

電動パワーアシスト装置のスライディングモード制御*

横山 誠^{*1}, 川崎 貴史^{*2}, 土屋 雅彦^{*3}

Sliding Mode Control Electric Power Assist Systems

Makoto YOKOYAMA^{*4}, Takafumi KAWASAKI and Masahiko TSUCHIYA^{*4} Department of Mechanical & Production Engineering, Niigata University,
8050 Ikarashi 2-nocho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper presents a nonlinear controller for electric power assist systems based on the sliding mode control. The proposed sliding mode controller is designed to achieve desired nonlinear properties including gravitational effect with robustness against disturbances such as friction force and modeling errors. Furthermore, so-called reaching phase is positively utilized so that the operator can feel disturbance torque of relatively large amplitude which should be noticed as information about environment, for example, when hitting an obstacle accidentally. Since the reaching phase should be designed from several points of view, the dynamics in the reaching phase is linearized in order to use fruitful linear control theories such as H_∞ theory.

Key Words: Power Assist, Sliding Mode Control, Reaching Phase, Nonlinear Control, Robust Control, Servo Mechanism

1. 緒 言

パワーアシスト装置は、自動車のステアリング機構、工場内の組み立て作業、あるいは介護など様々な分野で利用されている⁽¹⁾⁽⁶⁾。これらの装置に用いられるアクチュエータは種々あるが、電動モーターが典型的である。例えば、自動車のパワーステアリングにおいて、従来の油圧シリンダーは、急速に電動モーターに替わってきている。しかし、電動モーターの場合、減速器における摩擦や大きな慣性力などによって、その制御は容易ではなく、油圧の滑らかさに比べると、操舵性や操作者のフィーリングが必ずしも良くないことが指摘されている。これらの問題は、完全に自動化されたシステムと異なり、人間との協調によって作業を行う補助システム固有のものである。その他、マンマシンインターフェイス問題など広範囲な視点から、研究・開発がなされている⁽⁷⁾。

本研究の第一の目的は、前述のような摩擦やモデル

化誤差に対してロバストな制御器を設計することにある。第二に、操作中に障害物に衝突するなどの環境の情報を操作者に適切に伝えることである。例えば、自動車のパワーステアリングを操作中にタイヤが縁石に衝突した場合、フィードバック制御による外乱抑制のため、操作者に伝わる衝撃力は緩和される。しかし、このことは、操作者が縁石の存在(環境)に気付かない状況を引き起こすかもしれない。したがって、完全な外乱除去特性は必ずしも望ましい性能ではなく、適切なトレードオフが必要である。これらを実現するために、スライディングモード制御理論の応用を試みる。

スライディングモード制御器は、マッチング条件を満たす外乱に対して、スライディングモード状態で不変性を有する。この特性は、上記第一の目的に合致するが、第二の目的を達成できない。そこで、一般にはスライディングモードに付随的に発生する到達フェイズを、積極的に利用することを提案する。システムの状態がスライディングモード状態になるか、あるいは到達フェイズになるかは、外乱の振幅に依存する。したがって、提案する制御器は、非線形特性を積極的に利用することによって、線形制御器では実現不可能な、振幅に依存した外乱伝達特性を与えることができる。

* 原稿受付 2006年2月2日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。^{*2} キヤノン(株)(〒146-0092 東京都大田区下丸子3-30-2)。^{*3} 新潟大学自然科学研究科。

E-mail: m.yoko@eng.niigata-u.ac.jp

以下, 2章では制御対象のモデルと, スライディングモード状態および到達フェイズにおける, 各々の望ましいダイナミクスに関して考察する. 3章では, そのダイナミクスを実現するための制御器設計法を提案する. 本研究では外乱伝達特性が重要であるため, 外乱オブザーバの性質を有するインテグラルスライディングモード制御理論^{(8),(9)} (以下, ISMC と略記する) を適用する. そこで, まず本制御理論の到達フェイズに関して考察し, 到達フェイズのダイナミクスを設計する一般的手法を提案した後, パワーアシスト装置の制御器設計にこれを適用する. 4章では, 数値シミュレーションによって提案する制御器の有効性を示す.

2. 制御対象と望ましい閉ループ特性

2.1 制御対象の数学モデル 本研究で制御対象とするパワーアシスト装置の概念図を図1に示す. 操作者の腕に装着される1自由度回転アームには, 減速器を介してDCモータが連結されている. モータトルク T_m を発生させ, 操作者が負荷を持ち上げる作業負担を軽減する. アーム回転角の原点を, 平衡点であるアームを真下に振り下ろした位置とすると, 運動方程式は次のようになる.

$$J_e \ddot{\theta} = -W \sin \theta + T_h + nT_m + T_d \quad (1)$$

ただし, θ : アーム回転角, T_h : 操作者トルク, T_m : モータトルク, T_d : 外乱トルク, J_e : 装置を含む回転系の等価慣性モーメント, n : 減速比, W : 負荷および装置による鉛直方向重力トルクである. また, コイルインダクタンスを無視し, 制御入力である電圧を u とすると, モータの発生するトルクは,

$$T_m = -\frac{nK_t K_v}{R} \dot{\theta} + \frac{K_t}{R} u \quad (2)$$

と表される. ここで, K_t : トルク定数, K_v : 逆起電圧定数, R : モータ内部抵抗である. これを式(1)に代入すると, 制御対象は次のように記述される.

$$J_e \ddot{\theta} = -n^2 \frac{K_t K_v}{R} \dot{\theta} - W \sin \theta + T_h + \frac{nK_t}{R} u + T_d \quad (3)$$

2.2 望ましい閉ループモデル 望ましい閉ループ特性は, 装置の使用目的に応じて種々考えられるが, 最も基本的な考え方は, 操作者が質量 m の負荷をあた

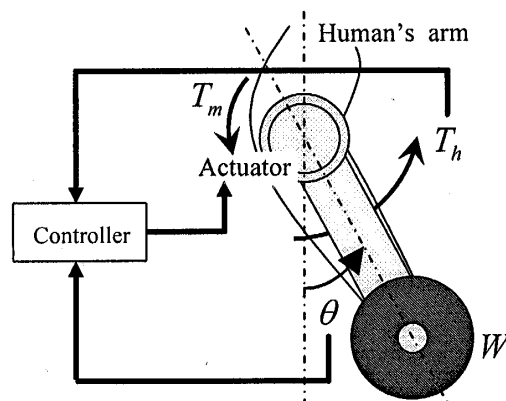


Fig.1 Schematic of power assist system

かも質量 αm ($0 < \alpha < 1$) の負荷と同様の感覚で動かすことができることである. このときの運動方程式は,

$$ml^2 \ddot{\theta} = -mgl \sin \theta + \frac{1}{\alpha} T_h \quad (4)$$

となる. ここで l はアームの長さ, g は重力加速度であり, さらに, $1/\alpha$ をパワー増幅率と呼び, 作業負担低減の一つの尺度とする. しかし, 筆者らのこれまでの研究によると, 式(4)のダイナミクスを閉ループ特性として実現した場合, モデル化誤差や状態量の推定誤差などの影響を受け易い. その主因は, 本ダイナミクスの平衡点が中心点であることにある. したがって, ダンピング効果を導入するなどの安定化が必要である. また, 重力による非線形関数 $\sin \theta$ が存在するため, 周波数特性を用いた詳細な設計が難しい. そこで, まず線形近似モデルを用いてダイナミクスを決定し, その後, 自然な重力感 (非線形特性) を付加することにする.

式(4)において $\sin \theta \approx \theta$ と線形近似したシステムを考えると, 操作者トルクからアーム回転角への伝達関数は,

$$\frac{\Theta(s)}{T_h(s)} = \frac{1/\alpha}{ml^2 s^2 + mgl} \quad (5)$$

となる. 前述のように, これはダンピングのない共振特性を有するため, これを安定化しつつ, ゲインを近似する次の2次系線形特性を考える.

$$\frac{\Theta(s)}{T_h(s)} = \frac{G}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (6)$$

本モデルのパラメータを決定する方法として, 比例ゲイン G を式(5)のDCゲインと一致させる. すなわち,

$$G = \frac{\omega_0^2}{\alpha m g l} \quad (7)$$

となる。次に、固有振動数 ω_0 および減衰係数 ζ は、作業内容に適合したアーム最高回転速度、あるいは操作者トルクの最高周波数を考慮し、その周波数まで式(5)のゲイン曲線と一致するように決定する。

最終的に、操作者が自然な重力を感じる事ができるように、線形モデルに非線形性を付加する。ここでは θ を $\sin \theta$ に置き換えることとし、望ましい閉ループ非線形ダイナミクスを以下のように決定する。

$$\ddot{\theta} = -\omega_0^2 \sin \theta - 2\zeta\omega_0 \dot{\theta} + GT_h \quad (8)$$

これは、 $|\theta| < \pi$ で漸近安定である。

さて、状態変数を $x = [\theta \quad \dot{\theta}]^T$ とすると、式(3)、(8)はそれぞれ以下のように状態空間表現される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -n^2 \frac{K_t K_v}{R J_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} W \sin x_1 \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_h + \begin{bmatrix} 0 \\ n \frac{K_t}{R J_e} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_d \\ &\triangleq Ax - b_0 W \sin x_1 + b_0 T_h + bu + b_0 T_d \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix} \sin x_1 \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} T_h \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)より、 $b_0 = (Rn/K_t)b$ であるから、外乱 T_d はマッチング条件を満たしている。同様に制御対象のパラメタ誤差を考えた場合も、入力係数ベクトル b のレンジスペースに存在するため、マッチング条件を満たしていることが容易にわかる。したがって、これらの不確かさに対して不変性を有するスライディングモード制御器が有効である。すなわち、スライディングモード状態で、式(9)から外乱を除いたダイナミクスを実現できる。しかし、不意の衝突など大振幅外乱が発生した場合には、その存在を適度に操作者に伝えることも必要である。これを実現するためには、もはやスライディングモード状態にあってはならない。すなわち、状態を到達フェイズに移行させる必要がある。到達フェイズの望ましいダイナミクスは種々考えられるが、こ

の状態はあくまで緊急時であることと、スライディングモード状態とは異なり外乱に対する不変性は成立しないことなどを考慮すると、ロバスト安定性を重視すべきであろう。このためには、充実した線形理論を適用できるように、望ましい到達フェイズを線形ダイナミクスとすることを考える。詳細は、次章での到達フェイズの解析の後に述べるが、ここでは式(10)において $\sin x_1 \approx x_1$ で線形近似した次のモデルを採用する。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} T_h \quad (11)$$

3. 制御器設計

3・1 ISMCの到達フェイズ Utkinらが提案したISMCは、比較的広いクラスの非線形システム（入力アファインな多入力非線形システム）に対して適用可能であるが、一般論として到達フェイズを解析することは困難である。そこで、本研究の制御対象に照らし、1入力非線形系で、かつ入力係数ベクトルが定数の以下の制御対象を考える。

$$\dot{x} = f(x) + bu + hd = f(x) + bu + \eta bd \quad (12)$$

ここで、 d は外乱およびモデル化誤差を表すスカラー関数、 η は定数であり、第2の等式は d がマッチング条件を満たしていることを仮定している。また、 $d \neq 0$ の公称モデルに対する望ましい制御入力を u_0 で表し、公称制御入力と呼ぶことにする。Utkinらの非線形切換え関数を線形にした、次の切換え関数を考える。

$$\sigma = \varphi^T(x - z) \quad (13)$$

ここで、 z は補助変数であり、制御対象のモデルと公称制御入力を用いて、以下で定義する。

$$\dot{z} = f(x) + bu_0 \quad (14)$$

制御入力 u は、公称制御入力にスライディングモードを発生させるための不連続入力を加えて、以下の式で与える。

$$u = u_0 - \gamma \operatorname{sgn}(\sigma) \triangleq u_0 + u_1 \quad (15)$$

このとき、切換え関数のダイナミクスは、

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \varphi^T(\dot{x} - \dot{z}) \\ &= \varphi^T[f(x) + b(u_0 + u_1) + \eta bd - f(x) - bu_0] \\ &= \varphi^T b(u_1 + \eta d) \end{aligned} \quad (16)$$

となる。したがって、 $\varphi^T b \neq 0$ を仮定すると、 $\dot{\sigma} = 0$ より、スライディングモード状態における u_1 の等価入力 u_{1eq} は、 $u_{1eq} = -\eta d$ となり、スライディングモード状態では、外乱・モデル化誤差が完全に打ち消される。

したがって、もう一つの制御入力要素である公称制御入力 u_0 によって理想的な閉ループ系が達成される。

一方、到達フェイズのダイナミクスは、式(15)を式(12)に代入して得られるが、リレー入力は切り換わらず一定であることに注意すると、このダイナミクスは、スライディングモードと同じ理想的なダイナミクスに、一定値制御入力および外乱の入った特性となる。到達フェイズをスライディングモードと異なるダイナミクスにするために、次のようにあらたな制御入力要素 u_2 を加えることを提案する。

$$u = u_0 + u_1 + u_2 \quad (17)$$

このとき、到達フェイズのダイナミクスは、式(17)を式(12)に代入して

$$\dot{x} = f(x) + b(u_0 + u_2) + b[-\gamma \operatorname{sgn}(\sigma) + \eta d] \quad (18)$$

となる。例えば、 u_2 を非線形状態フィードバックとすることによって、線形化可能なシステムが存在する。実際パワーアシスト装置は線形化可能であり、この考えを適用するが、詳細は次節で述べる。

次に、式(17)の制御入力を用いたときのスライディングモードに関して検討する。等価入力は、

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \varphi^T (\dot{x} - \dot{z}) \\ &= \varphi^T [f(x) + b(u_0 + u_1 + u_2) + \eta b d - f(x) - b u_0] \\ &= \varphi^T b (u_{1eq} + u_2 + \eta d) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

を u_{1eq} について解いて次のように得られる。

$$u_{1eq} = -u_2 - \eta d \quad (20)$$

すなわち、リレー入力が外乱と共に u_2 も打消し、スライディングモードは不変であることがわかる。このことは、補助変数 z のダイナミクスには u_2 を加えていないことと、 u_2 もマッチング条件を満たすことを考えると、自然な結果である。

スライディングモードの存在条件は、リアプノフ関数を $V = \sigma^2/2$ と選び、 $\varphi^T b > 0$ を仮定すると、次式で与えられる。

$$\gamma > |u_{1eq}|_{\max} = |u_2 + \eta d|_{\max} \quad (21)$$

すなわち、 u_2 を等価外乱とみなすことができ、これがあまりにも大きくなるような設計をすると、リレーゲ

イン γ を大きくしなければならないため、注意を要する。しかし、パワーアシスト装置の場合、 u_2 を大きくし、スライディングモードと到達フェイズに大きなダイナミクスの違いを与えると、操作者フィーリングが劣化するため、これを避けるように次節で設計する。

さて、一般的なスライディングモード制御理論では、到達フェイズの改善として、比例到達則など切換え関数を変数とするフィードバックを付加する。この場合は、切換え関数の定義式(13)から明らかなように、 u_2 は制御対象の状態変数 x のみならず補助変数 z をも変数とする関数になる。したがって、到達フェイズでのダイナミクスは補助変数のダイナミクスの影響も考慮しなければならない。

3・2 パワーアシストの制御器 前節で提案した設計論をパワーアシスト装置に適用する。まず、公称制御入力は、式(9)で $T_d = 0$ とした公称モデルと理想モデル式(10)を比較することによって、次のように得られる。

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{R}{nK_t} \left\{ (W - J_e \omega_0^2) \sin x_1 \right. \\ &\quad \left. + \left(n^2 \frac{K_t K_v}{R} - 2J_e \zeta \omega_0 \right) x_2 + (J_e G - 1) T_h \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

次に、この公称制御入力と公称モデルを用いて、補助変数のダイナミクスを次のように定める。

$$\dot{z} = Ax - b_0 W \sin x_1 + b_0 T_h + b u_0 \quad (23)$$

切換え関数は式(13)と同じとし、本式の補助変数と制御対象の状態変数から算出される。スライディングモードを発生させる不連続入力 u_1 は、この切換え関数を用いて、

$$u_1 = -\gamma \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (24)$$

とする。

さらに、既に式(11)に示したように、到達フェイズの理想的なダイナミクスとして、スライディングモードを表す式(10)を線形化したモデルを採用する。これによって、平衡点近傍ではスライディングモードに近いダイナミクスとなる。ただし、実際の到達フェイズのダイナミクスは、これに外乱とリレー入力（但し、一定値）が入る次式となる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} T_h \\ &\quad + b_0 T_d + b u_1 \end{aligned} \quad (25)$$

したがって、式(22)を式(17)に代入し、それをさらに式(9)に代入して、式(25)と等しくなるように u_2 を求めると次のようになる。

$$u_2 = \frac{RJ_e}{nK_l} \omega_0^2 (\sin x_1 - x_1) \quad (26)$$

これは式(9)において、非線形項を消去し線形項を加えるフィードバック線形化に他ならない。したがって、平衡点近傍では u_2 はほとんど零であり、平衡点から離れるにしたがって大きくなる。

式(21)に対応するスライディングモードの存在条件は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \gamma &> \left| u_2 + \frac{R}{nK_l} T_d \right|_{\max} \\ &= \frac{R}{nK_l} \left| J_e \omega_0^2 (x_1 - \sin x_1) + T_d \right|_{\max} \end{aligned} \quad (27)$$

前述のように、 u_2 が平衡点から離れたところで大きくなることを考慮して、上式右辺を見積もり、 γ を決定する。

4. 数値シミュレーション

本章では、提案した制御器の有効性を数値シミュレーションによって検証した結果を示す。制御器を実行するためには、状態変数であるアーム回転角変位、角速度、および操作者トルクが必要である。ここでは、これらはすべて測定可能とした。実システムでは、コストの低減などの理由から角速度を測定できない場合もあるが、この場合はオブザーバを利用することができる⁽¹⁰⁾。

シミュレーションに用いたパラメータ値は、筆者等の研究室で現在製作中の装置を参考に、以下の値とした。

$J_e = 0.456 \text{ Kg m}^2$, $n = 162$, $R = 1.6 \Omega$, $W = 8.61 \text{ Nm}$,
 $K_l = 2.5 \times 10^{-2} \text{ Nm/A}$, $K_v = 2.5 \times 10^{-2} \text{ Vs/rad}$,
 $m = 2 \text{ Kg}$, $l = 0.4 \text{ m}$, $|T_d|_{\max} = 0.366 \text{ Nm}$,

ここで、外乱はクーロン摩擦を仮定した。図2に、式(5)の理想モデルのゲイン曲線と式(6)の望ましい線形特性のゲイン曲線を示す。破線の $\alpha = 1$ は、パワー増幅率 $1/\alpha = 1$ でアシストのない状態を意味し、一点鎖線の $\alpha = 0.5$ は、パワー増幅率 $1/\alpha = 2$ でアシストのある状態を表す。したがって、これらのゲインの差が、理想的アシストトルクの効果を表す。2.2節で述べたように、望ましい線形特性は、 $\alpha = 0.5$ のゲイン曲線を作業周波数帯域まで近似しつつ、共振を抑えるようにパラメータを決定する。ここでは、図2に実線で示す

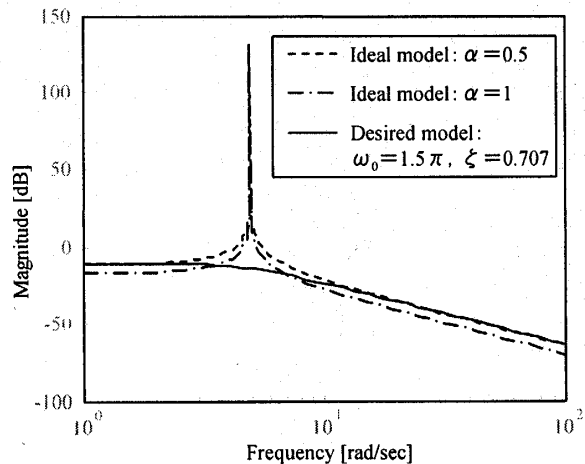
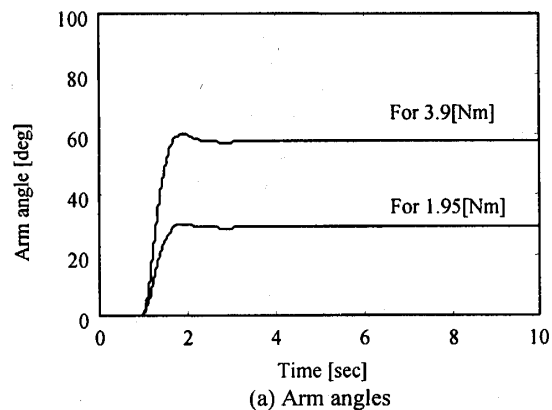
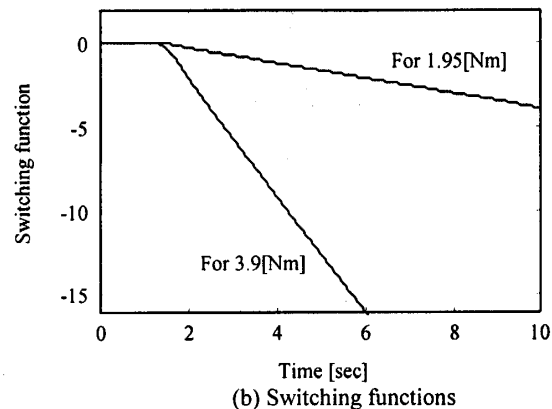


Fig.2 Gain curves of linear models



(a) Arm angles



(b) Switching functions

Fig.3 Step responses during reaching phase

ように、広帯域で破線を近似し、その結果、式(5)のパラメータは、 $G = 5.665$, $\omega_0 = 1.5\pi$, $\zeta = 0.707$ となった。モデル化されないダイナミクスに対するロバスト安定性を考慮して、高帯域でゲインを小さくするなど、様々な周波数整形も可能である。

制御器のリレーゲイン γ は、操作範囲を $|x_1| \leq \pi/2$ とし、式(27)を満たすように $\gamma = 3$ とした。また、 $\phi^T b \neq 0$ となるように、 $\phi^T = [0 \ 1]$ とした。

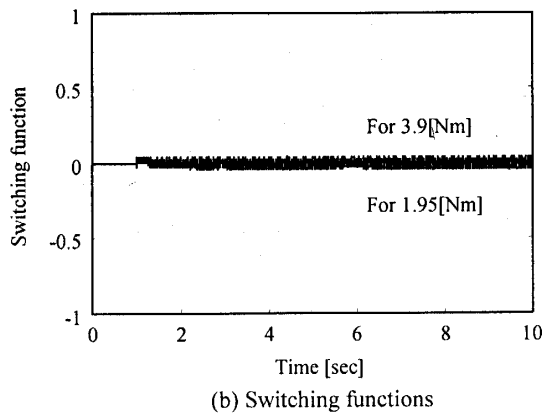
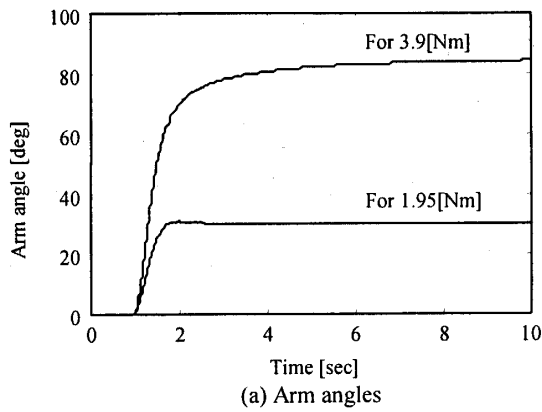


Fig.4 Step responses during sliding mode

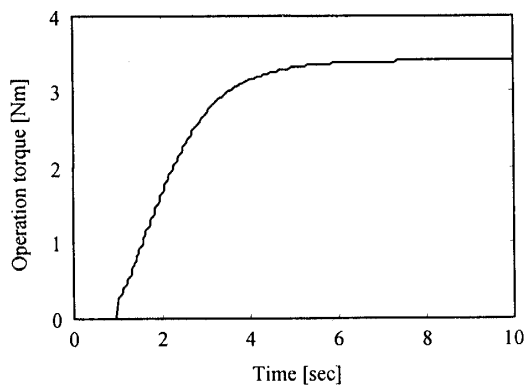


Fig.5 Operation torque

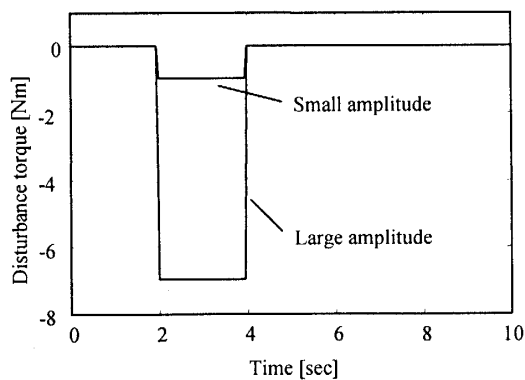
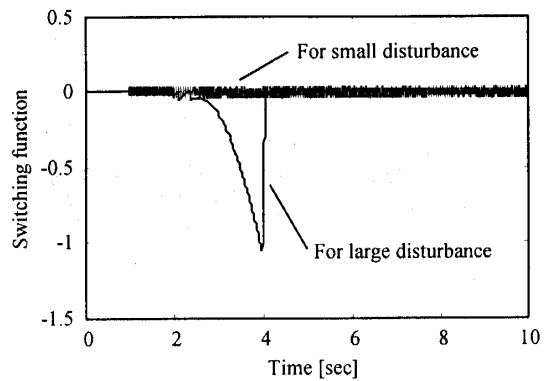
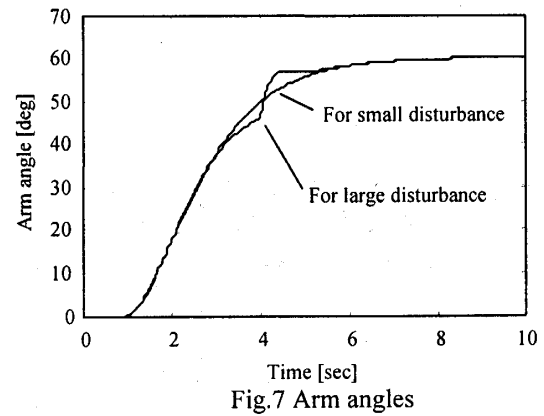


Fig.6 Disturbance torque



まず、閉ループ系のダイナミクスが、到達フェイズでは線形であり、スライディングモード状態では非線形であることを確認する。ここでは、操作者トルクを入力、角変位を出力と考え、同次性の成立・不成立によって線形・非線形性を示す。そこで、操作者トルクを振幅1.95Nmのステップ関数とした場合と、その2倍の振幅3.9Nmとした場合の角変位応答を図3、4に示す。図3は状態が到達フェイズにあり、図4はスライディングモード状態にある。操作者トルクは、シミュレーション開始から1秒後に与えており、同次性の確認のため外乱トルクを加えていない。また、到達フェイズでは、不連続入力も加えていない。図3より、到達フェイズでは、入力振幅2倍に対して出力応答も2倍となっており、同次性が確認できる。一方、図4より、スライディングモード状態では、同次性が成立しておらず、過渡および定常特性から非線形な重力の効果（軟化ばね特性）が確認できる。

次に、スライディングモード状態でのロバスト性、および到達フェイズでの外乱伝達特性を検証する。操作者トルクは、ステップ関数をローパスフィルタに通した出力とし、図5に示す。外乱トルクは、図6に示すような、スライディングモード存在条件を満足する小振幅外乱と、存在条件を満足しない大振幅外乱と

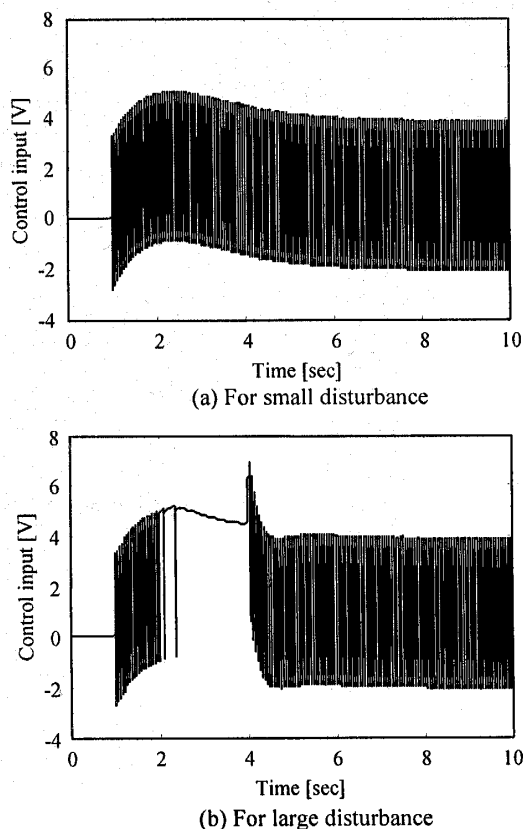


Fig.9 Control inputs

した。このときのアーム回転角、切換関数をそれぞれ図7および図8に示す。小振幅外乱に対しては、切換関数の値がほぼ零になっていることから、システムがスライディングモード状態にあることがわかる。このため、外乱に対して角変位が不変となっている。一方、大振幅外乱に対しては、切換関数の値が零から大きく離れ、制御入力も切換えが発生していない(図9(b))ことから、状態が到達フェイズにあることがわかる。したがって、外乱によって角変位が大きく変動する結果となっている。ここでは、操作者トルクを不変としたため、外乱の影響が角変位として現れたが、このことは操作者に外乱が伝達されたことを意味する。このようにして、操作者に危険な衝突などを知らせることができる。

5. 結 言

電動パワーアシスト装置に対してスライディングモード制御理論を適用し、スライディングモードのみならず到達フェイズも利用する制御器設計法を提案した。すなわち、スライディングモード状態では、摩擦外乱やモデル化誤差に対してロバストで、かつ自然な重力感を与える非線形ダイナミクスを実現した。そ

して、衝突などの危険な状態を操作者に伝えるために、これを線形化したダイナミクスを到達フェイズで実現した。一般に到達フェイズでは、外乱・モデル化誤差に対するロバスト性が十分補償されないため、ロバスト安定解析などが容易な線形ダイナミクスとしたが、任意の非線形ダイナミクスとすることも可能である。また、本論文の制御対象は単純な1自由度マニピュレータであるが、多自由度系にその設計法を適用することもできる。

上述の到達フェイズの利用を目的に、一般的なISMCの到達フェイズについて考察し、到達フェイズのダイナミクスを設計する手法を提案した。従来のスライディングモード制御理論において、到達フェイズは、その名の示すとおりスライディングモード状態に至るフェイズであり、これをできるだけ短時間で終了することに主眼が置かれていた。しかし、到達フェイズの積極的利用は、振幅依存のダイナミクスを与える観点から、パワーアシスト装置に限らず応用可能であると考えられる。

文 献

- (1) Kazerooni, K., Human-robot interaction via the transfer of power and information signals, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2 (1990), pp. 450-463.
- (2) Sorenson, E. A., Sanner R. M. and Ranniger, C. U., Experimental testing of a power-assisted space suit glove joint, *Proc. of IEEE International Conf. on Systems, Man and Cybernetics*(1997), pp.2619-2625.
- (3) Lee, H. et al., Control of mobile manipulators for power assist systems, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 17, No. 9 (2000), pp. 469-477.
- (4) Fujii, F. and Wada, K., Control System Design for the Easy to Manipulate Electrically Powered Wheelchair, *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.645 (2000), pp. 229-235.
- (5) Aoshima, S. et al., Proposal and Simulation of One-Hand Wheelchair with Power Assist Function, *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.63, No.611 (1997), pp. 74-81.
- (6) Hayashibara, Y. et al., Study on Power Assist Systems, *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.61, No.591 (1995), pp. 196-203.
- (7) Ikeura, R., Modeling for Cooperative Systems of Human and Robot, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.3(2000), pp.23-28.
- (8) Utkin, V. and Shi, J., Integral sliding mode in systems operating under uncertain conditions, *Proc. of the 35th CDC*(1996-11), pp. 4591-4596.
- (9) Utkin, V. et al., Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, (1999), pp.115-129, Taylor & Francis Ltd.
- (10) Endo, G. and Yokoyama, M., Sliding Mode Control of Power-assist Systems, *Proceedings of the 47th Joint Conference of Automatic Control*, No.04-05 (2004-11), No.13-235.