

アナログの良さを生かしたデジタル処理

シャノンの美しい定理

デジタルの起源は人類が数という概念を使い始めたころにあり、のろしや旗による通信という形で情報のデジタル伝送も古くから行われてきた。17世紀に数値解析が発展してデジタル信号処理の基礎ができ上がり、19世紀にはモールス符号によるデジタル通信、電信が実用化された。

しかしデジタル信号処理技術が今日の隆盛を究めるに至った原動力は、1940、50年代のシャノンの業績に代表される情報理論の発展と電子計算機の実用化と1970年代以降の半導体技術の飛躍的発展にあるといえよう。

シャノンは信号の単位時間当たりのエントロピー（Entropy）すなわち平均情報量より大きな伝送容量を持つ伝送系を使えば、あいまい度を限りなく小さくする符号化法が存在するという美しい定理を導いている。

アナログかデジタルか

信号の伝送路には必ず雑音が存在する。これは伝送路の伝送容量が有限であることを示している。従ってアナログ信号をそのまま伝送すると信号には多かれ少なかれ雑音誤差が加わり劣化する。アナログでは伝送過程で加わった雑音やひずみは修復不可能であるが、デジタルでは数字が読めさえすればもとどおりに清書することが可能である。さらにたとえば数字の合計をメモしておけば、どれか一つが読めなくとも修復することが可能となる。これがデジタル信号処理の大きな特長、誤り訂正機能である。

このようにデジタル伝送では伝送容量の有限な現実の機器を使用しても劣化のない伝送・処理が期待できる。従って信号処理へのデジタル信号処理導入の採否は、アナログ処理による信号劣化と、デジタル化の際に生じる信号劣化との比較により決定すべきものといえる。

早稲田大学 理工学総合研究センター
音響情報処理研究室 山崎 芳男

アナログの良さを生かしたデジタル処理

早稲田大学 理工学総合研究センター
音響情報処理研究室 山崎 芳男

CDは水晶時計？

よくアナログ録音のLPレコードを「針のついたアナログ時計」に、デジタル録音を「数字表示のデジタル時計」にたとえた説明を見受ける。しかしLPであろうがCDであろうが再生される音は同じように空気の気圧変化として耳で捉えられている。むしろデジタル録音されたCDは水晶発振素子をデジタル分周して時計の針を動かしている水晶時計に例えるべきである。

振り子時計も振り子がギアを動かしており、昔の腕時計もテンプレが時を刻んでおりデジタル的である。砂時計だって粒子が駆動源だし、日時計も光子に頼るデジタル装置である。こうして見ると時計は案外昔からデジタル的でありアナログ時計に相当する時計を探すのは難しいくらいである。強いてアナログ時計を探すなら電源周波数に同期したモーターで駆動された電気時計くらいであろう。デジタル表示の時計はさしずめMIDIデータによる音楽といったところであろうか。

むしろ身近なデジタル

20世紀は量子力学の時代ともいわれている。前の例ばかりでなく意外に純粋なアナログ信号、アナログ現象を探すのは難しい。われわれは技術の流れに従い半ば無意識に、理論体系も技術開発もアナログで培った考え方、方法をデジタルに置き換えるというやり方で進んできた。しかしむしろ理論も設計技術もまずデジタルで構築し、アナログはデジタルの特別な場合、離散化を細かくした極限として捉える方が自然なのではないか。実際幅が0で高さが無限大で面積が1であるデルタ関数などより、幅も高さも1で面積1の単位標本の方がずっとわかりやすいし、積分は加算に、微分は引き算に置き換えた方がずっと親しみやすいではないか。

アナログの良さをデジタルで 高速1bit信号処理

一般に標準化周波数が帯域を決め、量子化bit数がダイナミックレンジを決定すると捉えられがちであるが、これは間違いである。シャノンの定理でも標準化周波数と量子化bit数の積である伝送容量、信号伝送速度が重要な意味を持っており、個々に論じられるものではない。

我々は十数年来、標準化周波数と量子化bit数の組み合わせの選択が困難であるのならばいっそ、その片方の極限である高速標準化1bit量子化で信号の情報量と人間の聴覚特性に見合った符号化方式が可能なのではないか、と様々な検討を加えてきた。1974年には高次差分PCMにより標準化周波数が1/6以下のダイナミックレンジを拡大することが可能であることを明らかにし、1979年には量子化器を帰還ループの中に設けその順方向伝送特性 $H(s)$ と帰還特性 $H(z)$ を適当に選び、量子化雑音のスペク

トルを制御することにより広帯域音響信号を扱う1bit量子化が可能であることを明らかにした。

この方式は比較器と1bit遅延回路以外はアナログ素子で構成されているにもかかわらず、出力の1bit信号はれっきとしたデジタル信号である。この回路はトランジスタか演算増幅器あるいは真空管で構成するアナログ積分器と比較器で実現することが可能である。極端にひずみの多いアナログ素子である1bit量子化器を、低域に大きなループ利得を持つ帰還ループに入れることにより、低域のひずみの低減を図ったシステムの、もっともひずみの多い点から出力を取り出した回路とみなすことができる。

そのスペクトル分布はデジタル信号でありながら低域には入力信号のスペクトルがそのまま存在し、高域に量子化雑音が集中している。したがってデジタル信号の復調に必要なマルチbitのDA変換器は不要であり、低域通過フィルタを通過した1bit信号の低域成分がそのまま復調アナログ信号となる。現行の48kHz標準化16bit量子化と等しい伝送容量である、768kHz標準化1bit量子化で直流から20kHzにわたり、80dBのダイナミックレンジを確保したうえ、100kHz程度までの信号の伝送が可能である。我々の研究室では1985年来この方式によってマルチチャンネル録音用ハードウェアを数台試作し、音響計測やスタジオ録音等実用に供している。

この信号は1bitであるから語同期の必要がなく、伝送誤りに強いという特徴を持っている。実験衛星COMETSを使ったこの方式による伝送実験を郵政省通信総合研究所と計画していたが、残念ながら先日の上昇ロケットによる打ち上げが軌道に乗らず、今のところ実験は実現していない。また一部では次世代デジタルオーディオへのこの方式の導入が提案されている。

「デジタル」がとれてこそ一人前

音響信号は実に10オクターブにおよぶ帯域を、100dBにおよぶダイナミックレンジで扱うまだまだ未解決の問題の多い分野である。しかしながら周波数も比較的安く取り扱いやすい、あるいは技術はとうに完成しており、いわゆるハイテクとは無縁の存在のように見なされがちである。

しかし現実はまだに正反對、1960年代後半に実用化されたレーザーをさっそく取り入れてCDを作り上げてしまったり、理論技術段階であった誤り訂正のアルゴリズムをLSIに押し込んでCDやDATあるいは衛星放送などとデジタルシステムを家庭にまで持ち込んだりと何とも果敢な頼もしい新しい技術に対して貪欲な分野であり、ひょっとすると超伝導なども何らかの形でオーディオ分野に顔を出すかもしれない。

いずれにせよデジタル技術はすでに特別な存在ではなく、手軽な道具として使われている。むしろ「デジタル」という修飾語がとれてはじめて、一人立ちしたといえるのかも知れない。その日の一日も早く来ることを祈って止まない。