてそれぞれの値がなるべく大きくなるように決定した。PID 制御のみの各パラメータはオブザーバを有する方のパラメータより調整を行なった結果、 $K_p = 90$ 、 $K_d = 1.0$ 、 $K_i = 30.0$ となった。2つの方法について、指の速度を変えてその比較を行なった。どれだけ操作者に負担をかけずにフリーモーションが行なわれたか見てみる。

〈4・1・1〉遅い場合 指をゆっくり動かし、10 秒の測定時間のうちで 1 回の上下運動を行なった。その時の関節角度、指にかかった力を図 12 に示す。グラフ 2 段目に示された指にかかる力を比較するとその差が良く分かる。PID 制御のみの方は指の運動方向を変えてから $2.5[s]$ ほどの間オペレータに対して力が加わっているのに対し、オブザーバありの方は運動方向の転換時に力がかかるもののすぐに反応の少ない状態へと移る。これはデバイスのつよい摩擦が補償されていることをしめしている。ここで加えられた関節トルクの絶対値の平均をとると PID 制御が $0.009[Nm]$ に対しオブザーバありの場合は $0.002[Nm]$ となっている。トルクと操作者の負担は比例するわけではないが、操作感は大きく改善された。

〈4・1・2〉やや早い場合 次に指を早く動かして比較した。10 秒の測定時間のうちで 5 回ほどの上下運動を行なった。その時の関節角度、指にかかった力を図 13 に示す。ここではむしろグラフ右のオブザーバを有する場合の方が運動方向切換時に力がかかっているように見える

図 12 フリーモーション 実験の結果 (1)

Fig. 12. Free motion experiment (1)

左 PID 右 オブザーバあり 1 段目 点線:目標角度 実線:実際の角度
2 段目 人間の関節トルク 3 段目 出力電圧
4 段目 推定された外乱

が左の PID のみのときとほとんど変わらないといってよい。その後、オブザーバを有する方はすぐさま摩擦を抑制しているのに対して、PID のみの方はトルクが 0 になるのが遅れていることがわかる。

加えられた関節トルクの絶対値の平均をとると PID 制御が $0.013[Nm]$ に対しオブザーバありの場合は $0.008[Nm]$ となっている。操作者は運動方向切替時にデバイスの慣性を少し感じるものの操作時のデバイスの抵抗は小さく感じられた。

図 13 フリーモーション 実験の結果 (2)

Fig. 13. Free motion experiment (2)

左 PID 右 オブザーバあり 1 段目 点線:目標角度 実線:実際の角度
2 段目 人間の関節トルク 3 段目 出力電圧
4 段目 推定された外乱

〈4・2〉仮想壁実験 前節で述べた PID にスライディングモードをベースとしたオブザーバを用いて仮想壁実験を行なった。指より深さ方向 $4[cm]$ のところに仮想の壁を設定し、人差し指を用いてこの壁に指先で接触する。

プログラム内でオペレータの指の関節角度より指先の位置を求め、もし指先の位置が壁の内側に入っていると判定された時には位置制御をかけて仮想の壁を実現した。

オペレータには実時間で OpenGL を用いた視覚情報が提示される (図 14)。画面上の手の大きさはあらかじめ計測された操作者の手の大きさと一致しており視覚と力覚のフィードバックを併せてリアリティの向上を図っている。

図 14 視覚フィードバック

Fig. 14. Visual feedback

仮想壁実験における操作者の指先の軌跡を図 15、指先の深さ、関節トルク、関節角度を図 4・2)に示す。図 15 は指の根元を原点として、そこから指先方向を x 軸、指を曲げる深さ方向を z 軸として指先の軌跡をプロットしたもので、仮想の壁は $z = -4$ に設定されている。10 秒の間に操作者は壁を 4 度触っている。壁接触後に関節トルクが急激に上昇し操作者に反力が伝わっていることを示している。

仮想壁実験において、力覚フィードバックのみでは操作者は仮想の壁との接触時に指のどの部分との接触か判別できないが、視覚フィードバックと併せることで自分の指先が仮想の壁に接触していることをリアリティを持って感じることができる。

図 15 指先の動き (試行 4 回)

Fig. 15. Trajectory of finger tip

図 16 指先の深さと人間の関節トルクと角度
Fig. 16. Depth of finger tip, torques and angles of finger joints

2 節目、3 節目 実線-第 3 関節、
点線 (大)-第 2 関節、点線 (細)-第 1 関節

5. まとめ

本論文ではグローブ型のハプティックデバイスである Sensor Glove II を取り上げ、スライディングモードに基づくオブザーバを用いた外乱補償を行なうことにより従来の方法と比較して操作者の負担を少なくフリーモーションが行なえることを示した。デバイスはワイヤ・チューブを用いているため、非線形なモデリングのできない摩擦が強く、今回取り上げた手法は大変有効であった。この手法はモータを用いた多くのデバイスに比較的簡単に適用でき、有用であると思われる。今後はさらに制御系の完成度を高めていくとともに有用なアプリケーションへの応用を考えていく予定である。

(平成 11 年 07 月 23 日受付, 同 12 年 02 月 22 日再受付)

文 献

- (1) Thomas H. Massie, J. Kenneth Salisbury: 「The Phantom Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects」, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Chicago, Vol. 55-1, pp.295-302(1994)
- (2) Yasuharu Kunii, Yoshiaki Nishino, Hideki Hashimoto: 「Development of 20 DOF Glove Type Haptic Interface Device」, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'97), pp.132-137(1997)
- (3) Buss Martin, Hideki Hashimoto: 「Information and power flow during skill acquisition for the intelligent assisting system - IAS」, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'93), pp. 25-32(1993)
- (4) 堀 洋一: 「加速度制御形サーボシステムの提案」, 電気学会産業 計測制御研究会, IIC-87-20(1987.10)
- (5) Kiyoshi Onishi, Kouhei Onishi, Miyachi Kunio: 「Adaptive DC Servo Drive Control Taking Force Disturbance Suppression into Account」, IEEE Trans. Industrial Application, vol. 24, no. 1, pp. 171-176(1988)
- (6) 原島 文雄, 橋本 秀紀: 「Sliding Mode とその応用 I」, システムと制御, vol.29, No.2, pp.94-103(1985)

- (7) 原島 文雄, 橋本 秀紀: 「Sliding Mode とその応用 II」, システムと制御, vol.29, No.2, pp.242-250(1985)
- (8) Janxin Xu, Hideki Hashimoto, Fumio Harashima: 「On Design of VSS Observer for Nonlinear System」, Trans. on the Society of Instrument and Control Engineer, vol.25, no.2, pp152-158(1989.2)
- (9) Peter Korondi, K-K. Young, Hideki Hashimoto: 「Discrete-time Sliding Mode Based Feedback Compensation for Motion Control」, Proc. of the 1996 IEEE Intl. Workshop on Variable Structure System, pp.127-131(1996)
- (10) Peter Korondi, David Young, Hideki Hashimoto: 「Sliding Mode Based Disturbance Observer for Motion Control」, Proc. of IEEE Conference on Decision and Control, pp.1926-1927(1998)
- (11) 野波 健蔵, 田 宏奇: 「スライディングモード制御 - 非線形ロボタ制御の理論 -」, コロナ社 (1994)

大 橋 俊 之 (非会員) 1974 年 9 月 5 日生。1997 年 3 月 東京大学工学部電気工学科卒業。1999 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士過程修了。同年 4 月よりデロイトトーマツコンサルティング (株) に勤務。

Peter Korondi (非会員) 1984 年ブタペスト工科大学工学部卒業。1995 年同大学工学博士。1986 年より同大学電気工学科勤務。1993-1995 年東京大学大学院研究員。パワーエレクトロニクスとモーションコントロールの研究に従事。

橋 本 秀 紀 (正員) 1957 年 8 月 15 日生。1981 年 3 月 東京大学工学部電気工学科卒業。1987 年 3 月 同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了工学博士。同年 4 月同大学講師。生産技術研究所勤務。1990 年同大学助教授、現在に至る。1989-90 年 MIT 客員研究員 (LIDS, LEES)。知的制御システム、制御工学、Robotics 及び ITS の研究に従事。