

# 目 次

## 第 1 章 デジタル信号

|       |               |    |
|-------|---------------|----|
| 1.1   | 信号処理          | 1  |
| 1.1.1 | アナログ信号とデジタル信号 | 1  |
| 1.1.2 | 信号処理の目的       | 2  |
| 1.2   | 信号のサンプリングと量子化 | 2  |
| 1.2.1 | 正弦波信号         | 2  |
| 1.2.2 | サンプリング        | 3  |
| 1.2.3 | 量子化           | 5  |
| 1.3   | 信号の種類         | 6  |
| 1.4   | 信号の処理手順       | 8  |
| 1.5   | A/D 変換器       | 9  |
| 1.6   | デジタル信号処理の利点   | 11 |
|       | 1 章の問題        | 12 |

## 第 2 章 信号処理システム

|       |               |    |
|-------|---------------|----|
| 2.1   | 信号の表現         | 13 |
| 2.1.1 | 離散信号の表現       | 13 |
| 2.1.2 | 正規化表現         | 13 |
| 2.1.3 | 移動平均          | 14 |
| 2.1.4 | 処理による結果の違い    | 14 |
| 2.2   | 信号例とその性質      | 16 |
| 2.3   | 線形時不変システム     | 20 |
| 2.3.1 | 線形性と時不変性      | 20 |
| 2.3.2 | たたみ込みとインパルス応答 | 23 |
| 2.3.3 | たたみ込みの実際の計算法  | 25 |
| 2.4   | ハードウェア実現      | 27 |

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 2.4.1 | 演算要素            | 27 |
| 2.4.2 | システムの一般的な構成     | 28 |
| 2.4.3 | 再帰型システム         | 28 |
| 2.4.4 | 定係数差分方程式        | 31 |
| 2.5   | システムの安定性と因果性の判別 | 34 |
| 2.5.1 | 因果性システム         | 34 |
| 2.5.2 | 安定なシステム         | 35 |
| 2.5.3 | IIR システムの安定性    | 35 |
|       | 2章の問題           | 38 |

### 第3章 システムの伝達関数

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 3.1   | $z$ 変換            | 41 |
| 3.1.1 | $z$ 変換の定義         | 41 |
| 3.1.2 | $z$ 変換の性質         | 42 |
| 3.2   | システムの伝達関数         | 44 |
| 3.2.1 | システムの伝達関数         | 44 |
| 3.2.2 | 非再帰型システムの伝達関数     | 44 |
| 3.2.3 | 再帰型システムの伝達関数と極    | 48 |
| 3.3   | 逆 $z$ 変換とシステムの安定性 | 51 |
| 3.3.1 | 逆 $z$ 変換の計算法      | 51 |
| 3.3.2 | 極によるシステムの安定判別     | 56 |
| 3.4   | システムの周波数特性        | 57 |
| 3.4.1 | システムの周波数特性        | 57 |
| 3.4.2 | 伝達関数と周波数特性        | 60 |
| 3.4.3 | 周波数特性の描き方         | 64 |
| 3.4.4 | システムの縦続型構成と並列型構成  | 69 |
|       | 3章の問題             | 73 |

### 第4章 信号の周波数解析とサンプリング定理

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 4.1   | 周波数解析             | 75 |
| 4.1.1 | 非正弦波信号の正弦波信号による表現 | 75 |
| 4.1.2 | フーリエ解析の種類         | 75 |

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 4.2   | 周期信号のフーリエ解析 .....   | 76 |
| 4.2.1 | フーリエ級数 .....        | 76 |
| 4.2.2 | 離散時間フーリエ級数 .....    | 82 |
| 4.2.3 | フーリエ変換 .....        | 86 |
| 4.2.4 | 離散時間フーリエ変換 .....    | 89 |
| 4.3   | 離散時間フーリエ変換の性質 ..... | 91 |
| 4.3.1 | 線形性 .....           | 92 |
| 4.3.2 | 時間シフト .....         | 92 |
| 4.3.3 | たたみ込み .....         | 92 |
| 4.3.4 | 周波数シフト .....        | 93 |
| 4.3.5 | 周波数スペクトルの対称性 .....  | 93 |
| 4.4   | サンプリング定理 .....      | 94 |
| 4.4.1 | 帯域制限信号 .....        | 94 |
| 4.4.2 | エリアジング .....        | 94 |
| 4.4.3 | ナイキスト間隔 .....       | 96 |
| 4.4.4 | サンプリング定理 .....      | 97 |
| 4.4.5 | 信号のデジタル化 .....      | 97 |
|       | 4章の問題 .....         | 98 |

## 第5章 高速フーリエ変換

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 5.1   | 離散フーリエ変換 .....        | 101 |
| 5.1.1 | フーリエ変換の問題点 .....      | 101 |
| 5.1.2 | M点信号の離散時間フーリエ変換 ..... | 102 |
| 5.1.3 | 周波数スペクトルの離散化 .....    | 102 |
| 5.2   | DFT と IDFT .....      | 104 |
| 5.3   | 高速フーリエ変換 .....        | 106 |
| 5.3.1 | DFT の演算量 .....        | 106 |
| 5.3.2 | FFT アルゴリズム .....      | 107 |
| 5.3.3 | IFFT アルゴリズム .....     | 112 |
| 5.4   | 窓関数による信号の抽出 .....     | 113 |
| 5.4.1 | 代表的な窓関数 .....         | 113 |
| 5.4.2 | 信号抽出の影響 .....         | 114 |

|       |     |
|-------|-----|
| 5章の問題 | 118 |
|-------|-----|

## 第6章 デジタルフィルタ

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 6.1 アナログフィルタ                | 119 |
| 6.2 フィルタの種類                 | 119 |
| 6.3 フィルタの性質                 | 121 |
| 6.4 群遅延                     | 122 |
| 6.5 アナログフィルタの回路構成           | 124 |
| 6.6 アナログフィルタの設計             | 125 |
| 6.6.1 理想低域通過フィルタ            | 126 |
| 6.6.2 バターワースフィルタ            | 127 |
| 6.6.3 チェビシエフフィルタ            | 129 |
| 6.6.4 ベッセルフィルタ              | 130 |
| 6.7 周波数変換                   | 131 |
| 6.7.1 低域通過フィルタ              | 131 |
| 6.7.2 高域通過フィルタ              | 133 |
| 6.7.3 帯域通過フィルタ              | 134 |
| 6.7.4 帯域阻止フィルタ              | 135 |
| 6.8 デジタルフィルタ                | 137 |
| 6.8.1 双1次 $s$ - $z$ 変換法     | 137 |
| 6.8.2 アナログ角周波数とデジタル角周波数との関係 | 139 |
| 6.8.3 双1次変換法の安定性            | 140 |
| 6.8.4 デジタルフィルタの設計           | 140 |
| 6章の問題                       | 142 |

## 第7章 サンプリングレート

|                  |     |
|------------------|-----|
| 7.1 サンプリング周波数の変更 | 145 |
| 7.2 ダウンサンプリング    | 146 |
| 7.3 アップサンプリング    | 148 |
| 7.4 レート変換        | 150 |
| 7.4.1 デシメータ      | 150 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 7.4.2 インターポレータ .....   | 151 |
| 7.4.3 有理数比のレート変換 ..... | 151 |
| 7.4.4 マルチステージ構成 .....  | 152 |
| 7章の問題 .....            | 154 |

## 第 8 章 システム同定

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 8.1 システム同定 .....            | 155        |
| 8.1.1 線形システムモデル .....       | 155        |
| 8.2 最小 2 乗法 .....           | 157        |
| 8.3 重み付き最小 2 乗法 .....       | 159        |
| 8.4 指数重み付き最小 2 乗法 .....     | 160        |
| 8.5 逐次最小 2 乗法 .....         | 161        |
| 8.5.1 逐次最小 2 乗法の導出 .....    | 162        |
| 8.5.2 重み付き逐次最小 2 乗法 .....   | 165        |
| 8.5.3 指数重み付き逐次最小 2 乗法 ..... | 166        |
| 8章の問題 .....                 | 167        |
| <b>演習問題略解</b> .....         | <b>169</b> |
| <b>参考文献</b> .....           | <b>175</b> |
| <b>索引</b> .....             | <b>177</b> |