

適応信号処理の応用

藤井裕子

今回はよいよDSPの本格的なアプリケーションをご紹介します。

まず簡単なトーン・コントロール/グラフィック・イコライザを、次に適応信号処理を取りあげます。最後にちょっと変わった適応信号処理のデモとして、音楽を試験信号として用いたフィルタ設計例を紹介します。

トーン・コントロールとグラフィック・イコライザ

一般に信号処理システムに用いられているデジタル・フィルタの大部分は、定型的な特性(LPF, BPF, HPF, BEFなど)を有するものです。これらのフィルタはデジタル・フィルタ設計ソフトで誰でも簡単に設計ができますが、ときには市販ソフトでは設計困難な特性のフィルタが必要となることがあります。

もっともよい例は、デジタル・オーディオの分野のトーン・コントロールや

グラフィック・イコライザあるいはラウドネス・コントロール回路などです。

また従来のアナログ処理の計測器をデジタル化する際には、各種の周波数特性補正回路(イコライザ回路)をデジタル・フィルタで近似しなければならないこともあります。そのような例としては騒音計の聴感補正回路などがあげられます。

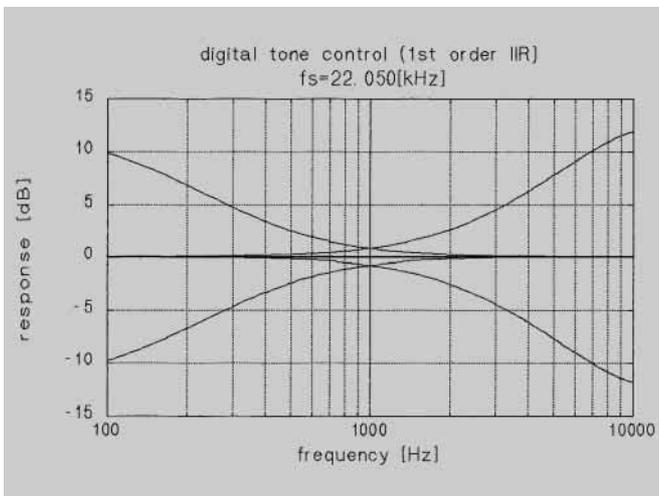
市販ソフトで対応していないからといって、これらのフィルタ(イコライザ回路)をデジタルで実現できないわけではありません。実例として図4.1および図4.2に簡単なトーン・コントロールとグラフィック・イコライザの特性を示します。EZ-KIT Lite^(注1)上で動作するデモ・プログラムが付属CD-ROMに収録されています。

これらのプログラムはたかだか2次のIIRフィルタで構成されています。この程度なら手計算あるいはz平面の極・

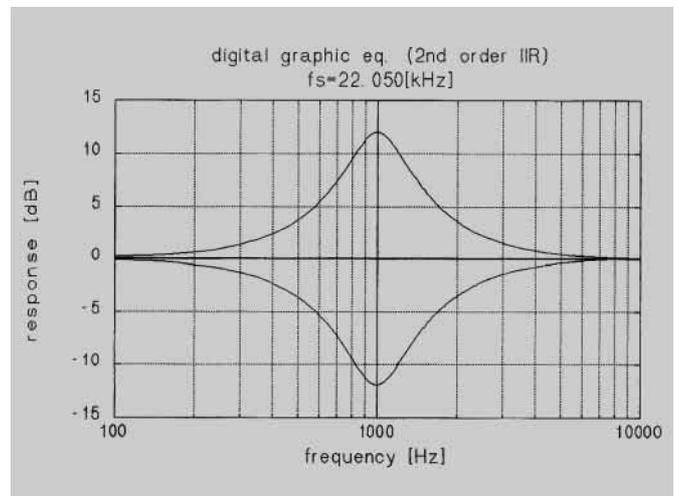
零点配置から図式的に設計することが可能です。前々号(No.3)の付属CD-ROMにデモ版が収録されたデジタル・フィルタ設計ソフトQEDesignには極・零点配置からの周波数特性の計算機能がありますので、これを利用しての設計も可能です。

アナログのs平面およびデジタルのz平面の極・零点配置から幾何的にフーリエ変換(すなわちフィルタ特性)を求める方法は、参考文献1に例題とともにいいに説明されていますので、一読することをおすすめします。きちんと理解すれば、低次のフィルタなら自分で設計プログラムを作って設計することが容易にできるでしょう。

特性が複雑な高次のイコライザ回路および既存のアナログ・フィルタ特性の高精度近似をすることも可能ですが、残念ながら定型的な設計手法は存在しません。フィルタの次数(すなわち群遅延)に制約



〔図4.1〕 トーン・コントロールの周波数特性



〔図4.2〕 グラフィック・イコライザの周波数特性

がなければ高次のFIRフィルタで任意特性の近似が可能ですが、現実には演算量・演算時間の制約もありますので無条件に適用可能ではありません。

このような場合はケース・バイ・ケースで設計手法を選択、あるいは複数の手法を組み合わせることで手作業の設計をすることになります。

適応信号処理

適応信号処理とは耳慣れない言葉に思われる方もいらっしゃるかもしれませんが、決して難解なものではありません。基本的な構成は極めてシンプルです。

代表的な例として適応信号処理を用いたノイズ・キャンセラの構成を図4.3に示します。いっぽうのマイク入力(主要入力)は音声入力のためのものですが、機械騒音が混入するので、これを適応信号処理を用いて除去するのが目的です。そのために騒音のみを検出するためのもう一つの入力(参照入力)を用います。

図4.3をご覧になればおわかりのとおり、引き算処理によりノイズ除去を行うのですが、主要入力に入る騒音信号 N と参照入力への騒音信号 N' は同一ではありません。したがって単純な引き算処理 $(S+N) - N$ ではノイズ除去がうまくいかないため、参照入力をイコライザを通して主要入力への騒音信号 N をよく近似した信号 \hat{N} を生成してから引き算処理を行います。

多くの場合、このイコライザには何の仮定もないFIRフィルタが用いられます。ただし最適特性を得るために、フィルタ係数は出力 E の値をもとに自動的に逐次適応的に更新されます。一種のフィードバック制御と見てよいでしょう。この係数更新アルゴリズムが適応信号処理の心臓部となります。図4.3の場合、適応動作はシステム出力 E (誤差出力)が最少になるように行われます。

なお図4.3の場合、入力音声 S と騒音 $N(N')$ は無相関なので、誤差 E が最少となる条件は $N = \hat{N}$ となります。そのときシステム出力(誤差出力)は音声 S そのものとなります。

入力信号や系の特性が変化したりしても最適値に収束するように自動的に係数更新が行われるのが「適応」処理と呼ばれるゆえなのです。

係数更新アルゴリズムは各種のものが提案されていますが、もっとも一般的なLMS(Least Mean Square)アルゴリズムは驚くほど単純です。しかしながら、その効果は従来のアナログ技術では想像もつかないほど強力なものです。

誌面の都合もあり今回は詳細にはふれませんが、適応信号処理アルゴリズムの理論については参考文献2をご覧ください。もはや古典的ともいえる文献ですが、さまざまな応用例も紹介されています。

適応信号処理の用途はノイズ・キャンセラに限られているわけではなく、また回路構成にも各種のバリエーションがあ

ります。

他の応用例としてはエコー・キャンセラ、受波器アレイを用いた超指向性マイク/ソナー、伝送路特性の補正(逆フィルタ)、ANC(Active Noise Control)などがあげられます。図4.3ではFIRとして説明したイコライザ部分(フィルタ)も場合によってはIIRフィルタや格子型フィルタが用いられます。

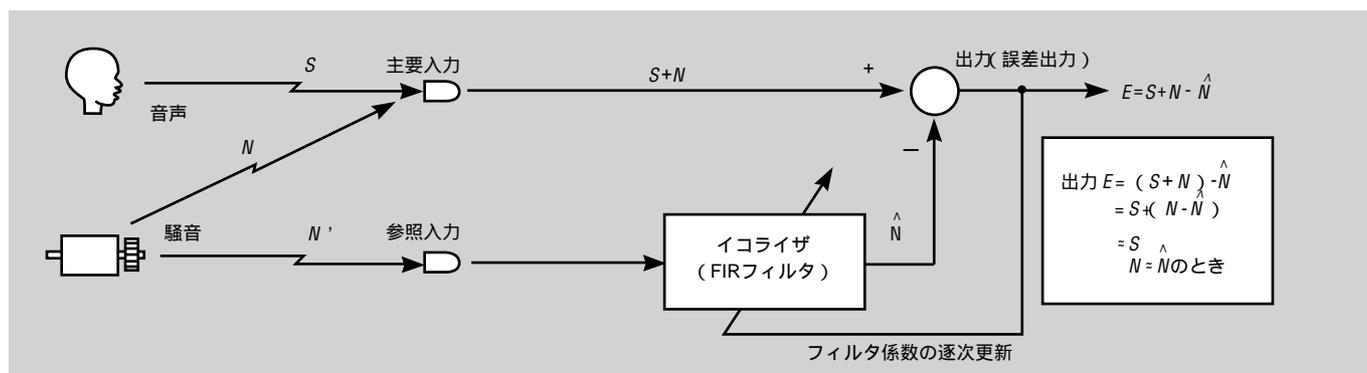
適応信号処理を用いた身近な製品例として、エコー・キャンセラがテレビ会議システム、逆フィルタが高速モデムに取り入れられています。ANCによる車内消音装置は高級車のオプションとして販売している自動車メーカーがあります。

適応ノッチ・フィルタ (周波数可変)

適応信号処理のデモとして、最初に適応ノッチ・フィルタを紹介します。

適応ノッチ・フィルタとは、入力信号に重畳した正弦波の周波数に自動的にノッチ周波数が追従するフィルタです。ただし、この例は適応システムとしてはやや特殊で、先に取り上げたノイズ・キャンセラとは異なり外部からの参照入力を持たず、またフィルタ部分もFIRではなくIIRで構成されています。

図4.4～図4.6にパソコン上での適応ノッチ・フィルタのシミュレーション結果を示します。図4.4がフィルタ入力でMIDIで再生した音楽に周波数をスイープした正弦波をミックスしたものです。



〔図4.3〕 適応信号処理を用いたノイズ・キャンセラの構成