

# 第1章

# デジタル信号処理とは

## 1.1 デジタル信号処理とは何か

半導体技術の急速な発達により、コンピュータを取り巻く環境も、マルチメディアの時代からインターネット時代を経て、現在はユビキタス・コンピューティング(ubiquitous computing)の時代を迎えようとしている。デジタル信号処理(digital signal processing)は、このような技術を支える基盤技術の一つとして重要な役割を担っており、現代社会において、なくてはならない技術である。

ところで、私たちの身のまわりの物理現象から発生する情報の多くは、アナログ信号の形で伝えられる。たとえば、私たちが日常的に使っている音声はいろいろな情報をもっているが、音声はマイクを通して電圧値に変換され、時間とともに変化するアナログの電気信号になる。このようなアナログの信号を、コンピュータをはじめとするデジタル処理を行う装置で扱うための技術がデジタル信号処理である。

もう少し具体的な例で考えてみよう。図1-1には、ゲルマニウム・ラジオの回路図と各ブロックの機能を示している。このシステムではアナログ信号をアナログ的に処理しているので、アナログ信号処理システムの一例といえる。このシステムと同じような機能をもつシステムをデジタル的に行う算術演算、論理演算、条件判断などの操作で実現するのがデジタル信号処理ということになる。

デジタル信号処理では図1-1のシステムと同じような機能をもつシステムをどのようにして実現するのを見てみよう。デジタル信号処理の実現手段は大きく分けてソフトウェアつまりプログラムとして実現する場合と、ハードウェアで実現する場合がある。ここでは、ソフトウェアで実現するものとする。各ブロックでの処理は、たとえば表1-1<sup>注1</sup>に示すように書くことができる。

注1：実際に図1-1のシステム全体と同じような働きの実現するためには、表1-1に示すもの以外にA-D変換やD-A変換などの処理が必要になるが、ここでは省略している。

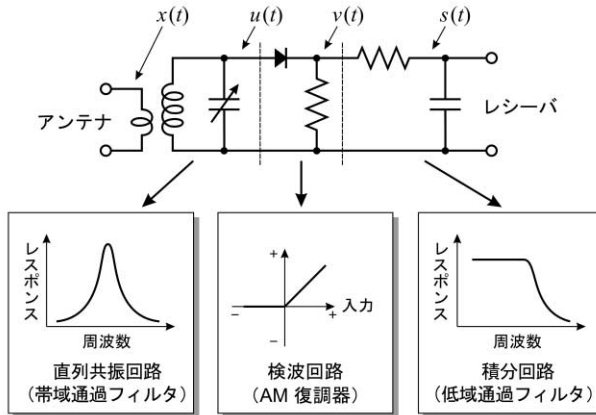


図1-1 ゲルマニウム・ラジオにおける信号処理のようす

表1-1 ゲルマニウム・ラジオをデジタル信号処理で実現する(プログラムで実現する場合)

機能	差分方程式	C言語
帯域通過フィルタ	$u[n] = \sum_{m=1}^{M_1} a_m u[n-m] + \sum_{k=0}^{K_1} b_k x[n-k]$	<pre>for (m=1; m&lt;=M1; m++)   u[n] += a[m]*u[n+m]; for (k=0; k&lt;=K1; k++)   u[n] += b[k]*x[n+k];</pre>
AM復調器	$v[n] = \begin{cases} u[n], & u[n] \geq 0 \\ 0, & u[n] < 0 \end{cases}$	<pre>if (u[n]&gt;=0) v[n] = u[n]; else v[n] = 0;</pre>
低域通過フィルタ	$s[n] = \sum_{m=1}^{M_2} g_m s[n-m] + \sum_{k=0}^{K_2} h_k v[n-k]$	<pre>for (m=1; m&lt;=M2; m++)   s[n] += g[m]*s[n+m]; for (k=0; k&lt;=K2; k++)   s[n] += h[k]*v[n+k];</pre>

差分方程式で使われている  $x[n]$  などは図1-1の  $x(t)$  などを標準化した値を表す。

表1-1では、2列目に差分方程式というものが出てくるが、この式がデジタル信号処理における処理方法を表す式であり、このような計算を行うのがデジタル信号処理である。この差分方程式については第3章で説明する。なお、表1-1の差分方程式の中で出てくる  $x[n]$ ,  $u[n]$  などは、図1-1で  $x(t)$ ,  $u(t)$  などのアナログ信号を標準化したものに対応する。標準化については第2章で説明する。第3列目には、各ブロックの処理に対応する差分方程式に基づいて、C言語を使って記述した例を示す。

ここで、デジタル信号処理はアナログ信号処理の近似ではないということに注意しなければならない。図1-1で直列共振回路や積分回路の動作は微分方程式を使って記述できるが、表1-1の差分方程式はこの微分方程式の単なる近似ないしはシミュレーションのためのものではない。たとえば、直列共振回路は帯域通過フィルタ<sup>注2</sup>として働くが、この電気回路で実現される周波数特性と差分方程式で実現される周波数特性は同じである必要はない。差分方程式に求められるのは、ただ単に帯

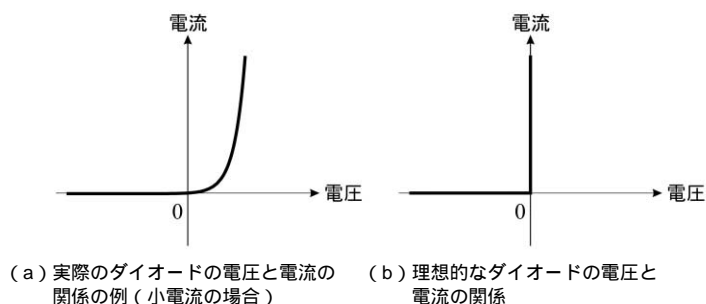


図1-2 ダイオードの電圧-電流特性

域通過フィルタとしての機能を実現することであり、この電気回路の周波数特性とできるだけ同じ特性が実現されることが求められているわけではない。また、図1-1の検波回路にはダイオードが使われているが、このダイオードの典型的な電圧-電流特性は図1-2(a)のようになる。したがって、図1-1の検波回路の働きをできるだけ忠実に差分方程式を使って記述しようとする、表1-1に示す式よりもっと複雑な式になってしまう。しかし、実際にダイオードの特性として求められるのは図1-2(b)の特性であり、表1-1に示す検波回路のブロックに対応する差分方程式は、この図1-2(b)の特性を実現したものになっている。この例からも、デジタル信号処理は、アナログ電気回路で行う処理の近似やシミュレーションでないことがわかるであろう。

ところで信号にもいろいろあるが、図1-1のシステムで扱っている信号は時間信号である。時間信号は、もっとも簡単な場合、時間を変数とする1次元の関数として表現される。信号にはこのような1次元の時間信号のほかに、静止画像のように時間ではなく位置を変数とする2次元の関数として表現される信号や、動画のように2次元の関数が時間とともに変化する、つまり三つの変数をもつ3次元関数として表現されるものもある。本書ではそのような信号は扱わず、1次元の時間信号<sup>注3</sup>に限定する。しかし、1次元の時間信号についての取り扱いをしっかりと身に付けていれば、それ以外の信号の取り扱いも比較的簡単に理解することができる。

話はわかるが、「デジタル信号処理」という言葉は専門的な用語としてすでに定着している言葉だが、その内容が誤解されている場合もときどき見られる。つまり、この言葉はどこで区切るかによって意味が違って来る。「デジタル信号 | 処理」のように区切るとデジタル信号を扱う処理という意味になるので、論理回路やコンピュータを含む非常に広い内容になってしまう。それに対して「デジタル | 信号処理」のように区切れば、信号処理をデジタル的な手段で行うという意味になり、専門用語としてもこの意味で使われている。この場合、対象となる信号は主としてアナロ

注2：ある範囲の周波数成分のみを通過させる働きをもったフィルタ。

注3：時間信号に限定するということは本質的なことではないが、限定しない場合に用語が煩雑になる。たとえば時間信号に対して周波数ということばがあるが、変数が位置に対応するような信号に対しては空間周波数という用語になる。このように変数に対応する量が変化すると、それに対応して用語も変える必要がある。時間信号に限定しない場合、記述が煩雑になってしまう。そのため、本書では時間信号に限定する。

グ信号になる。本書で扱うのは、もちろん「デジタル | 信号処理」である。

デジタル信号処理に関する文献は数多く出版されているためここでは示さないが、本書をひととおり読んだ後でもっと本格的に学びたいという読者のために一つだけ挙げるとすると、A. V. OppenheimとR. W. Schafferの“Discrete-time Signal Processing<sup>(4)</sup>”が非常に役に立つものと思われる。

## 1.2 デジタル信号処理の応用分野

デジタル信号処理技術は、図1-3に示すように、通信をはじめ、音響、音声、画像、計測、制御などの広い分野のシステムを実現するうえで、共通の基盤技術の中でも重要なものの一つということができる。私たちに身近なところでも、携帯電話をはじめとしてデジタル信号処理を応用した製品がたくさん出回っている。

そのようなものの例として、ハンズフリー( handsfree )電話機の中でデジタル信号処理がどのように使われているか見てみよう。図1-4に、ハンズフリー電話機による通話系の模式図<sup>2</sup>を示す。このような電話を使って通話するときのことを考えてみよう。

送話者の声はマイク1で拾われ増幅されて受話者のスピーカから再生される。ハンズフリーの電話機では、スピーカ2と受話者の距離が離れている場合が多いので、スピーカからはある程度大きな音が出力される。そのため、何も処理を施さなければ、この音がマイク2で拾われ、それが増幅されて送話者側のスピーカ1へ送られ、送話者の声が再生される。送話者側もハンズフリー電話機を使っているとすると、スピーカ1から出た送話者の声が再び増幅されスピーカ2で再生されるといった繰り返しになるので、音響エコーを生じて通話の品質を落とすことになる。また、条件によ

<p>&lt;通信&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>モデム</li> <li>符号化</li> <li>エコー・キャンセラ</li> <li>自動等化</li> <li>スペクトル拡散通信</li> </ul>	<p>&lt;音響信号処理&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>音響信号情報圧縮 (MP3 等)</li> <li>音場制御</li> <li>電子楽器</li> <li>アクティブ騒音制御</li> <li>適応形マイク・アレイ</li> </ul>	<p>&lt;音声信号処理&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>音声分析</li> <li>音声合成</li> <li>音声認識</li> <li>音声情報圧縮</li> <li>テキスト-音声変換</li> </ul>
<p>&lt;画像処理&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>画像情報圧縮 (JPEG, MPEG)</li> <li>画像強調</li> <li>画像復元</li> <li>画像認識</li> </ul>	<p>&lt;計測システム&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>センサ信号処理</li> <li>振動解析</li> <li>ロックイン・アンプ</li> <li>相関関数</li> <li>高速フーリエ変換 (FFT)</li> </ul>	<p>&lt;制御&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>モータ制御</li> <li>ハードディスク制御</li> <li>ロボット</li> <li>アクティブ振動制御</li> </ul>
<p>&lt;自動車&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>エンジン制御</li> <li>アクティブ・サスペンション</li> <li>アンチロック・ブレーキ</li> <li>カー・オーディオの音場制御</li> </ul>	<p>&lt;医用システム&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CT</li> <li>脳波解析</li> <li>心電図解析</li> <li>血流計測</li> <li>X線写真等の自動診断</li> </ul>	<p>&lt;天文学, 地球探査&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>VLBI (超長基線干渉計)</li> <li>合成開口電波望遠鏡</li> <li>開口合成レーダ</li> <li>地震波解析</li> </ul>

図1-3 デジタル信号処理の応用分野

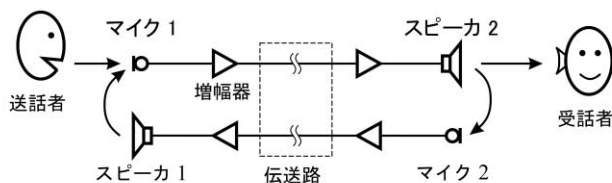


図1-4 ハンズ・フリー電話機による通信系の模式図

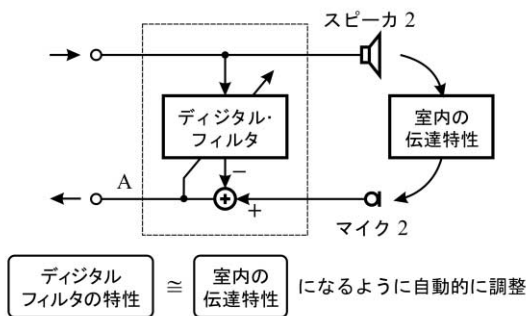


図1-5 音響エコー・キャンセラの原理

てはハウリング(howling)を生じ、使い物にならない場合も出てくる。

そこで、このようなハンズフリー電話機にはデジタル信号処理技術の一つである適応フィルタを使って、音響エコーをキャンセルしハウリングを生じさせない工夫がなされている。そのためのシステムが音響エコー・キャンセラで、その原理の概略を図1-5に示す。

この図のデジタル・フィルタは特性を変えられるようになっており、この特性を室内の伝達特性に一致するように調整すれば、デジタル・フィルタの出力信号とマイク2で拾う信号は同じものになる。したがって、図のようにマイク2で拾った信号からデジタル・フィルタの出力信号を引き算すれば、マイク2で拾った音を打ち消すことができる。その結果、送話者の声がまた送話者側へ戻るということを防ぐことができる。

実際には、室内の伝達特性は状況に応じて変化するので、事前にデジタル・フィルタの特性を調整しておくことはできない。そこで、このデジタル・フィルタの特性を、人手を介することなく、適応アルゴリズムによって自動的に調整し、図のA点に現れる信号がもっとも小さくなるようにする。これが、音響エコー・キャンセラの基本的な考え方になる。

## 1.3 なぜデジタル信号処理か

1.2では、デジタル信号処理がいろいろな分野で応用されていることを説明してきた。それでは、なぜデジタル信号処理が使われるようになってきたのかというと、いろいろと利点が多いからである。しかし、デジタル信号処理には利点とともに欠点がある。そのため、デジタル信号処理