

フィルタ周波数特性測定システム とその教育訓練への利用について

— GP — IB によるフィルタ周波数特性自動測定システムの構築 —

香川職業能力開発短期大学校

稲益悦夫・望月隆生・島本裕

Measurement System of Frequency Characteristics of Filters Using Time Responses,
and Its Application to Educational Training

— Automatic Test System of Frequency Characteristics of Filters Using GP—IB Interface —

Etsuo INAMASU, Takao MOCHIZUKI, Yutaka SHIMAMOTO

要約 通信・計測や音声信号処理、画像信号処理等の分野ではアナログ・フィルタが多数利用されている。本報告では、これらのアナログ・フィルタを利用する際に必要となる周波数特性の測定を短時間でかつ精密に行う方法について提案している。

通常、アナログ・フィルタの周波数特性を測定するにはネットワーク・アナライザやスペクトラム・アナライザまたは周波数シンセサイザとゲインフェーズメータ（利得位相差計）を組み合わせた測定系などの高価な測定器が必要である。これに対して、本報告では、近年普及が進んできたデジタル・オシロスコープを利用して時間域応答を計測し、高速フーリエ変換により周波数特性を求める方法を採用している。計測システムはGP—IBインタフェースを利用して構築している。フィルタへの入力信号は簡単に発生できる単発パルス信号を用いている。原理的にはA/D変換が可能な周波数帯域であれば、ネットワーク・アナライザ等の高価なシステムを用いることなく、安価なシステム構成でフィルタの周波数特性の精密な測定が可能であることを確認している。また、本報告のフィルタ周波数特性測定システムをGP—IB計測制御システムのプログラミング技術を習得するための実習教材として利用する方法について検討している。

I はじめに

コンピュータによる計測や制御の対象となる物理量は一般にアナログ信号であり、A/D変換器を通してコンピュータに入力される。また、A/D変換器の前段にはさらにアナログ・フィルタが使用される。

アナログ・フィルタは回路設計では不可欠な要素技術であるが、仕様を確定し設計・製作するまでにはかなりの労力を必要とする。特に、フィルタ試作時には周波数特性の測定確認が必要となる。今回、このアナログ・フィルタ試作時の周波数特性の測定を目的としてデジタル・オシロスコープを使用したフィルタの周波数特性自動測定システムの構築を試みている。

一般にフィルタの周波数特性はネットワーク・アナライザやスペクトラム・アナライザを用いて測定され

ている。また高精度な測定が必要な場合は周波数シンセサイザとゲインフェーズメータ（利得位相差計）を組み合わせた測定系が使用されている。これら周波数応答法による測定方法では直接的に周波数特性を測定できるが、正弦波信号源の周波数を掃引しなければならず測定に時間を要する。これに対して、フィルタのパルス信号入力に対する時間応答をデジタル・オシロスコープで測定し、FFT処理することによって周波数応答に変換する方法を用いることにより、安価なシステム構成でかつ短時間にフィルタの周波数特性を精度よく測定できることが期待できる。今回、GP—IBインタフェースにより時間応答によるフィルタ周波数特性測定システムの構築を試み、フィルタの通過帯域の上限付近まで高精度な測定が可能であり実用に供することを確認した。また、本システムは単にフィルタの

計測のみならず汎用の自動計測システムとして転用可能である。そこで、個々の機器の基本トレーニング用プログラムを付加してGP-IB自動計測プログラミングの実習用教材として再構成し教育訓練への利用について検討したので併せて報告する。

II フィルタ設計技術の教育訓練への適用

通信・計測や音声信号、画像信号処理等の分野ではアナログ・フィルタやデジタル・フィルタ等の各種のフィルタが使用されている。音声帯域等の比較的低周波帯のフィルタでは、OPアンプと抵抗器およびコンデンサを主要な部品とするRCアクティブ・フィルタが簡便であり、音声信号処理やメカトロ・センサ計測の現場等で数多く使用されている。今回、これらの分野で、特にアンチエイリアシング・フィルタとしてよく利用されているRCアクティブ・フィルタを試作評価できるようにすることを目的として、これに不可欠な周波数特性測定システムの構築を試みている。

ところで、フィルタ設計技術は古くから確立された分野であり電子回路設計においては必須の技術であるにもかかわらずあまり一般的ではなかった。これは、フィルタ関数の設計と設計製作及び測定・評価に多大の労力を要する点に起因していると考えられる。しかし、今日ではパソコンの急速な普及と性能向上やアナログ回路シミュレータ等のソフトウェアの普及によりフィルタの設計技術の習得と利用が身近で容易なものとなってきている。また、近年のICを始めとする電子部品の急速な低価格化により電子回路の試作を利用者が直接行う機会も増大している。このように、従来の技術がコンピュータ利用技術を適用することによりその利用促進が可能となる例は、制御系の設計などのフィルタ技術以外の分野でも見られるものであり、職業能力開発短期大学校（以下短大と略）における実践技術者の教育訓練にも適した題材になっている。

短大での実践技術者教育は「ものづくり」が原点にあるといわれている。コンピュータ技術が普及した今日、「ものづくり」にはプログラミングが大きな比重を占めてきている。そしてプログラミングにもソフト・ハードを熟知した上での技能的側面と創造性が要求されてきている。2年間という短期間の課程では、このようなプログラミング技術を付与することは困難が伴うが、今回採り上げたフィルタ技術は設計から試作測定にいたるまでの過程で、コンピュータの利用技術を短

期間で実習でき、「ものづくり」を側面から支える計測・制御の基本技術やプログラミング技術の基礎を習得する効果的な実習教材となる。

III フィルタ周波数特性の測定方法

1. 被測定フィルタの伝達関数

一般的にフィルタの設計では表1に示すような標準フィルタ特性が利用される。

表1 標準フィルタ特性の種類

フィルタ特性名称	特性曲線の形状
バターワース	振幅最大平坦
チェビシェフ	通過域波状
逆チェビシェフ	阻止域波状
連立チェビシェフ	波状-波状
ベッセル	遅延最大平坦

表1において波形歪が問題にならない用途の場合はバターワース特性やチェビシェフ特性のフィルタが、また原波形を忠実に処理したい場合はベッセル特性フィルタが利用される。アンチエイリアシング・フィルタのような急峻な周波数特性が要求される場合は連立チェビシェフ特性のフィルタが適用されることが多い。これらのフィルタ特性は一般に、複素周波数sの有理関数の形で与えられるがフィルタとして実現する場合は、次の2次の伝達関数の式

$$T_1(s) = K_1 \frac{a_1 s^2 + b_1 s + c_1}{s^2 + \omega_{p1}/Q_1 s + \omega_{p1}^2} \quad (1)$$

または、1次の伝達関数の式

$$T_0(s) = K_0 \frac{a_0 s + b_0}{s + c_0} \quad (2)$$

の積に因数分解して利用される。すなわち、一般的なフィルタの伝達関数は、

$$T(s) = \prod_{i=0}^n K_i T_i(s) \quad (3)$$

$$(i = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$$

で与えられる。表1の標準フィルタ関数では所望の特性が得られない場合は、(1)または(2)式のパラメータを変化させ伝達関数T(s)を所望の特性に逐次近似する手法がよく用いられている。

RCアクティブ・フィルタでは上記の1次や2次の伝達関数をそれぞれ基本フィルタ区間として実現し、これらを縦続接続して所望の周波数特性を実現している。

基本フィルタ区間としては、通常以下の5種類の伝達関数を持つフィルタが用いられる。^{[1]~[3]}

$$T_{LPF}(s) = K \frac{\omega_p^2}{s^2 + \omega_p/Qs + \omega_p^2} \quad (4)$$

$$T_{BPF}(s) = K \frac{\omega_p/Qs}{s^2 + \omega_p/Qs + \omega_p^2} \quad (5)$$

$$T_{HPF}(s) = K \frac{s^2}{s^2 + \omega_p/Qs + \omega_p^2} \quad (6)$$

$$T_{LPN}(s) = K \frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \omega_p/Qs + \omega_p^2} \quad (7)$$

(ただし $\omega_p < \omega_z$ のとき)

$$T_{HPN}(s) = K \frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \omega_p/Qs + \omega_p^2} \quad (8)$$

(ただし $\omega_p > \omega_z$ のとき)

極周波数 ω_p と伝送零周波数 ω_z を便宜上基準周波数 ω_0 に対する比 k_n を用いて、

$$\omega_p = k_n \cdot \omega_0 \quad (9)$$

$$\omega_z = 1/k_n \cdot \omega_0 \quad (10)$$

すなわち、

$$k_n^2 = \omega_p / \omega_z \quad (11)$$

とすると、 k_n と Q をパラメータとして、それぞれのフィルタ特性は図1のように描くことができる。

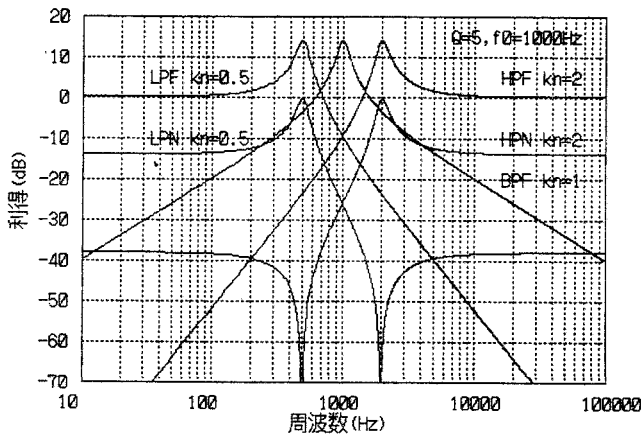


図1 2次の基本フィルタ区間の周波数特性

本報告では、図1の5種類の特性のフィルタ全ての精密な特性測定方法の確立を目標とし、特に測定が困難なLPN (Low Pass Notch) 特性に焦点を当てる。

2. フィルタ周波数特性の測定方法

基本的なフィルタ周波数特性の測定方法としては、大きく次の2つの方法があげられる。

- 1) 正弦波信号源の周波数を掃引しフィルタの入出力間の利得と位相差を測定する方法

- 2) 白色性入力信号に対するフィルタの時間応答出力をFFT処理する方法

1) は正確な周波数で純度の高い正弦波を発生できる信号源が必要であり周波数の掃引に時間を要するが、従来より適用されている標準的な測定方法であり、ネットワークアナライザ等で採用されている。2) はスペクトラムアナライザやFFTアナライザで適用されている。2) の範疇としてステップ応答やインパルス応答などの時間応答をFFT処理して周波数応答を求める方法があげられるが、あまり適用例は見かけられないので、今回新たに検討を試みることにした。以下に本報告の測定方法の原理について述べる。

【時間応答による周波数特性測定の原理】

フィルタ回路は、線形時不変な回路とみなすことができるので、単発のパルス信号入力に対する時間応答が零に収束すればフーリエ変換により周波数特性を求めることができる。以下にその原理を示す。

線形時不変な連続時間系においては、システム関数が $h(t)$ であるとき、システムの入力 $x(t)$ に対する出力応答 $y(t)$ は、

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

なる関係式で表現される。関数が $t \geq 0$ で定義される場合、(12) 式はラプラス変換して、

$$Y(s) = H(s) X(s) \quad (13)$$

と表される。(13) 式を、 $s = j2\pi f$ とおいて次式のように周波数 f の関数に書き改めると

$$Y(f) = H(f) X(f) \quad (14)$$

となる。これより入力信号 $x(t)$ として単発のパルス信号を使用し、出力応答 $y(t)$ のスペクトルを観測すれば(14)式によりシステムの周波数特性

$$H(f) = Y(f) / X(f) \quad (15)$$

を求めることができる。

スペクトルの観測については、時間応答 $y(t)$ の観測にて Δt 時間毎の時間系列を $y_k = y(k \Delta t)$ とすると、

$$Y_r = \sum_{k=0}^{N-1} y_k W_N^{kr} \Delta t \quad (16)$$

$$(r = 0, 1, 2, \dots, N - 1)$$

$$y_k = \frac{1}{n \Delta t} \sum_{r=0}^{N-1} Y_r W_N^{-kr} \quad (17)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N - 1)$$

なる離散的フーリエ変換対が得られる。ただし、 $W_N = e^{-j2\pi/N}$ である。さらに $N = 2^M$ となる場合は、級数の周期性と指数関数性によって、離散的フーリエ変換の計

算を大幅に短縮する高速フーリエ変換のアルゴリズムが適用できるので、時間応答 $y(t)$ の離散スペクトル $Y(f)$ が高速に計算できる。

入力信号として単発信号ではなく白色スペクトルの多重サイン波や擬似乱数パルスを利用した測定方式がFFTアナライザ等で使用されているが、これらは信号の発生や観測方法が複雑であり処理速度もパソコンの領域を越える。そこで、本検討では、発生が容易なステップ信号を使用し、これを直流成分を遮断する高域通過型フィルタを通し単発パルス信号化して用いている。高域通過型フィルタとしてはCR高域通過回路を用いて直流成分を回路の時定数を利用して減衰させ全体として時間応答を零収束させ、FFTを適用できるようにしている。これより被測定フィルタの入出力信号を測定した後FFT処理すれば(15)式より容易にフィルタ特性 $H(f)$ が計算できる。この場合入出力信号を同時に測定する必要があるが、ステップ信号入力が正確な波形で且つCR高域通過回路の周波数特性が既知であれば出力信号のみの測定でフィルタ特性が求められる。すなわち、CR高域通過回路の周波数伝達関数を $G(f)$ として $G(f)H(f)$ を改めて(14)式の $H(f)$ に代入すると入力がステップ信号であることから $X(f) = 1/j2\pi f$ となり、(15)式の代わりに次の(18)式を得る。

$$H(f) = j2\pi f Y(f) / G(f) \quad (18)$$

以上より、CR高域通過回路の特性が不明な場合は、フィルタの入出力信号を同時に測定し(15)式を用いて、また精密なステップ信号発生源と付加するCR高域通過回路の測定値がある場合は(18)式を用いて被測定フィルタの周波数伝達関数が求められる。

3. 数値シミュレーションによる測定条件の検討

本測定方法は数値計算上は(4)～(8)式の各フィ

ルタの伝達関数に $G(f)$ に対応する式

$$G(s) = \frac{s}{s + \omega_{hp}} \quad (19)$$

を乗じて全体のステップ応答を計算し、これをFFT変換して周波数特性に変換した後に(19)式の周波数特性を差し引いて元のフィルタ特性を取り出すことになる。したがって、測定に際しては、

- ① サンプリングの周期 Δt
- ② 採取するデータの点数 N
- ③ CR高域通過回路の遮断角周波数 ω_{hp}

を適切に定める必要がある。

サンプリング周期 Δt の逆数、すなわちサンプリング周波数 f_s は信号周波数の上限を f_{max} とするとサンプリング定理により、 $2f_{max} \leq f_s$ を満たすように定める必要がある。これより、①の Δt は、

$$\Delta t \leq 1 / (2f_{max}) \quad (20)$$

となるように定める。いっぽうFFT変換後の周波数の刻み、すなわち分解能は $\Delta f = 1 / (N\Delta t)$ となるので②のデータ点数 N は、分解能 Δf を指定し、

$$N = 1 / (\Delta f \Delta t) \quad (21)$$

とすればよい。③の ω_{hp} はステップ応答の直流成分を充分減衰させるように設定する必要がある。CR回路のステップ応答は $e^{-t/CR}$ であるから、 $t = 10\tau$ で約87dB程度まで充分減衰する。したがって時定数 $\tau (= CR)$ またはフィルタの応答の減衰時定数 $(= 2Q/\omega_p)$ の大きい方をデータ採取時間 $(N\Delta t)$ の10%程度にすればよい。これより次式を得る。

$$\sup(\tau, 2Q/\omega_p) = N\Delta t / 10 \quad (22)$$

図2に上記の(20)～(22)式を考慮して行った(7)式のLPN特性のシミュレーション結果を示す。ステップ応答の計算には細野の数値逆ラプラス変換を使用している。^[4] サンプリング周波数 $f_s = 50\text{kHz}$ にとり、データ点数 $N = 1024$ とし、 $\Delta t = 20\mu\text{sec}$ とし、中心周波数を $f_0 = 1\text{kHz}$ とし、 $0.01f_0 \sim 100f_0$ の4ディケード

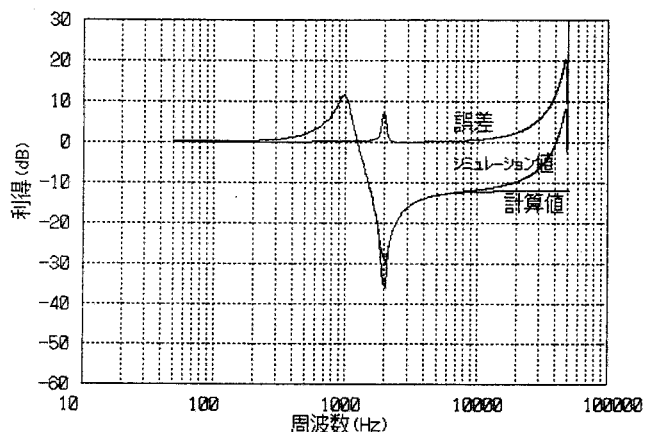
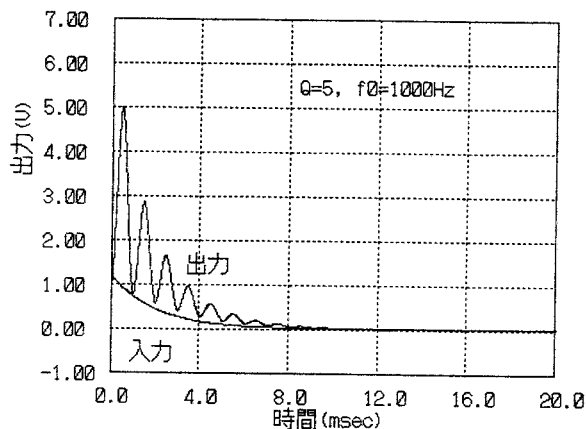


図2 ステップ応答のシミュレーションとFFT処理結果

の周波数範囲に亘って計算を行っている。シミュレーションの結果 10kHz 以上の範囲では誤差が増加している。測定する周波数範囲を $0.1f_0 \sim 10f_0$ の 2 デケードとし $f_{max} = 10f_0$ とすれば伝送零周波数付近を除き実用上十分な測定精度が得られる。これより、 Δt は (20) 式より小さい値に設定し $\Delta t = 1 / (5f_{max}) \sim 1 / (10f_{max})$ 程度としなければ上限周波数付近の誤差が大きくなるのがわかる。また、CR 高域通過回路の遮断周波数は $\omega_{hp} = 2\pi f_{hp}$ を (22) 式に代入し (21) 式の関係より、 $f_{hp} = 10 / (2\pi N\Delta t) \approx 1.6 \Delta f$ となる。以上より、測定周波数の範囲を 2 デケードとして測定条件をまとめると表 2 が得られる。

表 2 測定条件 (データ点数 $N = 1024$ の場合)

最大周波数 f_{max}	周波数分解能 Δf	サンプリング時間 Δt	HPF 遮断周波数 f_{hp}
1kHz	10Hz	0.1msec	16Hz
	20Hz	0.05msec	32Hz
	50Hz	0.02msec	80Hz
10kHz	100Hz	10 μ sec	160Hz
	200Hz	5 μ sec	320Hz
	500Hz	2 μ sec	800Hz
100kHz	1kHz	1 μ sec	1.6kHz
	2kHz	0.5 μ sec	3.2kHz
	5kHz	0.2 μ sec	8kHz

IV フィルタ周波数特性測定システム

1. GP-IB による計測システムの概要

今回構築したシステムを構成する機器の仕様は表 3 の如くである。パーソナル・コンピュータをコントローラとしてデジタル・オシロスコープ、ファンクション・ジェネレータ、FFT サーボアナライザ及びプロッタを GP-IB により接続している。これにステップ信号の発生源としてのトランジスタによる無安定マルチバイブレータが加わっている。

表 3 システム構成機器、回路の仕様・性能諸元

機器名	仕様・機能
プロッタ	0.025 ステップ、HP-GL
ファンクション・ジェネレータ	1 μ Hz ~ 2MHz、20Vp-p
無安定マルチバイブレータ	1.7Hz、デューティ 15%、5Vp-p
デジタル・オシロスコープ	100MHz、20Ms/s、8ビット
FFT サーボアナライザ	100kHz、16ビット

図 3 にシステム構成図を示す。本報告の測定系は線で囲まれた部分である。ファンクション・ジェネレータや FFT サーボアナライザは測定結果を比較検討するためのものである。

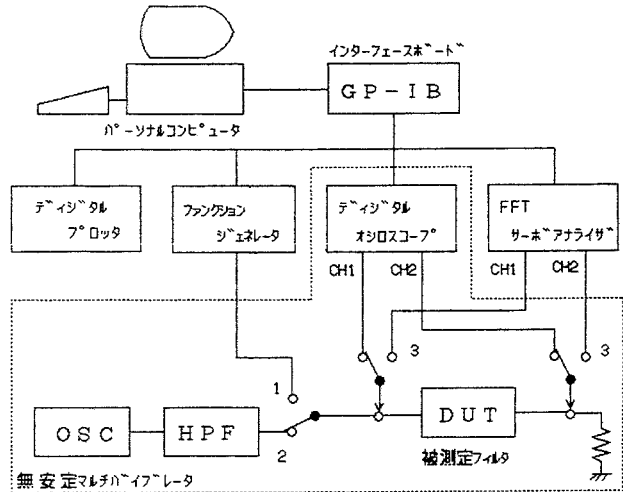
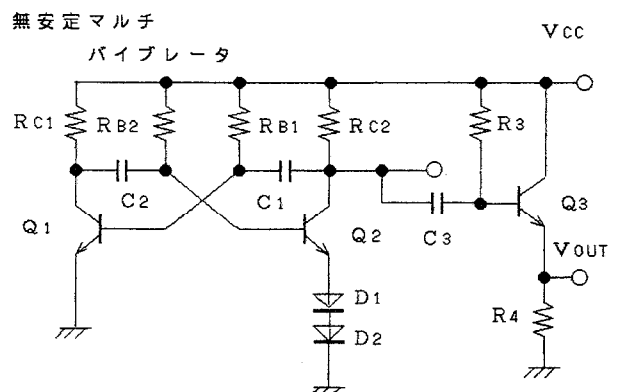


図 3 フィルタ周波数特性測定システム

図 3 の被測定系の CR 高域通過回路 (HPF 回路) の入力ステップ信号源 (OSC) としては図 4 に示すトランジスタによる無安定マルチバイブレータを使用している。無安定マルチバイブレータはネガティブエッジ出力側で急峻な遷移時間が得られ電源電圧 V_{cc} の可変範囲も広く、出力振幅のレベルをダイオードを組み合わせて調整することができる。



部品定数 単位 (Ω , F)

RC1	2k	C1	2.2u
RC2	2k	C2	2.2u
RB1	100k	C3	0.022u
RB2	470k	D1, D2	1S1588
R3	2k	Q1, Q2, Q3	2SC1815
R4	1k		

図 4 無安定マルチバイブレータ回路図

無安定マルチバイブレータの出力信号はHPF回路とエミッタフォロワを通し低インピーダンス化を図っている。図5に使用したマルチバイブレータの出力波形(HPF回路通過後)を示す。図5に示すように、出力波形のネガティブ・エッジを利用して負方向のピーク値と直流レベルを設定する際にフィルタの出力が飽和しないように注意する必要がある。

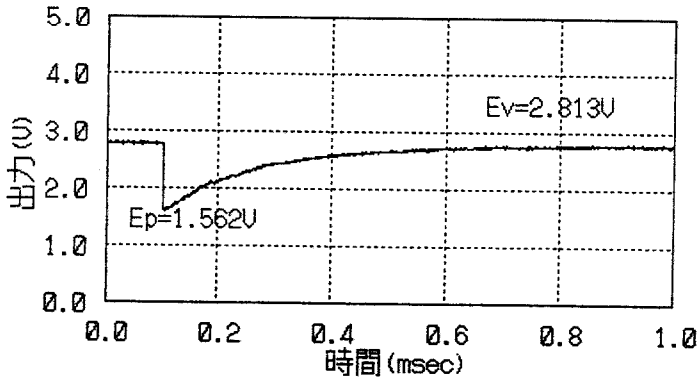


図5 ステップ信号波形の例

2. 測定プログラムの概要

GP-IBインタフェース規格は、1987年に上位プロトコルが標準化されデータ形式や文法、コマンドなどが統一されてきている。^[5]しかし、本質的にデータ転送、制御のみの規格であり、計測システムの構築に当たっては転送されたデータの処理加工は利用者がプログラムを作成する必要がある。GP-IBのプログラミングはBASIC言語が最もわかりやすいが、本検討ではFFT処理を使用するので演算処理速度が問題となり、C言語やアセンブリ言語を使用する必要がある。FFT処理については、現在では多数のアルゴリズムがある。今回はサイン・テーブルを使用した時間間引きによるアルゴリズムを選定している。GP-IB計測制御の部分のルーチンについては一旦BASIC言語で作成し、デバッグ完了後に手作業でC言語に変換している。最終的にプログラム全体としてはC言語で統一化を図っている。図6は測定プログラムの概要を示すフローチャートである。プログラムは以下の3通りの測定ルーチンよりなる。

- (1) 周波数応答法による測定ルーチン
- (2) 時間応答法による測定ルーチン
- (3) マルチサイン波法による測定ルーチン

(1) はファンクション・ジェネレータの出力を正弦波モードにしてフィルタに入力し周波数を掃引し入出力電圧を測定する方法であり、(2) は本報告で提案して

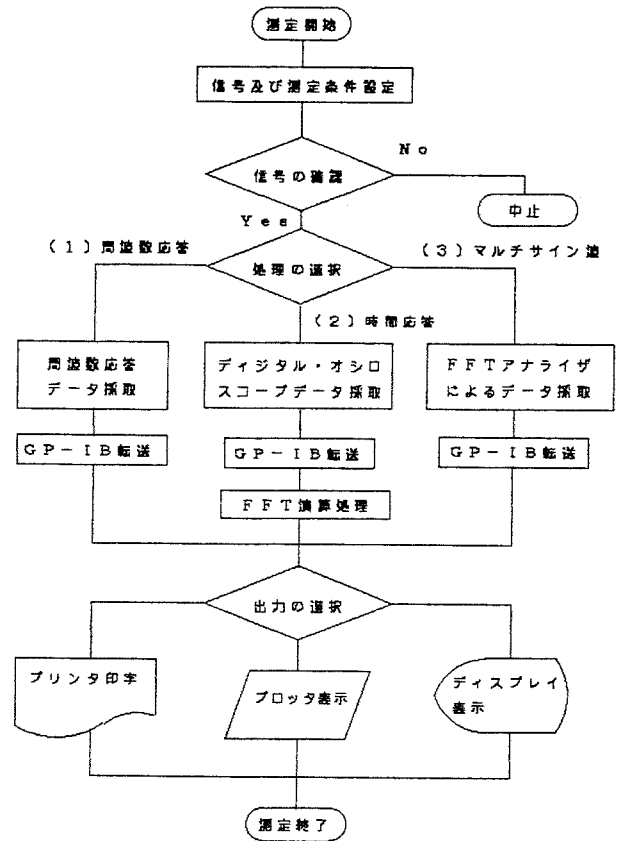


図6 測定プログラムのフローチャート

いる単発のパルス信号に対する出力の時間応答をフーリエ変換する方法である。(3)は専用器であるFFTサーボアナライザの周波数特性測定機能を利用するものであり、(2)の測定精度を比較するために使用している。また、測定終了後は、測定値を数表テーブルやグラフに加工して出力したり、他の測定方法の測定値や理論値などと比較検討したりする必要が生ずるので、これらのプログラムを事象駆動を指向してMS-DOS上の実行ファイルとして個々に作成し、メニュープログラムに登録して管理するようにしている。表4に作成した主なプログラムを示す。

表4 システムを構成するプログラムの一覧表

プログラム	機能の概要
FUNCTION. EXE	標準フィルタ関数の計算
BIQUAD. EXE	2次伝達関数の計算
TIME_RSP. EXE	フィルタ時間応答のシミュレーション
MEAS_FL1. EXE	周波数応答法による測定
MEAS_FL2. EXE	時間応答法による測定
MEAS_FL3. EXE	マルチサイン波法による測定
FREQ_RSP. EXE	時間応答のFFT処理
OUTPUT. EXE	結果の表示

各プログラムは図7の測定データ構造体を参照するとによりデータ形式統一化を図っている。

```
typedef struct {
    char filter_name[9]; // フィルタ名
    float FS; // 下限周波数
    float FE; // 上限周波数
    float GB; // 利得下限
    float GT; // 利得上限
    float PB; // 位相差下限
    float PT; // 位相差上限
    float TD; // データ採取時間
    int n; // データ点数
    float delt_t; // サンプル周期
    float vin[N]; // 入力データ
    float vout[N]; // 出力データ
    float GAIN[N]; // 利得
    float PHASE[N]; // 位相差
} FILT_DAT;
```

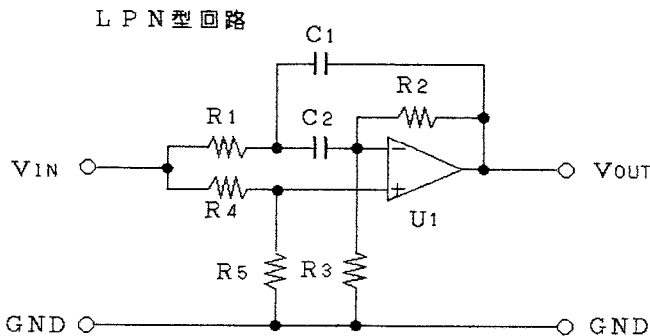
図7 フィルタ測定データの構造体

3. 測定結果

測定は、伝送零点を有する回路で著名なSAB回路 (Star Active Biquad Circuit) を周波数帯ごとに試作して行った。^[6]

フィルタの極及び伝送零周波数は、近年のRCアクティブ・フィルタの高周波化の動向を考慮して、基準周波数 f_0 を 1kHz~100kHz として設計した。^{[7],[8]}

図8に、基準周波数を $f_0 = 10\text{kHz}$ とし、 $f_p = f_0$ 、 $f_z = 2f_0$ 、 $Q = 5$ の場合の回路図及び部品値を示す。
($f_0 = 100\text{kHz}$ の場合は $C1, C2$ を 1000pF に交換する。)



部品定数	設計値 (測定値)	単位 (Ω, F)
R1	159 (165.17)	C1 10000p (9860p)
R2	15.9k (15.76k)	C2 10000p (9710p)
R3	5.305k (5.13k)	U1 LF357
R4	1.5k (1.50k)	
R5	18.75k (18.1k)	

図8 SAB回路 (LPN)

$f_0 = 10\text{kHz}$ の場合について前に掲げた表2より表5の測定条件 ($f_{\text{max}} = 100\text{kHz}$ のとき) が得られる。

これに基づく測定値を周波数応答法で測定した結果およびマルチサイン波法で測定した結果と比較した。

表5 被測定フィルタの測定条件

項目	記号	設定値	備考
入力パルス	E_V	2.813V	収束値 V_{CC}
	E_P	1.562V	ピーク値
サンプリング条件	N	1024	
	Δt	1 μsec	
	f_{HP}	800Hz	表2は1.6kHz

本報告の測定方法による時間応答の測定データを図9に示す。またFFT処理により周波数応答に変換した結果を図10に示す。図10には伝達関数から計算した周波数応答とFFT変換結果との誤差を同時にプロットしている。フィルタでは位相特性や群遅延特性等も重要であるが、これらは利得の場合とほぼ同様に計算できるので割愛した。周波数の上限は100kHzであるが、プロットは1MHzまで行っている。

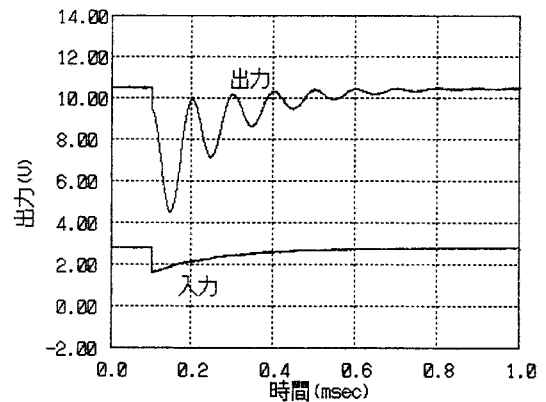


図9 時間応答測定結果

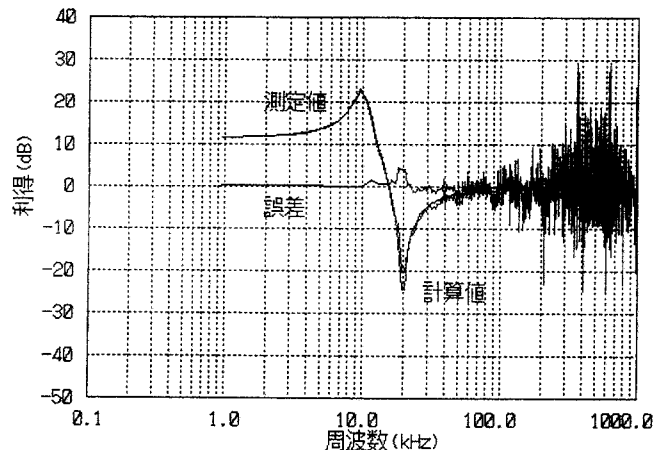


図10 周波数特性測定結果 ($f_0 = 10\text{kHz}$)

図11に $f_0 = 10\text{kHz}$ の場合のシミュレーション値と $1\text{kHz} \sim 100\text{kHz}$ における各測定結果の比較を示す。いずれの測定方法でも特に通過帯域付近では 0.1dB 以内の測定値の一致が得られている。

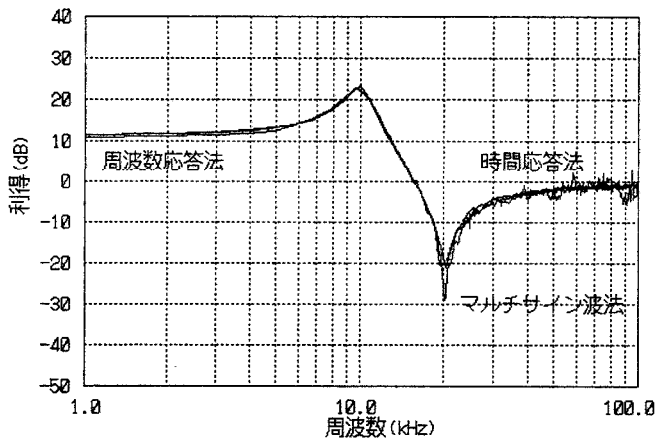


図11 各測定方法の比較

図12に $f_0 = 100\text{kHz}$ の場合の測定結果を示す。図10の場合と同様にフィルタの通過帯域付近では良好な測定精度が得られていることがわかる。しかし、出力信号のレベルが低くなる阻止帯域では高周波領域になるにつれて誤差が大きくなっている。

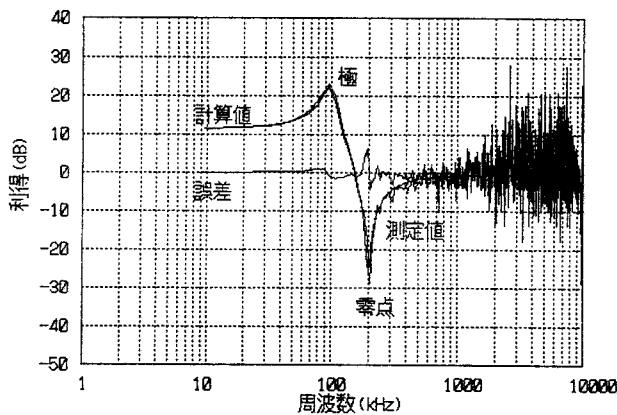


図12 周波数特性測定結果 ($f_0 = 100\text{kHz}$)

本報告の測定方法は原理的に信号レベルが低く高周波領域では周波数応答法やマルチサイン波法のような高い S/N 比は得られないが、これらの測定方法では測定信号のレベルを設定することが煩雑であることや測定に長時間を要する点を考慮すると、より簡単な測定条件設定のもとで、充分精度よくフィルタ特性の測定ができることが分かる。特に、信号レベルが高い通過帯域では実用上他の測定方法に比して遜色のない測定精度が得られており、本報告の測定方法により数秒の短時間で実用的な測定が可能となる。

V GP-IB 教育訓練教材への適用

計測制御の技術はコンピュータ技術を最も駆使しなければならない分野のひとつであり、これを実習教材として適用することは実践的教育訓練をめざす短大の目的に合致している。特に GP-IB による計測システムは、今回検討の対象としたフィルタ計測のようなパラメトリック測定に適しており、プログラムを変更することでフィルタ以外の特性計測へも応用が可能である。計測したデータを処理加工して視覚化するまでの過程で種々のプログラムが必要となるので、これらを課題として与えることにより難易度を織り混ぜた柔軟な実習教材を構成できる。一例として当短大の情報処理科と制御技術科を対象として汎用的な GP-IB 計測システムの実習システムとして再構成してみた。図13にその構成図を示す。システム全体は、小規模なパソコン LAN により、サーバパソコンに接続されており、計測したデータを収集・転送したり、分散処理の体験学習ができる。その他プログラムの共同作成やダウンロード、レポートの提出、電子メールによる出席確認等にも利用できるようにしている。

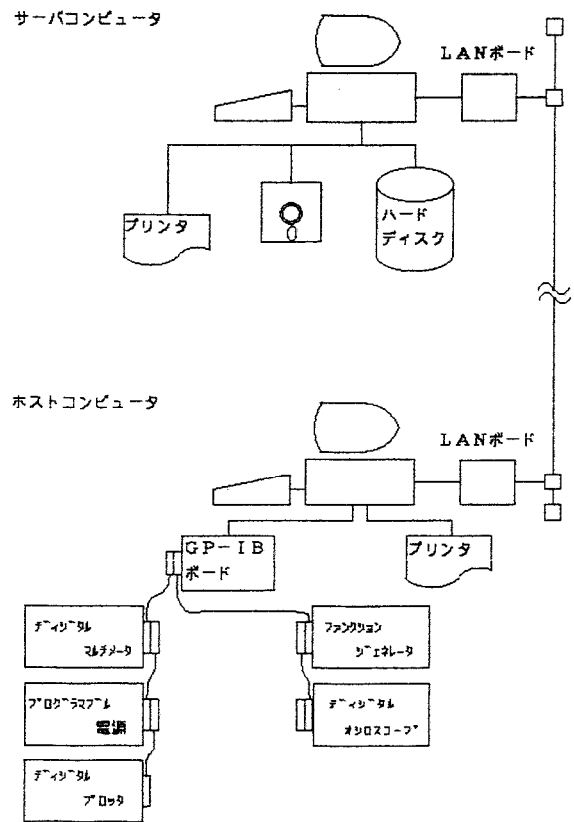


図13 GP-IB 計測制御実習システム

実習の構成としては、各計測機器単体の GP-IB インタフェース制御プログラミングを習得した後、複数

機器を制御する TTL 測定やフィルタ測定を実習する。現在、当短大の情報処理科のデジタル工学実習及びコンピュータ制御実習、記号処理実習のカリキュラムの一部として実施し、教育訓練効果の調査を行っている。フィルタ測定はフィルタ回路の概念の理解とフィルタ設計から試作・測定に至るまでの技法の習得に時間を必要とするので、2年次の卒業研究の課題としている。GP-IB インタフェース実習を含め実習全体をまとめると1期分の2単位・36時間程度で構成できると考えられる。表6にGP-IB計測実習のメニュー例を示す。

表6 GP-IB計測実習メニュー

実習項目	内容
電気電子計測の基礎	直流回路と交流回路 インピーダンスの概念
計測機器の手動操作	(手動による測定)
①デジタルマルチメータ	電圧、電流、抵抗値の測定
②プログラマブル電源	直流特性の精密測定
③ファンクションジェネレータ	周波数特性の測定
④デジタルオシロスコープ	交流信号、パルス波形の観測
⑤プロッタ	リスオンリーモードでの利用方法
GP-IBプログラミング 基礎編	GP-IBインタフェースプログラミング BASICによるプログラミング C言語によるプログラミング ①～⑤の各計測機器の制御
GP-IBプログラミング 応用編	オシロスコープ波形転送 TTL直流伝達特性測定 フィルタ周波数特性測定 プロッタへの特性グラフ描画

写真1に実習用に再配置したGP-IB計測システムの状況を示す。

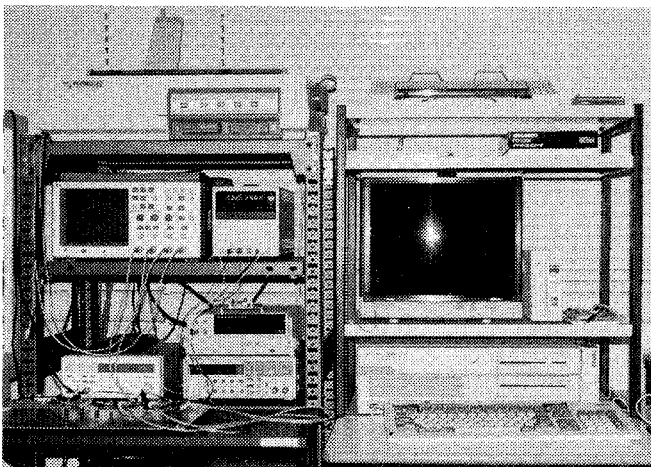


写真1 GP-IB計測システムの全体写真

図14にデジタル工学実習におけるTTL直流伝達特性測定例を示す。本実習では手動測定を体験した後にGP-IB自動計測システムで測定を行っている。プログラム言語はBASIC言語を使用し、2時限×3回の実習時間を割り当てている。

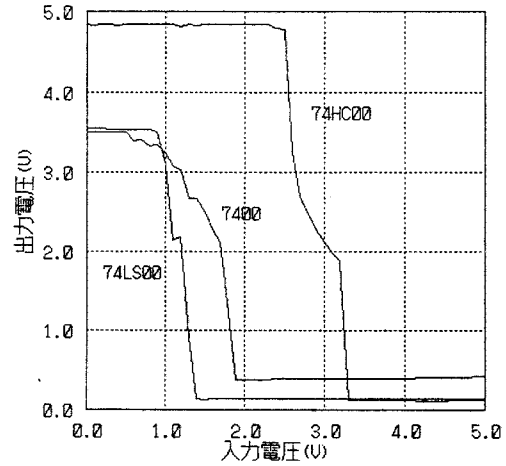


図14 TTL直流伝達特性

内容的にはプログラマブル電源の出力電圧を掃引させTTLインバータの出力電圧をデジタル・マルチメータで読み取るものである。ゲート回路のしきい値電圧を理解することが主目的であるが、電子回路とその測定及びプログラミング実習とが複合した課題である。課題次第で電子計測実習や情報処理実習へと展開できる。特に、サービスリクエスト機能（機器からの割り込み要求機能）を装備した計測機器を選定しておけば、GP-IB上で割り込み動作によるコンピュータ・システムの効率的利用方法を課題とした実習を行うことができ、実用的な計測制御のプログラミングの基礎を習得できる。表7にデジタル工学実習時の使用機器の性能諸元を示す。

表7 デジタル工学実習に使用する機器

機器名	仕様・機能
デジタル・マルチメータ	99、999カウント、分解能1μV
プログラマブル電源	11V、分解能1μV
デジタル・オシロスコープ	100MHz、20Ms/s、8ビット

いずれにしても、GP-IB計測実習は各種技術が複合した形で行ったほうが難易度は高くなるが効果的な実習になると考えられる。したがって関連する科目の進行状況を考慮し適用・実施科目の選定と課題の設定、及び実施する時期の設定を適切に行い、教材としての運用を図る必要がある。

VI まとめ

フィルタの周波数特性の測定・評価システムの構築を試みた。フィルタ設計技術は完成度の高い既存の技術である。フィルタを利用できるようにするためにはフィルタの理論をある程度理解し設計のためのツールや測定・評価システムの操作や利用方法を習得しなければならない。また、測定・評価システムの構築にはコンピュータのプログラミングや計測技術を習得しなければならない。また、かなりの労力が必要であるが、電子系や情報系の実学融合の効果的な実習教材になると考えられる。今後、構築したフィルタ測定・評価システムの教材としての充実化とプログラミング環境のGUI化を目標としていきたい。

また、これと並行してディジタル・オシロスコープの代わりに高速A/D変換器とDSPを使用したフィルタ測定・評価システムを構築し、マイコン制御・計測関連の教材の充実化のための要素技術として蓄積していきたいと思う。

謝辞

本研究をまとめるに当たってご指導頂いた、当短大の荻野和己校長に感謝の意を表します。

なお、本研究は平成5年度職業能力開発短期大学校指定研究「マイコン制御実習教材の開発」によって進められたことを付記し、雇用促進事業団および当短大関係者の各位に深謝します。

参考文献

- (1) GOBIND DARYANANI, "PRINCIPLES OF ACTIVE NETWORK SYNTHESIS AND DESIGN", JOHN WILEY & SONS, Inc.
- (2) 堀 敏夫: "アナログ・フィルタの設計と解析", 電波新聞社
- (3) M. E. VAN VALKENBURG 著、柳沢健監訳: "アナログフィルタの設計", 秋葉出版
- (4) 細野敏夫: "数値ラプラス変換 [I] ~ [III]", 電子通信学会誌、Vol.65 No. 8~9、(1982)
- (5) 菅原宏和: "IEEE488/GP-IB設計マニュアル", 総合電子出版社
- (6) J. J. FRIEND et.al., "STAR: An Active Biquadratic Filter Section", IEEE Trans., Circuit and Systems, vol. Cas-22, no. 2

p115, Feb 1975

- (7) 沖根光夫、藤井信生: "演算増幅器の有限GB積と入力容量の影響を補償した能動多重帰還回路", 電子情報通信学会論文誌、vol. J74, No. 12、(1991)
- (8) 平野 智、早原悦朗: "機能トリミングによる能動RCフィルタの高周波特性補償", 電子情報通信学会技報、vol. 92 No. 60、(1992)