

サーボモータをモデルにした フィードバック制御技術の研究

電子部 電子科 小田原 幸生

1. はじめに

フィードバック制御技術は化学プラントにおけるプロセス制御，数値制御工作機械やロボットにおけるサーボ機構などに応用されている。従来は大企業が中心になって研究開発を行っていたが，今日では中小企業の分野においても身近になりつつある。

フィードバック制御はエレクトロニクス技術の発展により利用し易くなっているが，制御系の設計において特殊な解析技法を要するため一般技術者にはなじみにくい面がある。そこで今回，制御機構の代表例として今日のメカトロニクス技術を発展させる原動力となったサーボモータをモデルとして制御回路を試作し，フィードバック制御系の解析及び制御の実験を行った。

なお試作及び解析にあたっては文献1，2を参考にした。

2. 試作の概要

試作したサーボモータ（以下モータとする）制御回路の構成を図2-1に示す。

マイクロコンピュータ（以下マイコンとする）はモータの回転の指令，位置決め終了の検出などを行う。（マイコンは昭和59年度業務年報「Z80マイクロコンピュータの開発」で製作したものを使用）

マイコンは，プログラムに従ってモータを正転または逆転させるための回転指令パルス信号（ $\overline{IN+}$ ， $\overline{IN-}$ ）を連続的に制御回路に出力する。ここでパルス信号の間隔により回転速度が，また数により回転量が決まる。

制御回路はマイコンからの信号を受け，モータと連動したロータリ・エンコーダ（以下エンコーダとする）からのフィードバック・パルス信号（ \overline{PFB} ， \overline{MFB} ）との偏差を12ビット・アップ・ダウン・カウンタによる偏差カウンタで計数し，この出力をD/A

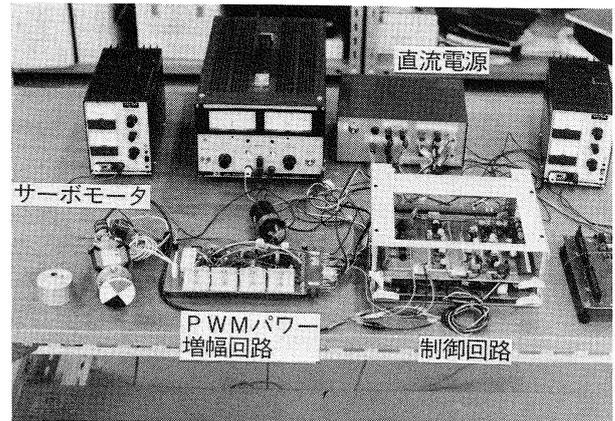


写真1 制御回路

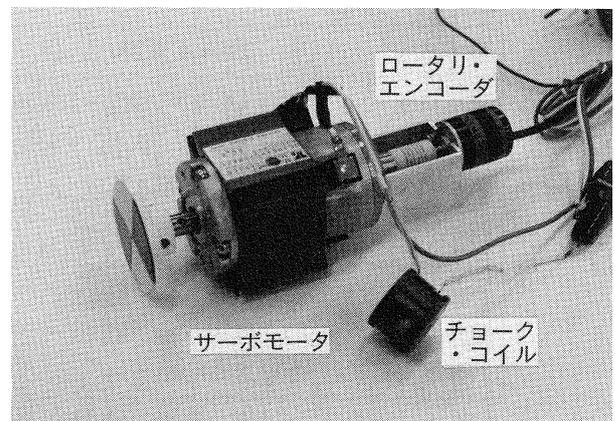


写真2 DCサーボモータ及びロータリ・エンコーダ

変換して速度指令信号（ V_{com} ）とする。

次に速度制御回路により V_{com} に対してモータ回転速度検出回路（F/V変換器）からの信号（ V_{fb} ）によるフィードバックをかけ，積分型速度制御を行う。

次の電流制御回路では，速度制御回路からの信号に対してモータ駆動電流検出回路からの信号（ I_{fb} ）によるフィードバックをかけて積分型電流制御を行い，電流指令信号（ V_c ）を出力する。

PWMパワー増幅回路では V_c をPWM（パルス

幅変調) 変換してパワー MOS・FET のスイッチング制御を行い、モータ駆動電流 (Im) を制御している。

速度制御回路における回転速度のフィードバックは、機械系におけるバネ振動に置き換えれば速度に比例した抵抗 (粘性抵抗) として作用する。コンデンサ (C10) は直流・低周波成分を積分して大きなゲ

インを得るために使用されている。

電流制御回路はモータの電機子インダクタンスを見掛け上小さくし、応答性を高める働きがある。

試作機を写真 1~2 に、制御回路を図 2-2~2-6 に、モータの仕様を表 2-1 に、エンコーダの仕様を表 2-2 に示す。

表 2-1 サーボモータ仕様

型 式	ミナーシャモータ Jミニシリーズ (UGJMEE-02SB2)	メーカー名	(株)安川電機製作所
定格出力	17.8W	ロータ・イナーシャ	0.151kg・cm ²
定格トルク	1.73kg・cm	電機子抵抗値	2.66Ω
定格回転数	1000rpm	誘起電圧定数	7.4mV/rpm
定格電圧	18V	トルク定数	0.721kg・cm/A
定格電流	2.9A	機械的時定数	8.1ms
パワーレート	1.9kW/s	電氣的時定数	0.9ms
瞬時最大トルク	7.0kg・cm	概略重量	0.85kg
瞬時最大電流	10A		

表 2-2 ロータリ・エンコーダ仕様

型 式	E6A-CW100	メーカー名	立石電機(株) (オムロン)
電源電圧	DC 5 V-10%~12V +10% リップル (P-P) 5%以下	出力形態	オープンコレクタ出力
消費電流	20mA MAX	出力容量	印加電圧 DC30V MAX シンク電流 6mA MAX
分解能	100p/rev	最高応答周波数	5 kHz
出力相	A相, B相	出力位相差	90°±45°
起動トルク	3 g・cm MAX		
慣性二次モーメント	1 g・cm ² MAX	重量	35 g
許容最高回転数	5000rpm		

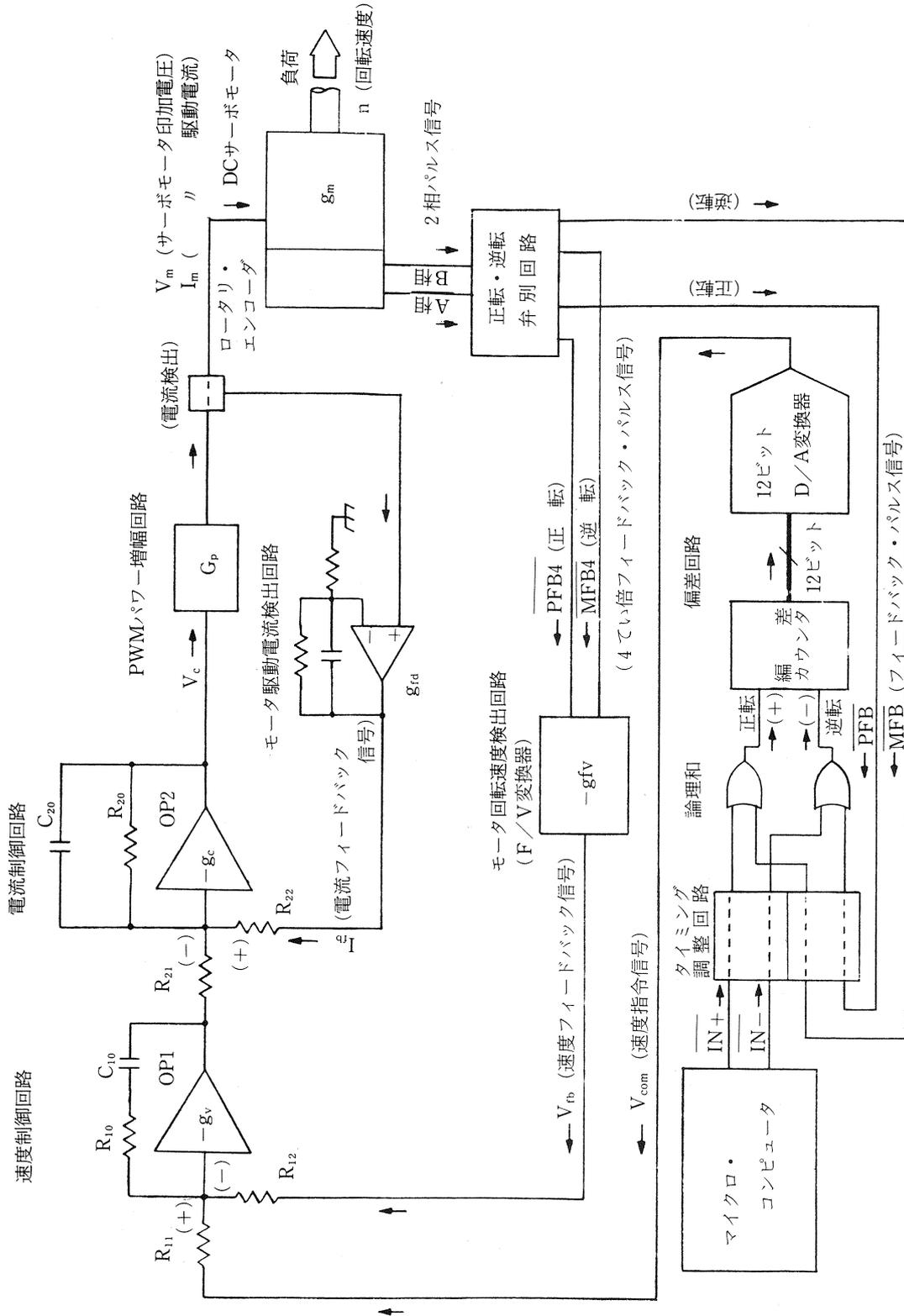


図 2-1 試作制御回路の構成

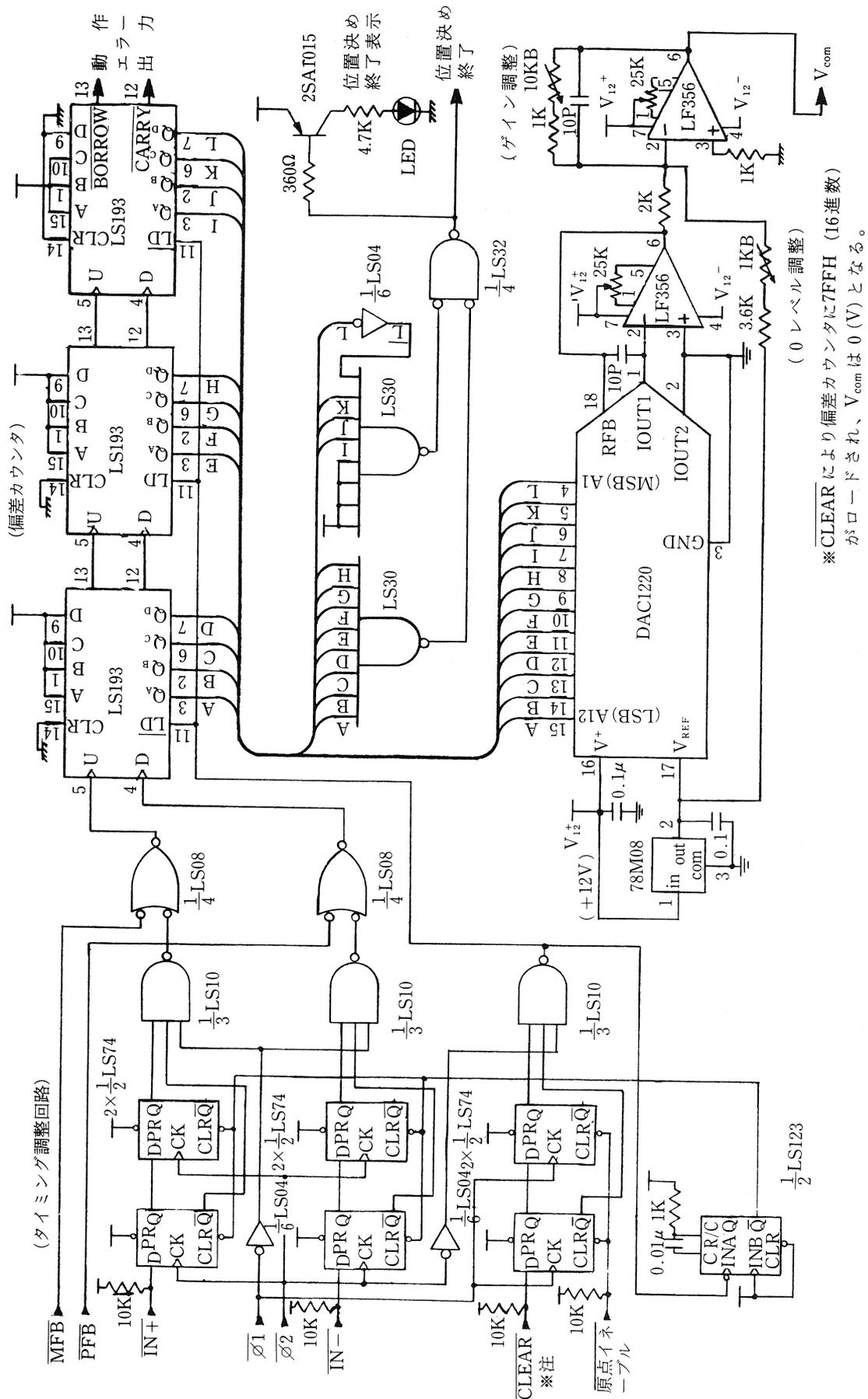
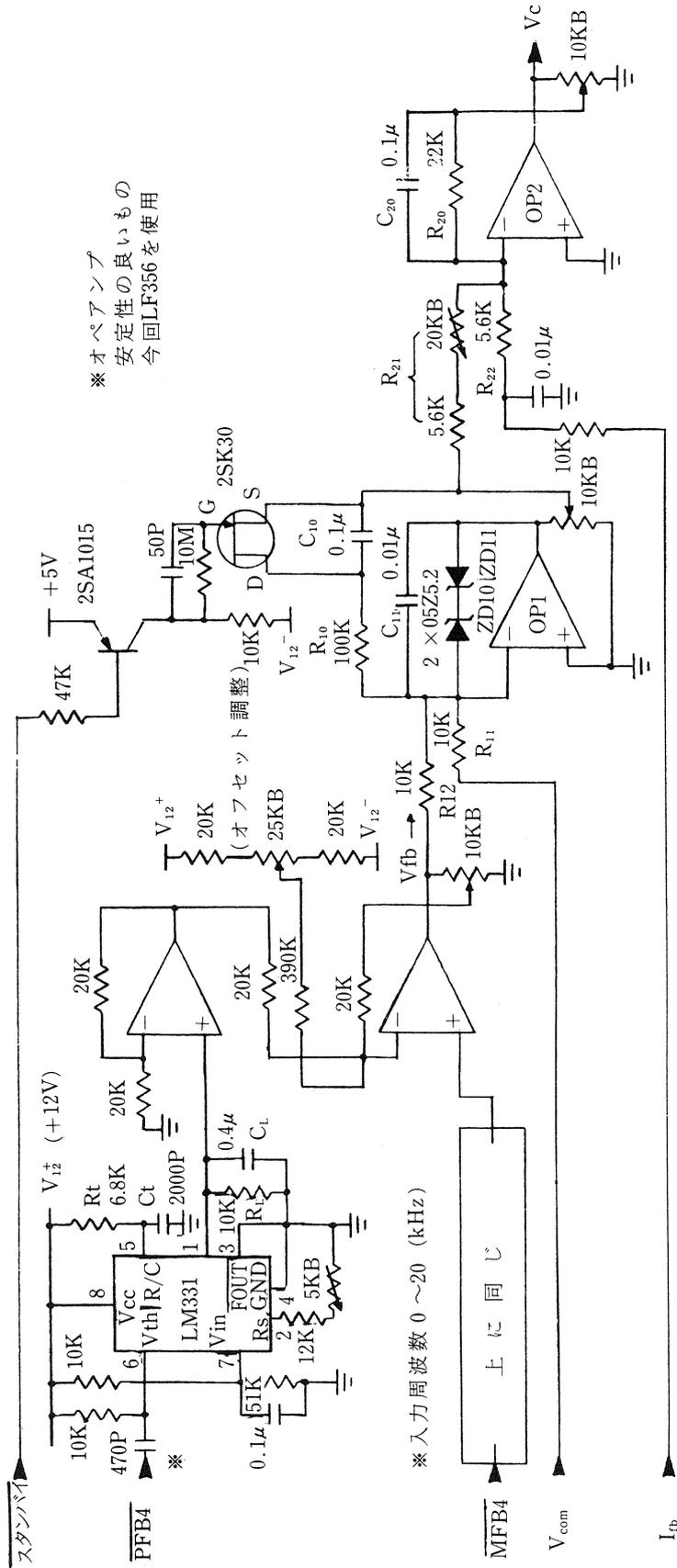


図2-3 マイコンとのインターフェース (偏差回路)



〔速度制御回路〕

〔速度検出回路 (F/V変換器)〕

〔電流制御回路〕

図 2-4 回転速度検出及び制御回路

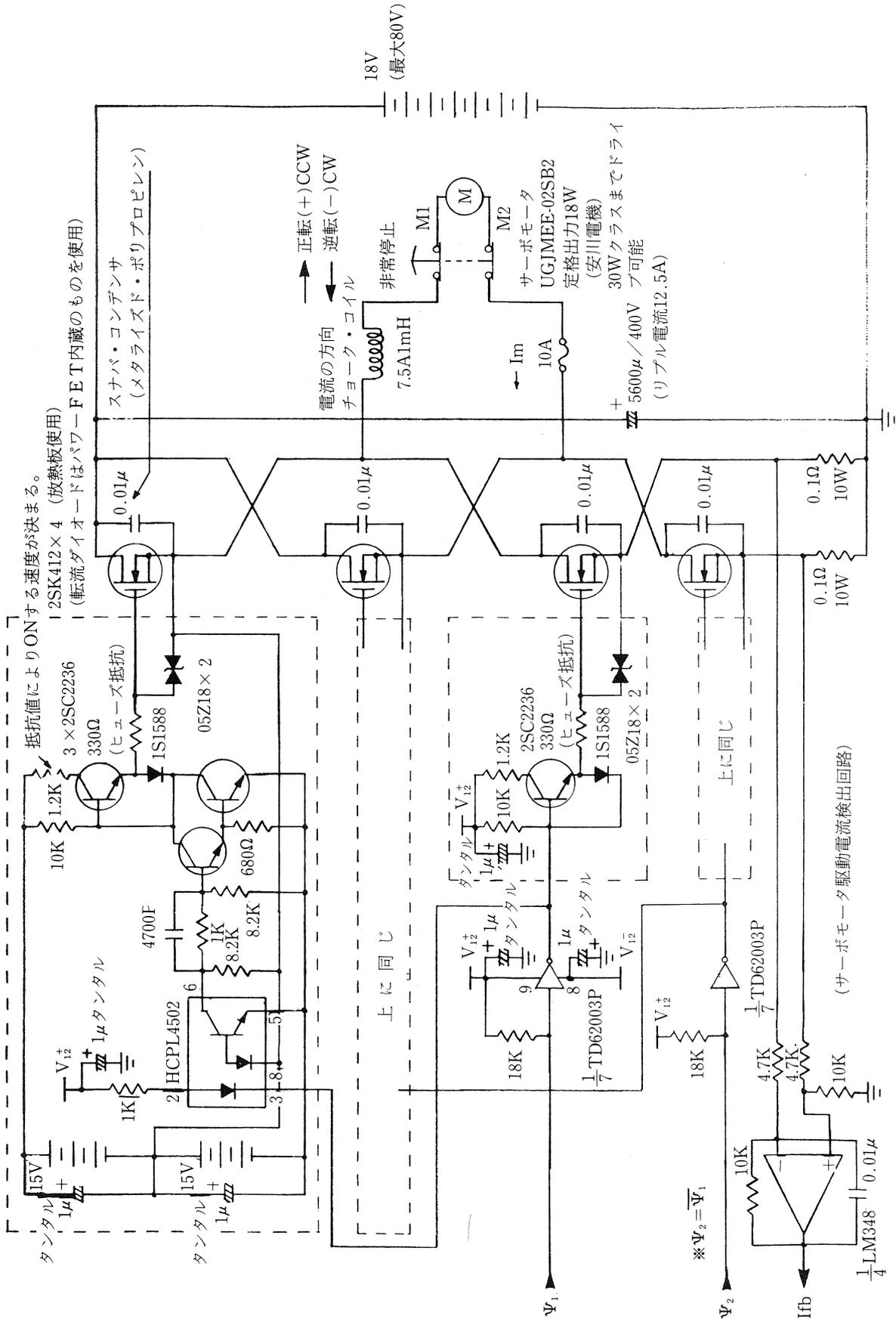


図2-6 PWMパワー増幅回路

3. 制御回路の特性試験

モータの負荷を変え、モータの起動・停止におけるモータ回転速度、駆動電流などの変化を調べた。試験前に次のような制御回路の調整を行った。

○速度制御回路

Vcom のレンジを-8~+8 (V) に調整。

(Vcom のゲインを大きくすればモータの起動・停止は早くなる。)

Vfb (モータ回転速度のフィードバック) のレンジは Vcom のレンジの1/5程度に調整。

○モータの回転及び起動・停止がスムーズ。

○位置決めの際に行き過ぎがない。

○停止時に音や振動が発生しない。

なお、今回の試験及び後述の“4. 制御回路の解析”, “5. 制御系のステップ応答” ではモータ駆動電流検出によるフィードバック制御は行っていない。(Ifb=0 V)

3.1 試験条件

① モータの起動・停止

マイコンにより制御回路に一定周波数 (2 kHz) の回転指令パルス信号 ($\overline{IN+}$ または $\overline{IN-}$) を与えてモータを起動させた。(モータ回転数=毎秒20回転定格回転数の1.2倍) また、このパルスを止めることによって回転を停止させた。

② モータの負荷

モータのロータのイナーシャ (慣性二次モーメント) を基準に0.6倍 ($\Phi 50 \times 5$, $k=1.6$), 3.3倍 ($\Phi 50 \times 30$, $k=4.3$) のアルミ製慣性負荷をモータの軸に取り付けて試験を行った。

○ $k = (J_m + J_l) / J_m$

Jm : モータのロータ・イナーシャ

Jl : 負荷のイナーシャ

(負荷の形状を図3-1に示す)

3.2 測定項目

① Vcom モータ回転速度指令電圧 (V)

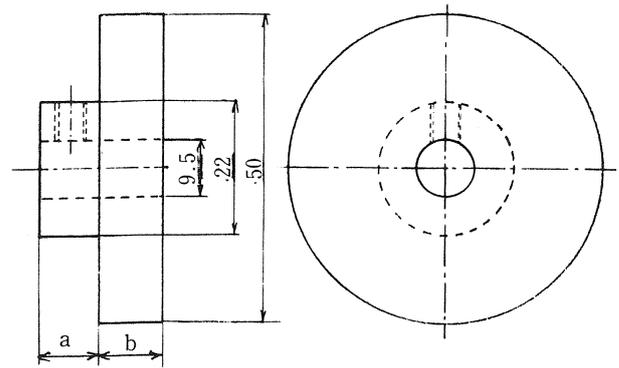
② n モータ回転速度 (rev/s)
(F/V 変換器出力を測定)

③ Vc 電流指令信号

④ Im モータ駆動電流 (A)
(回生電流も含まれる)

(測定機器)

○デジタル・ストレージ・オシロスコープ



	Φ50×5 負荷	Φ50×30 負荷
a, b (mm)	a=10, b=5	a=7, b=30
重量 (g)	34	159
慣性二次モーメント J _l (kg・cm ²)	0.09	0.50
k (= (J _l +J _m)/J _m)	1.6	4.3
J _m (モータ・ロータ・イナーシャ)=0.15kg・cm ² (材質) アルミニウム (ρ=2.7g/cm ³)		

図3-1 負荷の形状

○電流プローブ増幅器

○X-Yレコーダ

3.3 試験結果

試験結果を図3-2~図3-5に示す。

モータ回転速度 (n) の波形は、F/V 変換器出力に高周波成分が含まれており、デジタル・ストレージ・オシロスコープのサンプリング周期が長かったために実際の波形とは異なっている。

負荷の大小に係わらず、モータが停止状態から定速回転に達するまでの時間が約0.2秒、定速回転から完全に停止するまでの時間が0.3~0.4秒と一定している。停止時間が長いのは位置決めを伴うためである。

今回の試験で、起動・停止の際の Vc や Im のオーバーシュートや振動の発生は制御感度を高めるためにはある程度やむをえないが、負荷に歯車などを使用した場合などに問題があり、この現象の影響を出来るだけ小さくすることが今後の課題である。

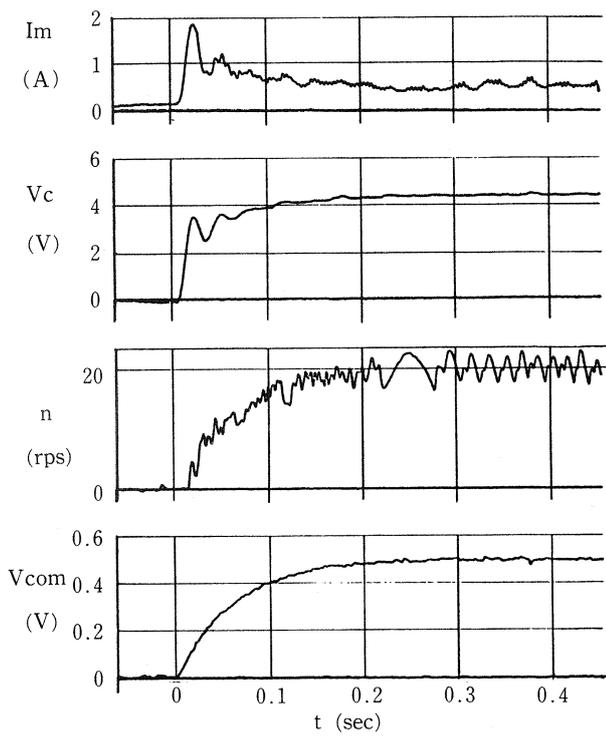


図3-2 Φ50×5負荷 (k=1.6) 起動

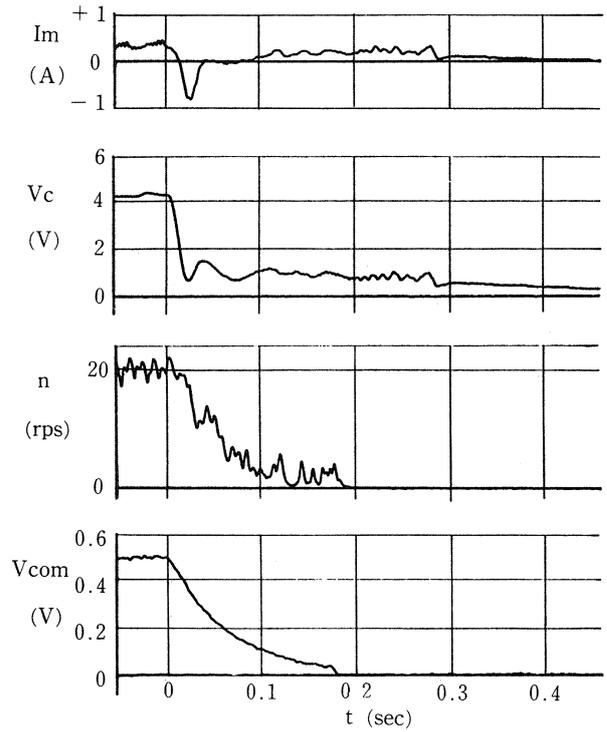


図3-3 Φ50×5負荷 (k=1.6) 停止

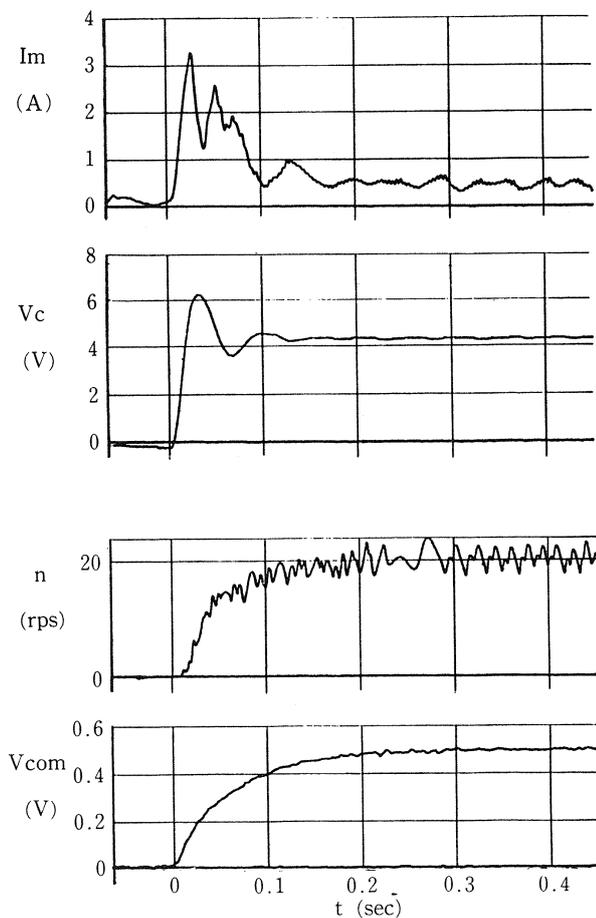


図3-4 Φ50×30負荷 (k=4.3) 起動

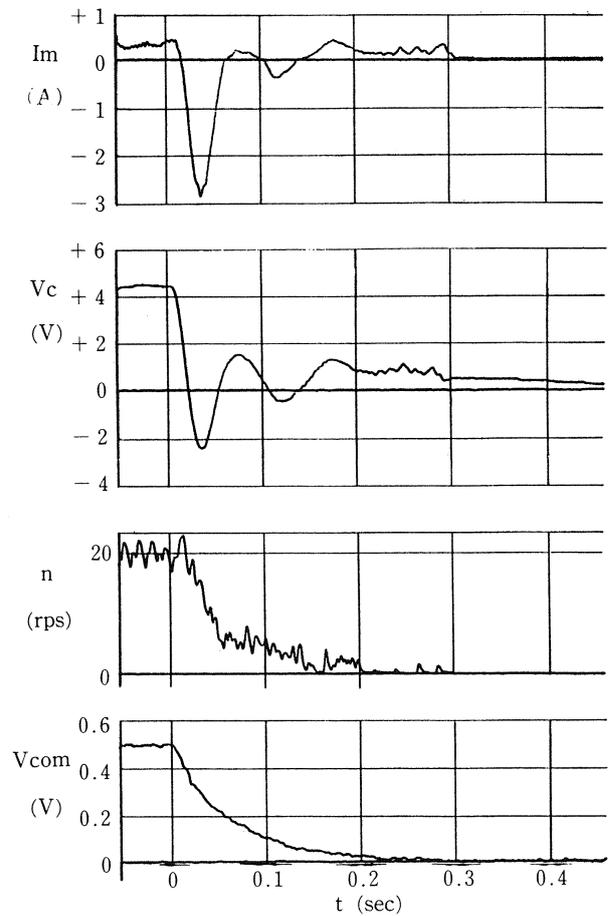


図3-5 Φ50×30負荷 (k=4.3) 停止

4. 制御回路の解析

ボード線図は比較的簡単に作成でき、制御回路の安定性の判定に大変役立つ。そこで、ボード線図を作成し、制御系のステップ応答の実験との比較を行った。

4.1 制御回路の伝達関数

① DC サーボモータの伝達関数は次の様に表われる。

$$N/V = \frac{Kt/(jLa)}{[S^2 + S \cdot Ra/La + Ke \cdot Kt/(jLa)]} \quad (A)$$

一般の機械的時定数の大きいモータで、
 $\tau_m \gg 4\tau_e$

が成立する時は(A)式は近似的に

$$N/V = 1/[Ke(s\tau_m + 1)(s\tau_e + 1)] \quad (A')$$

となり、機械的時定数と電気的時定数の一次の系の積として表せる。今回は(A')式を用いた。

$$G_m = 1/[Ke(s\tau_m + 1)(s\tau_e + 1)]$$

(単位 rad/sV)

s : ラプラス演算子 ($s = i\omega = i \cdot 2\pi f$)

i : 虚数

ω : 角速度 (rad/s)

f : 周波数 (Hz)

N : モータ回転速度 (rad/s)

V : モータ印加電圧 (V)

Ke : 誘起電圧定数 (Vs/rad)

τ_e : 電気的時定数 (=La/Ra) (s)

τ_m : 機械的時定数 (=Ra J/Ke Kt) (s)

Kt : トルク定数 (Nm/A)

La : 電機子インダクタンス (H)

Ra : 電機子抵抗 (Ω)

J : モータ・ロータ・イナーシャ (Kgm^2)
 (負荷のイナーシャも含む)

② F/V 変換器伝達関数

$$G_{fv}(s) = V_{fb}/N \quad (\text{単位 } Vs/\text{rad}) \\ = K_{fv}R_L / (1 + R_L C_L s)$$

V_{fb} : モータ回転速度フィードバック電圧 (V)

K_{fv} : 比例定数 (As/rad)

③ 速度制御回路伝達関数

$$G_v = (-R_{10}/R_{11}) [1 + 1/(SR_{10}C_{10})]$$

(単位 V/V)

(R₁₁=R₁₂としている)

④ 電流制御回路伝達関数

$$G_c = -R_{20} / [R_{21} (s R_{20} C_{20} + 1)]$$

(単位 V/V)

⑤ 制御回路全体のゲイン

$$G_v G_c G_p G_m (V_{com} - G_{fv}N) = N$$

但し電流フィードバックはゼロ ($I_{fb} = 0$)

これを整理して

$$N/V_{com} = \frac{G_v G_c G_p G_m}{1 + G_v G_c G_p G_m G_{fv}}$$

(単位 rad/sV)

G_p : PWM パワー増幅回路ゲイン (V/V)

(G_p = $\alpha \cdot V_m/V_{pw}$)

α : 制御回路出力調整用トリマ抵抗ゲイン他

V_m : モータ駆動電源電圧

V_{pw} : PWM キャリヤ波 (図2-5②)

片振幅電圧

4.2 解析結果

試作制御回路のボード線図を図4に示す。

10 (Hz) 以下はゲインが一定であり、図中①～③のピークを持ち、負荷が大きいほど制御系の周波数帯域が狭くなっていることが分かる。①～③のピークは後述のステップ応答におけるオーバシュート(アンダシュート)の大きさ、振動周波数に関係している。速度指令信号(V_{com})に対する定常状態での回転速度(n)の大きさは計算結果と実測とではほぼ一致している。

5. 制御系のステップ応答

解析結果と比較するために、制御回路の速度指令信号(V_{com})入力部に0.4 (V)のステップ信号を与え、モータ回転速度の変化を調べた。測定結果を図5に示す。なお、モータ回転速度はF/V変換器の出力を測定した。この際、F/V変換器の出力が非常に粗いため、デジタル・ストレージ・オシロスコープのアベレージング機能を使い、トリガ信号V_{com}のトリガ・レベルをわずかに変えて16回測定し、その平均値をX-Yプロットで作図している。

各負荷におけるステップ応答を見ると、オーバシュート、アンダシュートを生じており、負荷が大きいほど起動・停止時間が長い。また、起動時間よりも停止時間の方が短く、停止時の方がアンダシュートが大きく、振動周波数も高くなっている。

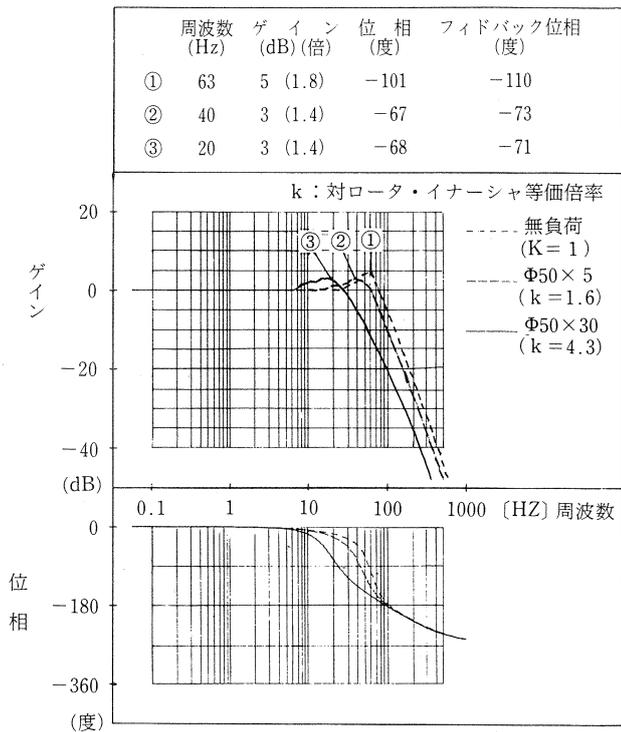


図4 試作制御回路のボード線図

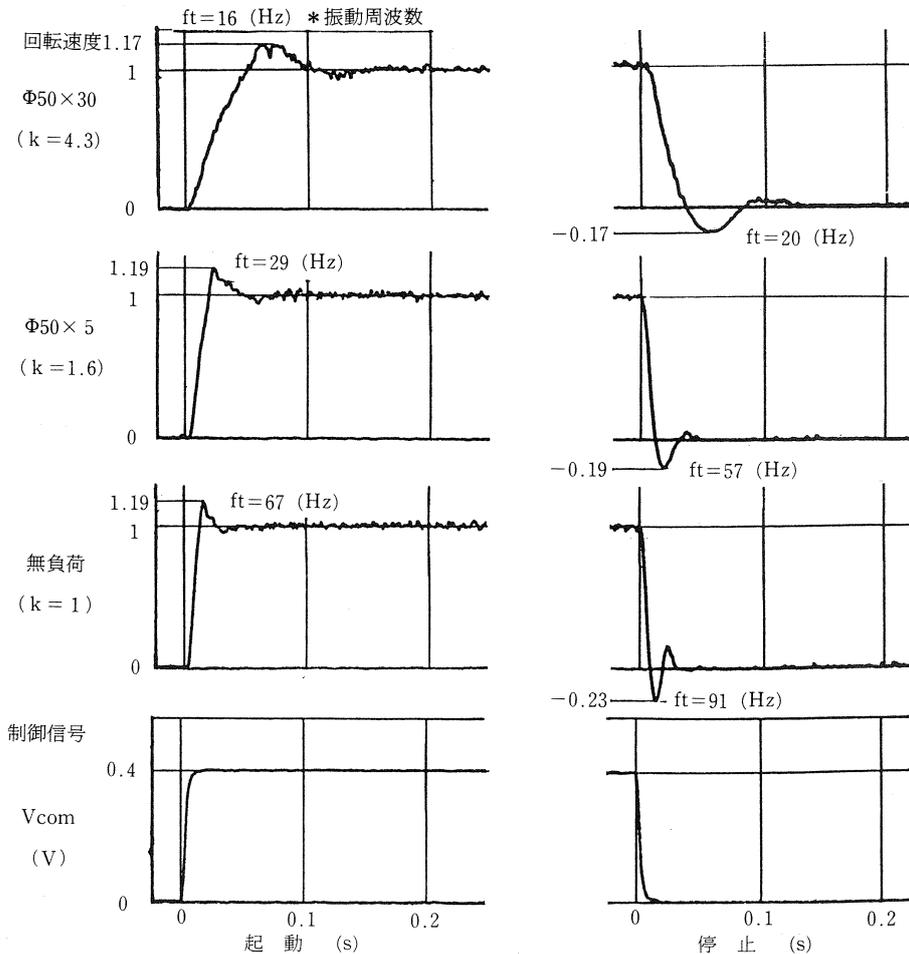


図5 制御系のステップ応答

6. 解析結果及びステップ応答についての考案

6.1 ボード線図とステップ応答の関係

ボード線図における周波数特性とステップ応答の間には次のような関係があり、前者から後者の模様を推定出来る。(文献3)

① $tr = 1.3 \times 1000 / 2\pi fp$ (ms)

② $fp = ft$ (Hz)

③ $C_{peak} = 0.85 M_p$

(*注 この関係は $M_p = 1.3 \sim 1.5$ の系に対して良く当てはまる。)

tr : ステップ応答の立ち上がり時間 (ms)

(出力が10~90%までに要する時間)

M_p : 閉ループ・サーボ機構のボード線図におけるゲインのピーク値

(低周波数域におけるゲインを1とする。)

fp : M_p における周波数 (Hz)

C_{peak} : ステップ応答におけるオーバシュートの大きさ (定常状態を1とする。)

ft : オーバシュートの振動周波数 (Hz)

(Mp, fp は図4の①~③の点の数値。)

この関係を比較するためにボード線図 (図4) に対応するステップ応答 (図5) について表6にまとめた。

(表6には起動時と同様の考え方で、停止時の立ち下がり時間 (tf), アンダシュートの大きさ (Cpeak) を求めて記入している。)

関係式①による tr (tf) の推定値と実測値の比較

では、実測値の方がかなり大きい値となっている。

関係式②で、ボード線図のピーク周波数 (fp) とステップ応答の振動周波数 (ft) を比べると、起動時の方が近い数値となっている。

関係式③のピーク比 (Mp) によるオーバシュート (Cpeak) の推定値とステップ応答の実測値を比較すると、近い値のものもあるが全体的に見て実測値の方が小さい。

これらの原因について次に考察を行う。

表6 ボード線図における周波数特性とステップ応答との関係

負荷	ボード線図 (図4)				ステップ応答 (図5)		
	ピーク周波数 fp	ピーク比 Mp	tr推定 $\frac{1.3 \times 1000}{2 \pi fp}$	Cpeak推定 $0.85 \times Mp$	振動周波数 ft起動時 (停止時)	Cpeak オーバ・シュート アンダ・シュート	tr (tf)
無負荷 (k=1.0)	63Hz	1.8倍	3 ms	1.5倍	67Hz (91)	1.19倍 (-1.23)	7 ms (6)
Φ50×5 (k=1.6)	40	1.4	5	1.2	29 (57)	1.19 (-1.19)	11 (8)
Φ50×30 (k=4.3)	20	1.4	10	1.2	16 (20)	1.17 (-1.17)	36 (20)

6.2 サーボモータの機械的損失による影響

今回の実験で、機械系の損失で最も大きかったのはモータのブラシと整流子の間の摩擦抵抗などで、静止トルクで0.15 (kg・cm) 程あった。これを (6.1) の関係式①により、ボード線図の fp から推定した tr によって計算した起動トルクと比べた場合一桁位オーダーが小さいので、影響としては小さいと思われる。

6.3 速度制御回路における出力制限用ツェナー・ダイオードの影響

速度制御回路において出力を制限するためツェナー・ダイオード (ZD10, ZD11) を使用し、速度制御回路への入力信号が一定レベルを越えると (入力レベルが高いほど) 出力ゲインが下げられる構造になっている。この点が “4. 制御回路の解析” を行った際の仮定と大きく異なっている。(実際は伝達関数が非線形特性) このために起動・停止時間は長くなるが、制御回路の安定性は増す。

(ツェナー・ダイオードに印加する信号電圧が小さくなるように速度制御回路への信号入力レベル等を調節し、その分だけ後段の電流増幅回路等のゲイン

を上げれば、制御回路の開ループ・ゲインは前と同じであってもツェナー・ダイオードを通して流れる電流は少なくなり、この影響は小さくなる。)

6.4 サーボモータの起動時と停止時における制御回路のゲインの違い

“5. 制御系のステップ応答” で述べたように、起動時のオーバシュートよりも停止時のアンダシュートの方が大きく、振動周波数 (ft) も高い。また、起動時間 (tr) よりも停止時間 (tf) の方が短い。このことから制御回路のゲインは見掛け上停止時の方が大きくなっているように思われる。これは、モータの機械的損失や回生電流の流れ方の違いなどの要因が制御方向に対してプラス方向に作用するか (停止時)、マイナス方向に作用するか (起動時) の違いによるものと思われる。今回の実験ではモータ駆動電流検出によるフィードバック制御を行っていないが、これを行えば起動時と停止時の制御回路のゲインの違いは小さくなると思われる。

6.5 サーボモータの最適調整 (参考)

普通サーボ機構では、

○ピーク・ゲイン Mp=1.3ぐらい

$$(C_{peak} = 0.85 \times M_p = 1.105)$$

○位相余有 $\psi = 45^\circ$ 程度

がとられているという。(文献3)

7. まとめ

(1) モータ回転速度検出用 F/V 変換器の設計

F/V 変換器の設計で問題になる点は、モータが低速回転の際に出力が断続的になることと、モータの起動・停止時にミリ秒オーダーの応答遅れを生じることである。

今回は $\tau L (=RL \times CL)$ を 0.4 (ms) とし、エンコーダ分割数の 4 倍のフィード・バックパルス信号 (PFB4, MFB4) を入力して回転速度を検出したが、さらに分割数の多いエンコーダを用いれば入力パルス数を上げて出力のリプルを小さくすること

ができ、低速回転時の制御特性を向上させることができるものと思われる。

(2) フォト・アイソレータによる

制御回路とパワー増幅回路の絶縁

パワー増幅回路ではモータ駆動電流を制御しているので大きなノイズ源になっている。図2-5と図2-6による回路では制御回路とモータ電源回路が共通グランドであるために、ここを通してノイズが侵入し、制御回路の偏差カウンタをミス・カウントさせる。そこで、フォト・アイソレータを用いて制御回路とパワー増幅回路の絶縁 (アイソレーション) を行った。(図7参照)モータ駆動電流の検出もカレント・トランス等を利用して絶縁して行う必要があるが、今回は省略している。

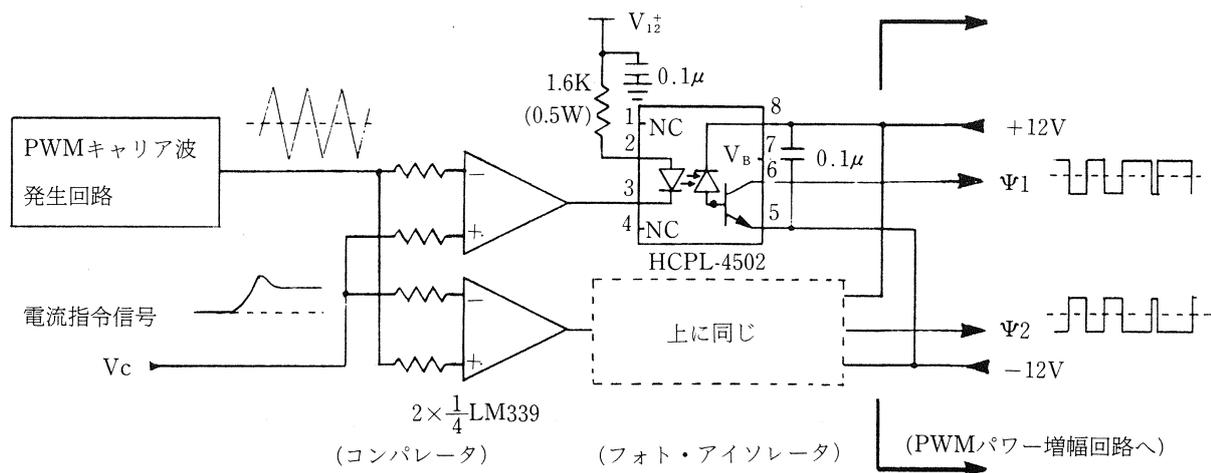


図7 フォト・アイソレータによる制御回路とパワー増幅回路の絶縁

今回使用したモータは恐らくベアリングの状態が悪かったためと思われるが、回転中に時々モータから異常音を発生し、従来の回路ではモータが目標位置に止まらずに誤動作する事があった。この回路に変更した結果、誤動作が無くなっただけでなく、マイコン及び制御回路からパワー増幅回路に伝わっていたノイズがカットされてモータの作動音が静かになるという効果があった。

9. おわりに

今回の試作によりサーボモータ制御回路の設計、マイコンとのインターフェース、ボード線図による解析、試験、評価方法についての基礎を確立するこ

とができた。サーボモータの大容量化、高速化についても基本的な部分は今回の例を参考にしてある程度対応できるものと思われる。今後さらに研究を進めて大容量化への対応やシステムの信頼性の向上、プロセス制御などへの応用等において県内企業のメカトロニクスの技術相談に応えられるものにしていきたいと思う。

ここで、今回の試作及び実験に際してご助言いただいた (株)安川電機製作所 川越 敏昭氏 (大分県高度技術開発研究所 主任研究員) に深く感謝いたします。

(今回の研究について、さらに詳細な資料を用意していますので、必要なお方はお申し出下さい。)

(参考文献)

- (1) トランジスタ技術
(1986年2月号 p.361~376)
DC サーボ・モータの制御
常田晴弘/吉村 泰純 著
- (2) (トランジスタ技術別冊)
センサ・インターフェーシング No.2
(1983年4月初版 p.187~200)
DC サーボ・モータの制御方法
越野 昌謙 著
- (3) サーボ機構 (1. サーボ機構の基礎)
大島 康次郎/荒木 献次 著
(オーム社書店 1965年第1版)