可変超平面を有するスライディングモード制御器を用いた マニピュレータの位置・力制御*

岩崎 正裕^{*1}, 小泉 孝之^{*2}
辻内 伸好^{*2}, 竹下 光夫^{*3}

Sliding Mode Controller with Variable Hyperplane for the Robot Manipulator

Masahiro IWASAKI^{*4}, Takayuki KOIZUMI,
Nobutaka TSUJIUCHI and Mitsuo TAKESHITA

^{**} Graduate School, Doshisha University, 1-3 Tatara Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

This paper considers the problem to design force controller for a one-link robot manipulator with contact motion to environments. Generally, the environmental characteristics that the manipulator is in contact with are not often known, and some of them have nonlinearity. Therefore we assume the environmental characteristic which is identified in real time as the spring element, and make the it scheduling variable. We propose a new type of sliding mode controller with gain scheduling type variable hyperplane. By using this controller, hyperplane can be changed for various environments and adapted to nonlinearity of the environmental characteristic.

Key Words: Sliding Mode Controller, Force Control, Gain Scheduling, Variable Hyperplane

1. 結 言

本研究では種々の環境との接触を伴うマニピュレータの運動制御を取り扱う。接触を伴う作業においては、位置制御と力制御といった異なる制御モードが存在するため、その両方を位置制御系として取り扱うことの出来るインピーダンス制御が有効であるとされている。インピーダンス制御においては接触する環境の特性は既知であるとしてインピーダンスを設計するため接触する環境の特性が異なると十分な制御性能が得られない。しかし、マニピュレータが接触する環境ないし対象物の特性は一般的に不明なことが多く、工場外における種々の環境に対する複雑な作業を想定すると、接触する環境の特性に左右されない力制御器が必要である。未知の環境に対応するためには、環境の特性をオンラインで同定する必要があるが、この方法では測定ノイズや外乱等の影響を受けやすく、十分な精度が得られない。そこで、マッチング条件を満たす外乱や不

確かさに対して優れたロバスト性を持つことが知られているスライディングモード制御を用いて位置・力制御器を設計する。スライディングモード制御ではシステムの特性を考慮して切換超平面を設計し、システムに存在する非線形要素や不確かさ、パラメータの変動範囲の上限等を考慮して非線形入力のゲインを設計する。これにより状態を切換超平面に拘束させロバスト性に優れた制御を実現している。しかし、パラメータの変動範囲が大きいシステムでは、応答性と制御入力のチャタリングとのトレードオフからパラメータの変動範囲のすべてにおいて十分な性能を維持することは困難である⁽¹⁾。このようなシステムに対しては切換超平面を変化させることで対応しているものがある⁽²⁾⁽³⁾。

そこで本研究では可変超平面を有するスライディングモード制御器を位置・力制御に適用する。まずは位置制御時と力制御時で切換超平面を切換え、さらに力制御時にはオンラインで環境の特性を同定しそれに基づいて切換超平面を変化させることで未知の環境に対する力制御を実現する。また、シミュレーションおよび実験を行い提案する制御器の有用性を検証した。その結果、ロバスト性に優れた位置・力制御器が構成でき、未知の環境に対する力制御が可能となった。

* 原稿受付 2001年3月13日。

^{*1} 正員, 同志社大学大学院(〒610-0321 京田辺市多々良都谷1-3)。

^{*2} 正員, 同志社大学工学部。

^{*3} 正員, 岡山大学工学部(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)。

E-mail: ntsujiuc@mail.doshisha.ac.jp

2. マニピュレータの運動方程式

制御対象は図1に示すような、垂直面内を回転する2リンクマニピュレータとする。各リンクは剛体とし、それぞれリンク長さを L 、関節から重心までの長さを L_g 、回転角を θ 、重心における集中質点系と考えたときの質量を m とする。パラメータは各リンクごとに添え字をつけて区別する。また、鉛直方向上向きに Y 軸をとり、第2リンクは常に Y 軸と平行を保ちながら移動するものとする。第1関節にアクチュエータを取り付けリンクを駆動するため、可動平面内においては1自由度である。

Fig. 1 Kinematic model for robot manipulator system

2.1 マニピュレータの運動方程式 対象は1自由度であるため回転軸の角度 θ_1 を θ と置き換えるとマニピュレータの運動方程式は次式で表わされる。

$$J_r \ddot{\theta} + D_r \dot{\theta} + G_r(\theta) + L_1 F_{env} \sin \theta + h(\theta, \dot{\theta}, t) = u \quad \cdots (1)$$

ここで J_r はアームの慣性モーメント、 D_r は粘性摩擦力項、 F_{env} は環境から受ける接触力、 $G_r(\theta)$ は重力項、 u は制御入力、 $h(\theta, \dot{\theta}, t)$ は非線形摩擦トルクとする。

2.2 環境剛性の同定 エンドエフェクタが接触する環境をばね要素と仮定し、ばね定数を K_{env} とすると次式が成り立つ。

$$F_{env} = -K_{env} y_{env} \quad \cdots (2)$$

ここで、 y_{env} はエンドエフェクタの環境に対する Y 軸負方向への押し込み量とする。これ以降、 K_{env} を環境剛性と呼ぶことにする。

環境との接触作業を行う際、アームの回転角度は微小であるため、アームの回転角度 θ を平衡点角度 $\bar{\theta}$ からの微小回転角度を $\Delta\theta$ として線形近似する。平衡点をマニピュレータのエンドエフェクタ部と環境とが互いに力を作用せず接している点とすると、

$$\begin{aligned} \theta &= \bar{\theta} + \Delta\theta, \quad \ddot{\theta} = \ddot{\bar{\theta}} = 0, \\ \sin \theta &= \sin(\bar{\theta} + \Delta\theta) = \sin \bar{\theta} + \cos \bar{\theta} \cdot \Delta\theta, \quad \cdots (3) \\ \cos \theta &= \cos(\bar{\theta} + \Delta\theta) = \cos \bar{\theta} - \sin \bar{\theta} \cdot \Delta\theta \end{aligned}$$

の関係が成り立つ。

これより式(3)を用いて θ と y_{env} の関係式を示すと、

$$y_{env} = L_1 \cos \bar{\theta} - L_1 \cos(\bar{\theta} + \Delta\theta) = -L_1 \sin \bar{\theta} \Delta\theta \quad \cdots (4)$$

となり、式(2)より次式が求まる。

$$K_{env} = \frac{F_{env}}{L_1 \sin \bar{\theta} \Delta\theta} \quad \cdots (5)$$

よって、アームの微小回転角度 $\Delta\theta$ と接触力 F_{env} とをセンシングすることで環境剛性を実時間で同定できる。

3. 制御器の設計

3.1 ゲインスケジューリング型可変超平面の設計

環境との接触点を平衡点とし、その近傍における運動方程式は式(1)、式(3)、式(5)を用いて、

$$\begin{aligned} J_r \Delta \ddot{\theta} + D_r \Delta \dot{\theta} + G_r(\bar{\theta} + \Delta\theta) + K_{env} L_1^2 (\sin \bar{\theta})^2 \Delta\theta \\ + K_{env} L_1^2 \sin \bar{\theta} \cos \bar{\theta} \cdot \Delta\theta^2 + h(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}, t) = u \end{aligned} \quad \cdots (6)$$

となる。ここで $\Delta\theta$ は微小であるため、左辺第5項を無視し、微小回転角度 $\Delta\theta$ をあらためて θ と表すと、

$$J_r \ddot{\theta} + D_r \dot{\theta} + K_{env} L_1^2 (\sin \bar{\theta})^2 \theta + v(\theta, \dot{\theta}, t) = u \quad \cdots (7)$$

となる。

ここで、力制御時は重力項は定数と見なせるが、位置制御時には回転角に応じて変化するためこれを非線形摩擦トルクと合わせて新たに非線形項 $v(\theta, \dot{\theta}, t)$ としてまとめた。

式(7)より、環境を単純なバネ要素とみなすことで、環境から受ける接触力の項をシステムに存在する剛性項と見なすことが出来る。そのため、図1のシステムを単純な1自由度系で表すと図2のようになり、未知の環境に対する力制御は時変バネ K_{env} を有する1自由度系の位置制御系と考えることができる。さらに、 K_{env} は実時間で同定されるのでこれをスケジューリングパラメータと置くと、システムは K_{env} に対するLPVプラントを構成している。よって本研究では式(7)で表されるシステムに対して、 $K_{env} = 0$ のときは位置決めサーボ系のスライディングモード制御器を設計し、 $K_{env} > 0$ のときは K_{env} に関するゲインスケジューリング制御器をスライディングモード制御を基に設計する。

Fig. 2 1 D.O.F. System (in Force Control)

1型のサーボ系を構成するために状態変数に次式で表される変数 z を導入する。

$$z(t) = \int_0^t (\theta_r - \theta(\tau)) d\tau \quad \cdots (8)$$

ここで、 θ_r はアームの目標回転角度を表す。状態量を $x = [z, \theta, \dot{\theta}]^T$ とし、接触状態における一般的な不確かさを含むシステムの状態方程式は次式で表わせる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(K_{env})x + B[u + v(\theta, \dot{\theta}, t)] + E\theta, \quad \cdots (9) \\ y &= Cx \end{aligned}$$

ここで,

$$A(K_{env}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -K_{env}(L_1 \sin \bar{\theta})^2/J_r & -D_r/J_r \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/J_r \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1 \quad 0],$$

である.

いま, ある環境剛性 K に対するスライディングモード制御器の切替関数を次式で定義する.

$$\sigma = S(K)x = S_1(K)z + S_2(K)\dot{\theta} + S_3(K)\ddot{\theta} \quad (10)$$

ここで, $S(K) = [S_1(K) \quad S_2(K) \quad S_3(K)]$ はシステムの位相空間に設定する切替超平面の傾きを表すベクトルである.

システムの状態がこの切替超平面上に拘束されているとき次式が成り立つ.

$$\sigma(K) = \dot{\sigma}(K) = 0 \quad (11)$$

式(9), (10), (11)より, スライディングモード制御の等価制御入力は次式で表される.

$$u_{eq} = -(S(K)B)^{-1}S(K)A(K)x - (S(K)B)^{-1}S(K)E\ddot{\theta}_r - v \quad (12)$$

これを式(9)の実際のシステム方程式に代入すると, 等価制御系は次式で表される.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} I - B(S(K)B)^{-1}S(K) \\ -[I - B(S(K)B)^{-1}S(K)]E\ddot{\theta}_r \end{bmatrix} A(K)x \quad (13)$$

式(13)は不確かさ v には依存しないシステムであることから, スライディングモードが生じている限り, つまりマッチング条件を満たす不確かさに対して不感である. また, 式(13)に示す閉ループシステムの固有値は, 元のシステムの伝達関数の零点と原点極となっているので, この零点が安定となるように切替超平面を設計する. 切替超平面の傾き $S(K)$ を次式のようにおく.

$$S(K) = B^T P(K) \quad (14)$$

このとき P は次式で表されるリカッチ方程式の解である.

$$P(K)A_c(K) + A_c^T(K)P(K) - P(K)BB^T P(K) + Q = 0 \quad (15)$$

ここで, 安定余裕 ε を見込んで,

$$A_c(K) = A(K) + \varepsilon I$$

とする. これによりシステムの零点の実部は複素平面において少なくとも $-\varepsilon$ よりも左側に設定される.

このとき, 環境剛性 K_{env} のとりうる範囲のすべての値に対して, 式(15)のリカッチ方程式を解く必要がある. しかし, 本研究で対象とするシステムは式(9)よりスケジューリングパラメータ K_{env} に対してアフィンなシス

テムである. このときシステムは以下のように書き換えることが出来る.

$$A(K_{env}) = \tilde{A}_0 + K_{env}\tilde{A}_1, \quad K_{env} \in [K_{env}, \bar{K}_{env}] \quad (16)$$

ここで, $\tilde{A}_0$ と $\tilde{A}_1$ は既知の行列であり, K_{env} と $\bar{K}_{env}$ はそれぞれ環境剛性のとりうる値の最小値と最大値とする. 式(16)のシステムは次式のように変換することが出来る.

$$A(K_{env}) = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 \quad (17)$$

ここで, $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ は次式で与えられる.

$$A_1 = A(\underline{K}_{env}), \quad A_2 = A(\bar{K}_{env})$$

$$\alpha_1 = \frac{\bar{K}_{env} - K_{env}}{K_{env} - \underline{K}_{env}}, \quad \alpha_2 = \frac{K_{env} - \underline{K}_{env}}{K_{env} - \underline{K}_{env}}$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

このときスケジューリング制御器はスケジューリングパラメータの端点の状態における制御器を求め, それらを補間することにより求めることが出来る⁽⁴⁾. そこで, 次式のリカッチ不等式を解くことによりスケジューリングパラメータの端点における切替超平面の傾きを求める.

$$P_i > 0, \quad P_i A_{ei} + A_{ei}^T P_i - P_i B B^T P_i + Q < 0, \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

ここで Q は任意の正定対称行列である.

式(18)の解を求めるためにいくつかの式変換を行い, LMI 問題に帰着させる. まず, $X \equiv \mu P^{-1}$ を定義し式(18)を適当に変形すると,

$$X_i > 0, \quad A_{ei} X_i + X_i A_{ei} < \mu B B^T \quad (19)$$

となる. さらに Finsler の定理をもちいると,

$$X_i > 0, \quad B^\perp (A_{ei} X + X A_{ei}) B^{\perp T} < 0 \quad (20)$$

となり, 式(18)のリカッチ不等式を LMI に書き直すことが出来る. これより本研究では MATLAB の LMI Control Toolbox を用いて解を求める. 得られた解を再び変数変換することで次式が求まる.

$$S_i = B^T P_i, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

以上より, ゲインスケジューリング型可変超平面の傾きは次式となる.

$$S(K_{env}) = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 \quad (22)$$

3.2 安定性解析 式(22)の係数を用いて切替超平面を変化させると, 切替関数は次式となる.

$$\sigma(K_{env}) = S(K_{env})x \quad (23)$$

これより, システムの状態がこの切替超平面上に拘束されているとき次式が成り立つ.

$$\sigma(K_{env}) = \dot{\sigma}(K_{env}) = 0 \quad (24)$$

このとき式(9), (22), (24)より, スライディングモード制御の等価制御入力は次式で表される.

$$u_{eq} = -(S(K_{env})B)^{-1}S(K_{env})A(K_{env})x - (S(K_{env})B)^{-1}S(K_{env})E\ddot{\theta}_r - v \quad (25)$$

次に非線形入力 u_{nl} の設計を行う。いま、 $\sigma \rightarrow 0$ を実現するために σ に関するリアプノフ関数の候補を次式のように選ぶ。

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 (K_{env}) \quad \dots\dots\dots (26)$$

システムの状態が初期状態から有限時間に切換超平面に到達し、スライディングモードが生じるためには、

$$\dot{V} < 0 \quad \dots\dots\dots (27)$$

とならなければならない。ここで、制御入力を線形入力成分と非線形入力成分の和として次式で表す。線形入力成分には式(12)で $v=0$ とおいた u_{eq} を用いる。非線形入力成分は σ の符号により、ゲイン k で切換わるようにする。また切換超平面への収束を加速させるために比例項を加えそのゲインを p とする。

$$u = u_l + u_{nl} \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここで、

$$u_l = u_{eq}$$

$$u_{nl} = -k \operatorname{sgn}(\sigma) - p\sigma$$

である。

また、不確かさ $v(\theta, \dot{\theta}, t)$ について、

$$\begin{aligned} |v(\theta, \dot{\theta}, t)| &= |(m_1 g L_{g1} + m_2 g L_{g2}) \sin \theta + h(\theta, \dot{\theta}, t)| \\ &\leq (m_1 g L_{g1} + m_2 g L_{g2}) + h(\theta, \dot{\theta}, t) < \eta \quad \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

を満たす η が存在する場合、式(26)の両辺を時間で微分して実際のシステムを表す式(9)と制御入力を表す式(28)を用いると $S(K_{env})B > 0$ より、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma(K_{env}) \dot{\sigma}(K_{env}) \\ &= \sigma(K_{env}) S(K_{env}) \dot{x} \\ &= \sigma(K_{env}) S(K_{env}) [A(K_{env})x + B(u + v) + E\theta_r] \\ &= -k \frac{\sigma^2(K_{env})}{|\sigma(K_{env})|} S(K_{env})B - p\sigma^2(K_{env}) \\ &\quad + \sigma(K_{env})v S(K_{env})B \\ &\leq -k|\sigma(K_{env})|S(K_{env})B - p\sigma^2(K_{env}) \\ &\quad + |\sigma(K_{env})|\eta S(K_{env})B \\ &= |\sigma(K_{env})|(\eta - k - p|\sigma(K_{env})|)S(K_{env})B \quad \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

ここで式(30)に式(27)の条件を用いると、次式のような k の設計のための条件式が得られる。

$$k + p|\sigma| \geq k > \eta \quad \dots\dots\dots (31)$$

4. シミュレーション

提案する制御器の性能を検証するため MATLAB の Simulink を用いてシミュレーションを行う。制御器のブロック線図を図3に示す。これより、プラントから位置と力の信号がフィードバックされ、それらを用いて環境剛性 K_{env} を同定する。この値を用いて力の指令値を位置の指令値に変換し、提案する制御器に入力する。また、環境剛性の値はスケジューリングパラメー

タとして直接制御器に入力され、それに応じて制御ゲインが調整される。しかし、シミュレーションにおいてプラントのモデルは単純なバネ要素とし常に一定値を取るため、数種類の環境剛性値に対してシミュレーションを行いそれぞれの場合における応答を比較することで環境変化に対する適応性を検証する。また、比較対象としてスライディングモード制御を用いない従来型のゲインスケジューリング制御器と切換超平面を変化させない従来型のスライディングモード制御器を用いる。シミュレーション方法は、まず図4(a)に示す位置指令値にしたがい位置制御を行う。そしてエンドエフェクタが環境と接触した後、図4(b)に示す力の指令値にしたがって環境に対して一定の接触力を保つような力制御を行う。

図5にゲインスケジューリング制御器を用いたときの力応答と位置応答を示す。位置応答は力制御時における接触点付近の拡大図を示す。図5(a)より環境剛性が低いときは力応答は指令値に追従するが、環境剛性が高くなると力の定常偏差を生じる。これは図5(b)より環境剛性が大きくなると位置の指令値は相対的に小さくなるため位置の定常偏差が生じる。この値は非常に小さいが環境剛性が大きい場合力の誤差はその分大きくなる。これよりゲインスケジューリング制御を用いると、環境剛性が高くなるほど高い位置決め精度が要求され、わずかでも誤差が存在すると力は目標値に収束しない。

次に従来型のスライディングモード制御器を用いた場合の力応答と切換関数応答を図6に示す。ここで制御パラメータに用いた環境剛性の設計値は 5000[N/m]で一定とし、実際に接触する環境の剛性を 3000～7000[N/m]まで 1000 ずつ変化させた場合の応答変化を調べる。図6(a)より環境剛性があらかじめ設定した値より大きい場合は応答性は悪化するがオーバーシュートなく目標値に収束する。しかし、環境剛性が低い場合はオーバーシュートが大きくなり、次第に応答が振動的になる。図6(b)より環境剛性が高い場合は状態は切換関数より上側にあり、これは線形制御入力不足していることを示している。また、環境剛性が低い場合は状態は切換関数の下側にありこれは線形入力が大きすぎることを示している。切換超平面の傾きを一定にしても、ある範囲においてはロバスト性を示し、この範囲は非線形入力のゲインを大きく設定しておくことで広げることが出来る。しかし、非線形入力のゲインを大きくしすぎるとチャタリングが発生する恐れがあり、さらにシミュレーション結果より柔らかい環境に対しては応答が振動的になるおそれがあるため未知

の環境に対して用いることは困難である。

最後に提案する制御器を用いた場合の力応答と切換関数応答を図 7 に示す。これより環境剛性が大きく変化してもほぼ同等の力応答を示し、切換関数より状態は切換超平面近傍に存在していることがわかる。

以上の結果より、提案する制御器の剛性の異なる環境に対する適応性をシミュレーションにより検証し、その有用性を確認した。

Fig. 3 Block Diagram of the Proposed Controller

Fig. 4 Reference Input

Fig. 5 Simulation Results of Gain scheduling Controller

Fig. 6 Simulation Results of Sliding Mode Controller

Fig. 7 Simulation Results of Proposed Controller

5. 実験

ここでは、シミュレーションにより得られた結果を実機を用いた実験を行い実証する。図 8 に実験装置の構成図を示す。マニピュレータは平行リンク型を用いるが 1 軸のみを駆動することで 1 自由度系として取り扱う。マニピュレータのエンドエフェクタに取り付けたロードセルから環境との接触力の情報をフィードバックし、アームの駆動軸に取り付けたポテンシオメータから位置の情報を取り出す。環境をばね要素と仮定し、これらの値を用いて環境の剛性の値を実時間で同定する。制御は DSP を用いて行いサンプリング周期は 0.5[ms] とする。マニピュレータの物理パラメータを表 1 に示す。

Table 1 Physical parameters of robot manipulator

m_1 [kg]	0.037
m_2 [kg]	0.062
L_1 [m]	0.127
L_{g1} [m]	0.0635
L_2 [m]	0.122
L_{g2} [m]	0.061
J_r [kgm ²]	0.0013
D_r [Nms]	0.025

Fig. 8 Experimental setup

5.1 接触環境の変化に対する適応性の検証 まず初めに、接触環境の変化に対する適応性を検証するために、剛性の異なる環境に対して力制御を行う。接触環境にはゴムの板とスポンジを用いた。なお、接触面を確保するためスポンジの上には薄いプラスチックの板を置いたためスポンジに対して同定される環境剛性は実際の剛性より高くなる。

実験は環境とエンドエフェクタを接触させた状態から 2[N] の力で環境を押し付ける力制御を行う。また、ここでは比較の為にインピーダンス制御による実験もあわせて行う。インピーダンス制御における 1 自由度モデルを図 9 に示す。ここで示す K_i と D_i はあらかじめ設定する理想的なインピーダンスのパラメータである。制御系のブロック線図を図 10 に示す。これより力制御時は力の誤差をインピーダンスブロックに入力

し位置の指令値に変換し、位置制御系の PID 制御を行う。

図 11 にインピーダンス制御器による力応答と環境剛性の値を示す。インピーダンス制御器における剛性項の値を $50[\text{N/m}]$ 、粘性項の値を $1.0[\text{Ns/m}]$ とする。

図 11(a)より環境にゴムを用いたとき力応答は目標値に収束しているが、環境にスポンジを用いたときは定常偏差を生じている。このとき図 11(b)よりゴムの環境剛性は $7500[\text{N/m}]$ でスポンジの環境剛性は $200[\text{N/m}]$ である。これより、接触環境の剛性がインピーダンスにおいて設定した剛性値より大きい場合には定常偏差なく目標値に収束するが、接触環境の剛性値がインピーダンスの剛性項の値に近くなると定常偏差を生じることがわかる。そのため、インピーダンスの設定は環境に応じて行う必要があり、未知の環境に対して適用することは困難である。

図 12 に提案する制御器を用いた際の力応答と環境剛性の値を示す。図 12 (a)より提案する制御器を用いた場合、両方の環境において力応答はすばやく目標値に収束している。このとき図 12(b)よりゴムの環境剛性は $6000[\text{N/m}]$ でスポンジの環境剛性は $300[\text{N/m}]$ である。これより提案する制御器を用いることにより、環境剛性が大きく異なる環境に対してもほぼ同等の応答性を維持しながら力制御を行うことが可能であることが分かる。

Fig. 9 1 D.O.F. System (in Force Control)

Fig. 10 Block diagram of Impedance controller

(a) Contact Force (b) Environmental Stiffness
Fig. 11 Experimental Results of Impedance Controller

(a) Contact Force (b) Environmental Stiffness
Fig. 12 Experimental Results of Proposed Controller

5.2 衝突を伴う接触時の安定性 次に、エンドエフェクタと環境との接触時の安定性を検証するため、マニピュレータを環境に衝突させその後一定の接触力を保つような力制御実験を行う。この実験では、まずマニピュレータと環境とが接触する点を原点とし、そこから上方に $0.175[\text{rad}]$ (約 10°) アームを持ち上げる。その後、実際の環境の位置より下に位置の目標値を設定することでエンドエフェクタを環境と衝突させる。

図 13 に提案する制御器を用いた際の力応答とスライディングモード制御における切換関数の応答を示す。このとき一連の動作は以下の 3 段階に分けることが出来る。まず、第一段階としてエンドエフェクタが環境と接触しない位置制御時、次に第二段階としてエンドエフェクタが環境と接触する瞬間の衝突時、そして最後にエンドエフェクタが環境と安定に接触を行う力制御時である。本実験ではエンドエフェクタが環境と接触する際の速度は約 $2.0[\text{rad/sec}]$ である。図 13(a)より第二段階の接触時において衝突現象によりオーバーシュートを生じていることが分かる。しかし、その後接触力はいったん減少しそこから目標値へと収束している。これは図 13(b)より第二段階において衝突によるオーバーシュートが発生すると、状態量は切換面から遠ざかるが非線形入力働きにより再び切換面近傍に収束させられたため、第三段階において状態がスライディングモードにはいるとその後安定した力制御が行われる。これより、接触環境が未知の場合、衝突時の現象を解析するのは困難でありその安定性を十分保証することは出来ないが、スライディングモード制御を用いることにより状態をいったん切換面に拘束させることで接触時の衝突による影響を最小限に抑えることが出来る。

(a) Contact Force

(b)Switching Function

Fig. 13 Experimental Results of Proposed Controller

5.3 ロバスト性の検証 最後に提案する制御器のパラメータ変動に対するロバスト性を検証するため、アームの先端に約 65[g]のおもりを取り付け実験を行う。これにより位置制御時には慣性モーメントが80%増加し、力制御時には約 0.6[N]の外乱が定常的に作用する。

図 14 に実験結果を示す。図 14(a)は位置制御時の応答を示しているがおもりを付加する前後でほぼ同等の応答を示している。同様に図 14(b)より力制御時においてもおもりを付加する前後でほぼ同等の応答を示している。図 14(c)より、おもりを付加すると位置制御時は状態は切換面から離れる。また、力制御時には状態はおもりを付加する前とは逆の方向に離れていることがわかる。これは図 14 (d) の非線形入力より位置制御時と力制御時ともに正の入力が大きくなっているが、これはアームを上方に持ち上げる方向に働くため、付加したおもりによる作用を打ち消す働きを行っていることがわかる。

以上の結果より提案した制御器は、環境の変化に対してはゲインスケジューリング制御により対応し、マニピュレータのパラメータ変動やトルク外乱に対してはスライディングモード制御の非線形入力が有効に働くため、位置制御および未知環境に対する力制御の双方において優れたロバスト性を有している。

(c)Switching Function (d)Nonlinear Input
Fig. 14 Experimental Results of Proposed Controller

6. 結 言

本研究では可変超平面を有するスライディングモード制御器を設計し、1自由度マニピュレータを用いた位置・力制御に適用した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 接触環境を含めたマニピュレータシステムを時変バネを有する1自由度系と仮定することで、環境剛性に対するLPVプラントを構築し、これをもとにゲインスケジューリング型力制御器を提案した。
- (2) さらに(1)の制御器をスライディングモードサーボ制御器を基に設計することで、可変超平面を有するスライディングモード制御器を設計した。
- (3) 提案する制御器を用いることにより、未知の接触環境に対して常に安定した力制御が行えることをシミュレーションと実験において示した。
- (4) 提案する制御器の環境との接触時における安定性とパラメータ変動やトルク外乱に対するロバスト性を実験により検証し、その有効性を確認した。

謝 辞

なお本研究の一部は、文部科学省からの補助を受けた同志社大学の学術フロンティア研究プロジェクト「知能情報科学とその応用」における研究の一環として行った。

また、本研究についてご助言、ご指導をいただいた神戸大学の川西先生に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 野波 健蔵, 田 宏奇: スライディングモード制御, コロナ社, (1994),
- (2) 古田 貴之, 富山 健: 可変超平面を用いたスライディングモード制御法のロボットマニピュレータへの応用, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, (1997), 55-60.
- (3) S. Siviriglu and K. Nomani: Sliding Mode Control With Time-Varying Hyperplane for AMB System, IEEE Trans. Mechatronics, vol.3, (1998), 51-59.
- (4) P. Gahinet, P. Apkarian, and M. Chilali: Affine parameter-dependent Lyapunov functions and real parametric uncertainty, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 41, (1996), 436-442.