

まえがき

デジタル信号処理の歴史は 1960 年代まで遡る。初めは、コンピュータを使ってオフラインで信号処理を行うことを目的としていた。その後、LSI 技術の発達によりハードウェアの処理速度が上がり、専用 LSI による実時間処理が可能となってきた。さらに、デジタル信号処理に特化したデジタルシグナルプロセッサ (DSP) の発達により、デジタル信号処理の実時間処理が広範囲で行われるようになった。現在、音声、音響帯域では DSP による実時間処理が主流になっている。DSP は多量の積和演算が高速に行えるように工夫されているが、基本的には命令コードによって制御されるコンピュータであるため、実現できる処理は多種多様である。しかし、デジタル信号処理の骨格となるのは線形・時不変な信号処理である。この信号処理は信号やシステムのフィルタリング、予測、推定、復元、等化といった重要な処理をカバーしている。また、その応用分野は、計測、制御、通信、音声・画像・映像処理など非常に広範囲に及んでいる。

最近の信号処理を取り巻く状況も大きく変わっている。マルチメディア、モバイル、インターネットというキーワードで表されるように、固有の情報表現からデジタル信号による統一的な表現へ、固定端末からモバイル端末へ、専用通信システムから汎用的なインターネット環境へと大きな転換期を迎えている。このような環境下では、いつでも、何処でも、誰とでも、多様で高品質な情報を自由にやりとりすることが求められている。別の見方をすると、多様な環境下で高品質な情報が要求されているといえる。このために、デジタル信号は一層重要な技術となってきている。

本書では、線形・時不変なデジタル信号処理を主として扱う。情報源や情報を感じる生体器官はほとんどがアナログであるため、まず、アナログ (連続

時間) 信号の標本化について述べる。次に、離散時間信号やシステムの数学的な表現、及び処理過程の扱いと表現法について学ぶ。デジタルコンピュータでは全ての情報が標本化されるため、周波数領域の標本化を取り上げる。これは、高速フーリエ変換 (FFT) に繋がる技術である。デジタルフィルタの設計法については、無限長インパルス応答 (IIR) フィルタと有限長インパルス応答 (FIR) フィルタについて基本的な方法を取り上げる。デジタルフィルタの構成法としては、基本構成の他に、複数の標本化周波数を含むマルチレートフィルタ、及び帯域分割形の信号処理について述べる。雑音に関しては、統計的な表現法を学び、その上で、雑音の伝達及び時間領域と周波数領域の解析方法について学ぶ。最後に、最近重要性を増している適応フィルタの基礎とその代表的な応用例を述べる。

本書は、高専、大学においてデジタル信号処理を学ぶ学生の教科書として、また、企業においてデジタル信号処理を学び、具体的に應用しようとする技術者までを対象としている。デジタル信号処理の特徴は、理論的な特性がそのまま実現される場合が多いという点である。「実験してみないと分からない」部分は少ない。その点からも、単なるノウハウではなく、理論をしっかりと身に付けてほしい。各章には、多くの演習問題をつけた。学んだ事項の理解を深める基本問題の他に、実際に應用する場面も想定したり、複数の章にまたがる問題もあり、応用力が身に付くように配慮されている。本書が、多くの人がデジタル信号処理を理解し、実践するための一助となれば望外の幸せである。

中山 謙二

目次

1. 離散時間信号とシステム

1.1	離散時間信号	1
1.2	線形シフト不変システム	2
1.2.1	線形性	3
1.2.2	シフト(時間)不変	3
1.2.3	インパルス応答	5
1.2.4	畳み込み和	5
1.3	線形シフト不変システムの基本構成	6
1.3.1	構成要素	6
1.3.2	基本回路	7
1.4	安定性と因果性	8
1.4.1	安定性	8
1.4.2	因果性	10
1.5	離散時間信号とシステムの周波数特性	11
1.5.1	複素正弦波に対する応答	11
1.5.2	実正弦波に対する応答	13
1.5.3	複数の正弦波に対する応答	14
1.5.4	離散時間信号のフーリエ変換	15
1.5.5	信号の周波数解析法のまとめ	15
1.5.6	畳み込み和の周波数領域での表現	17
1.5.7	フーリエ変換対の性質	18
1.6	連続時間信号の標本化	19
1.6.1	標本化による周波数特性の変化	19
1.6.2	内挿と標本化定理	20
1.6.3	アナログとのインターフェイス	23
1.7	演習問題	25

2. z 変換と伝達関数

2.1	z 変換の基礎	28
2.1.1	z 変換	28
2.1.2	収束領域	28
2.1.3	z 変換の極と零点	30
2.1.4	数列と収束領域	31
2.2	z 変換とフーリエ変換及び物理的実現性	32
2.2.1	z 変換とフーリエ変換	32
2.2.2	z 変換と物理的実現性	32
2.2.3	z 変換の位置づけ	34
2.3	z 変換の性質	34
2.3.1	右側数列の収束領域	35
2.3.2	線形性と数列のシフト	35
2.3.3	その他の性質	36
2.3.4	畳み込み和	37
2.3.5	パーセヴァルの関係	38
2.4	逆 z 変換	39
2.4.1	未定係数法	39
2.4.2	部分分数展開	40
2.4.3	逆 z 変換の一般式	41
2.5	伝達関数	43
2.5.1	伝達関数の表現	43
2.5.2	零点と極	45
2.5.3	伝達関数と周波数特性	46
2.6	伝達関数を中心とした諸概念の関連	47

3. 離散フーリエ変換

3.1	離散フーリエ変換の導出	58
3.1.1	フーリエ変換の標準化	58
3.1.2	離散フーリエ変換のまとめ	60
3.1.3	フーリエ変換の標準化による時間信号の変化	60

3.1.4	周波数領域における標本化定理	61
3.1.5	標本化周波数, 標本間隔, 標本点数の決め方	62
3.1.6	連続時間信号のフーリエ変換から離散フーリエ変換までの関係	64
3.2	離散フーリエ変換の性質	66
3.2.1	線形性と循環シフト	66
3.2.2	循環畳み込み和	68
3.3	離散フーリエ変換による線形畳み込み和	68
3.3.1	線形畳み込み和	68
3.3.2	有限長信号の場合	70
3.3.3	無限長数列の場合	71
3.4	演習問題	72
3.5	附録	76
3.5.1	連続時間信号のフーリエ変換	76
3.5.2	ラプラス変換と z 変換の関係	80
3.5.3	基本演算, 基本関数のラプラス変換	84

4. 離散フーリエ変換の計算法

4.1	離散フーリエ変換の直接計算	85
4.2	高速フーリエ変換 (FFT)	85
4.2.1	周波数間引き radix2 FFT アルゴリズム	85
4.2.2	FFT の特徴	95
4.2.3	時間間引き FFT アルゴリズム	97
4.2.4	radix4-FFT アルゴリズム	98
4.3	逆 FFT	100

5. IIR デジタルフィルタの設計法

5.1	デジタルフィルタの設計	103
5.1.1	設計フローチャート	103
5.1.2	回路形式の特徴	103
5.2	アナログフィルタの伝達関数	105
5.2.1	バターワースフィルタ	105
5.2.2	チェビシェフフィルタ	108

5.2.3	楕円フィルタ	111
5.2.4	重み付等リップル近似	112
5.3	インパルス応答不変変換	112
5.3.1	インパルス応答の標本化	112
5.3.2	伝達関数の設計	113
5.3.3	s 平面から z 平面への写像	114
5.3.4	設計例	115
5.4	双 1 次 z 変換	116
5.4.1	s-z 変換式の導出	116
5.4.2	s 平面と z 平面の写像関係	118
5.4.3	デジタルフィルタの設計手順	119
5.4.4	設計例	119
5.5	演習問題	119
5.6	附録	120
5.6.1	アナログフィルタの極と安定性の関係	120
6. FIR デジタルフィルタの設計法		
6.1	線形位相 FIR フィルタ	122
6.1.1	線形位相特性	122
6.1.2	入出力波形の関係	122
6.1.3	伝達関数の一般形	125
6.1.4	線形位相 FIR フィルタの零点配置	125
6.1.5	応用例	128
6.2	時間窓による FIR フィルタ設計法	129
6.2.1	設計手順	129
6.2.2	時間窓による周波数特性の変化	131
6.3	周波数サンプリング法	132
6.3.1	設計手順	132
6.3.2	標本値による伝達関数の表現と回路構成	133
6.3.3	遷移帯域の標本値の決め方	137
6.3.4	設計例	137
6.4	逐次的な等リップル (チェビシェフ) 近似法	137

6.5	最小位相, 最大位相 FIR フィルタの設計法	139
6.5.1	零点配置	139
6.5.2	設計法	141
6.6	演習問題	141

7. デジタルフィルタの回路構成

7.1	回路構成の基本方針	144
7.1.1	構成要素	144
7.1.2	回路構成のポイント	144
7.1.3	回路構成の基本的な考え方	144
7.2	伝達関数を直接表現する回路形式	147
7.2.1	直接構成 (高次多項式)	147
7.2.2	縦続構成 - 2 次因数分解	148
7.2.3	部分分数展開による並列構成	149
7.2.4	連分数展開によるはしご形構成	150
7.2.5	格子形回路	150
7.2.6	回路形式の比較	152
7.3	マルチレートフィルタ	153
7.3.1	レート変換フィルタ	153
7.3.2	TDM/FDM 変換	157
7.4	演習問題	158

8. 量子化誤差の解析と低減法

8.1	確率過程の解析	163
8.1.1	確率過程の性質	163
8.1.2	確率過程の周波数解析	164
8.1.3	確率変数に対する線形システムの応答	167
8.2	量子化誤差の種類と分布	170
8.2.1	2 進数の表現	170
8.2.2	量子化誤差の発生	171
8.3	内部信号の量子化による雑音	178
8.3.1	スケーリング	178

8.3.2	オーバーフローの補正法	181
8.4	デジタルフィルタの出力雑音の解析	182
8.4.1	量子化誤差の伝達	182
8.4.2	デジタルフィルタにおける出力雑音	185
8.4.3	出力雑音の低減	187
8.5	演習問題	187
8.6	附録	192
8.6.1	サイコロを用いた確率過程の説明	192
8.6.2	自己相関とフーリエ変換	193
8.6.3	信号和の電力	195
8.6.4	浮動小数点演算における量子化誤差	197