

R8C/15付録マイコン基板活用企画

第7回 スライディング・モードによる回転角度制御の実験

笠原 政史
Masaji Kasahara

モータの位置制御として一般的な方法は、位置、速度、電流をフィードバックする線形制御です。

線形システムの場合、システム内の各構成要素をラプラス演算子 s の関数で表し、それらの連立方程式を解くことによってシステムの動作は一意に求まります。

一方、非線形システムは簡単な代数演算ではシステムの挙動を解析できず、代わりに記述関数法や位相面解析法といった解析が行われます。

スライディング・モード制御は、位相面解析を応用し、負荷の応答が設計値と多少違っていても、設計した直線上をスイッチングしながらなぞらせるという巧妙な非線形制御方法です。

制御理論の目標の一つとして、負荷条件が変わっても影響を受けずに動くロバスト性(制御系の堅牢性)があげられます。

ロバスト制御の一種であるスライディング・モード制御を応用し、モータの回転角度を指令値に追従させる制御装置を作りました(写真7-1)。

本装置はモータを5回転させた後停止します。おもりを付けたときと外したときの応答波形の違い(ロバスト性)を調べました。

スライディング・モード制御の原理

● 回転系の運動方程式

今回制御対象とするのは、図7-1のようなブラシ付きDCモータのシステムです。摩擦は無視できるものとします。

モータに電流が流れると、モータのシャフトにはトルク τ [Ncm] が働きます。シャフトにつながった慣性モーメントを J [gcm²] とすると、回転体の運動方程式、

$$\tau = J a$$

に従って、角加速度 a [rad/s²] が発生します。角加速度は積分されて角速度 ω [rad/s] に、角速度は積分されて角度 θ [rad] になります。

角度が目標値になるように、+方向最大加速度、-方向最大加速度、ブレーキの三つの値のスイッチングを行います。早く目標値へ到達し、リングングなく停止するのが理想です。

● 位相面解析

図7-1の角度 θ と角速度 ω は、モータの「現在の状態」を表しています。現在時刻を t とすると、モ-

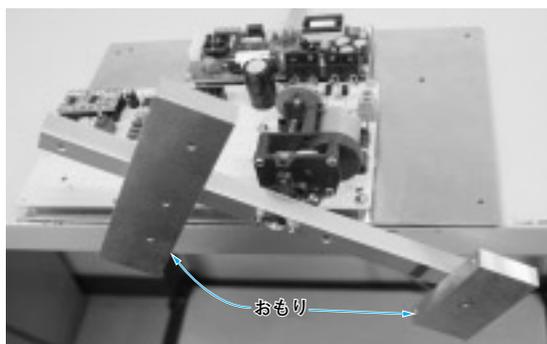


写真7-1 スライディング・モード制御の実験の様子
おもりを付けたときと外したときの応答波形の違い(ロバスト性)を調べているところ

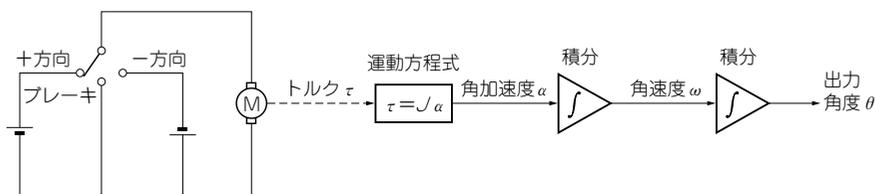


図7-1 制御対象のモデル

タの「次の瞬間($t + \Delta t$)の状態」は、

次の瞬間の状態 =

モータの特性 × (現在の状態 + モータへの入力)
 により決まります。

「モータへの入力」とは、電源を今どの極性につなげるかを意味します。なお、角加速度は、電源を今どの極性につなげるかによりすぐ決まり、過去の状態に左右されないで、状態とは呼びません。

すべての状態変数を集めたものを**位相空間**と呼び、状態が二つしかない系であれば、**図7-2(b)**のようにグラフ化できます。これを**位相面**と呼びます。

図7-2は、モータの電源を「+方向」→「ブレーキ」→「-方向」の順に切り替えた場合の応答です。+電流を加えると**図7-2(a)**のIのように、時間応答とともに角速度が増加し、時間の2乗に比例して角度が増加します。これの位相面は、**図7-2(b)**のIのように右上がりの放物線になります。

ブレーキを掛けると電磁制動により減速されます(II)。-電流を加えると、位相面は+のときは逆回りの放物線に沿って右回りに移動します(III)。そのままにすると、IVのように逆回転を始めてしまいます。

● **スライディング・モード制御**

スライディング・モード制御による位置制御のブロック線図を**図7-3**に、MicroCapによるステップ応答シミュレーションの結果を**図7-4**と**図7-5**に示します。これはブレーキを使わない例です。

角度出力から入力を引くと誤差 err です。「制御回路遅延」は、OPアンプやデジタル信号処理回路による遅延時間です。

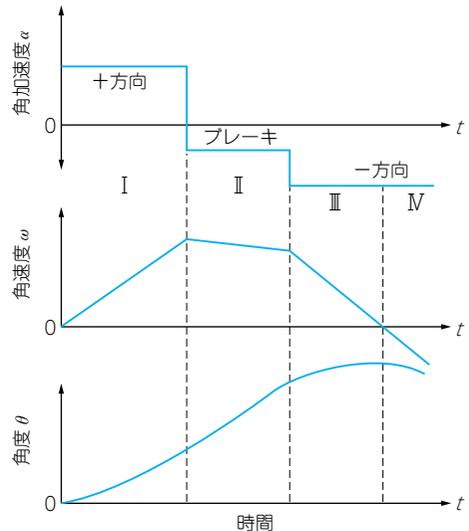
err と $d_err/1000$ を足した値がゼロより大きかったらモータを+方向最大加速度、小さかったら-方向最大加速度に駆動します(d_err は err を微分したもの)。

これは、**図7-5**の位相面において、 $err + 0.001 \times d_err = 0$ の直線より上は+、下は-に駆動することを意味し、この線を**切り替え線**(もしくは切り替え関数)と呼びます。

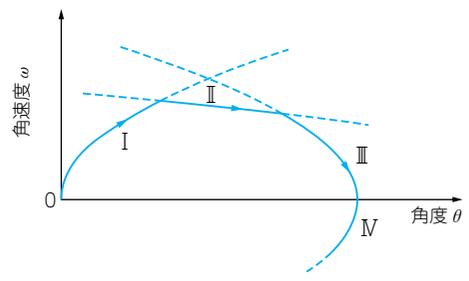
図7-5の位相面は、状態として err と d_err が取ら

れていますが、ステップ応答では、ステップした後は入力の変化はないので、その後の err は出力の角度の相対値、 d_err は出力の角速度を意味し、**図7-2(b)**と同じ見かたができます(ただし引き算器により符号は逆になっている)。

図7-4の角加速度波形を見ると、 $30 \mu s$ から+方向に最大加速し、 $0.8 ms$ で切り替え線に達したため-方向に最大加速しています(**図7-5**参照)。その後は切り替え線をよぎるたびに符号反転を繰り返しながら、



(a) 時間応答



(b) 位相面軌跡

図7-2 モータの電源を切り替えたときの応答

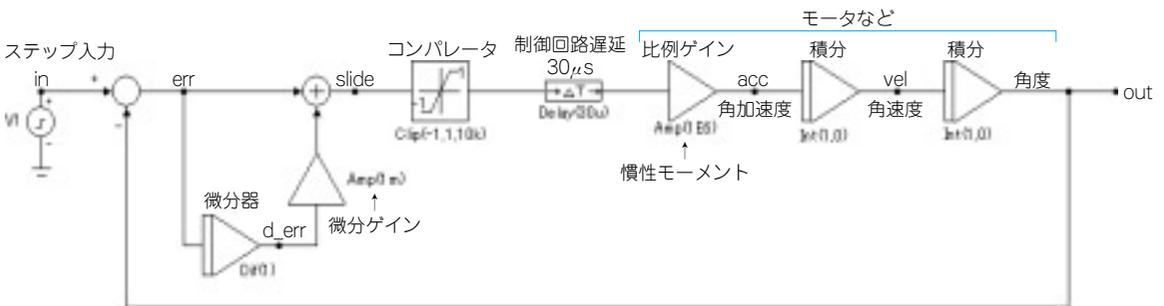


図7-3 スライディング・モード制御のシミュレーション回路