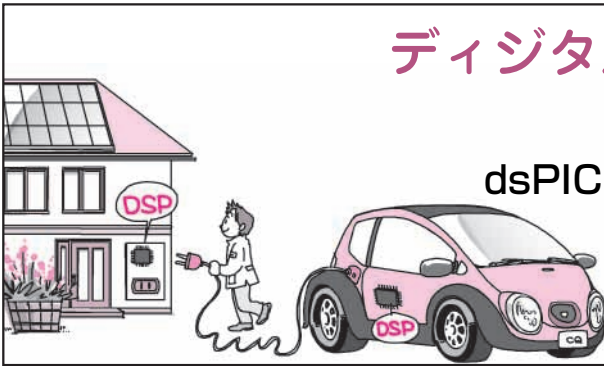


デジタル制御電源で 何ができるか(後編)

dsPICで作るDC-DCコンバータの ソフトウェア

浜田 智
Satoshi Hamada



前編(本誌2008年7月号)ではアナログ制御の基本を解説しました。後編ではデジタル制御の基本と実際のプログラミングを紹介します。

図1に、デジタル制御電源の基本構成を示します。PIやPID制御のエラー・アンプ、そしてシーケンス制御は完全にソフトウェア化されています。

デジタル化することによる制限

デジタル化によって、アナログ制御のときにはなかった制限が発生します。これらの制限は前提として

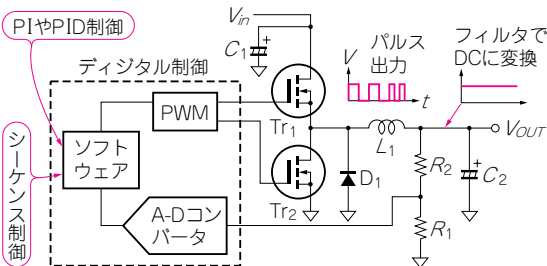


図1 デジタル制御電源の基本構成

エラー・アンプなどのアナログ回路をソフトウェア化する

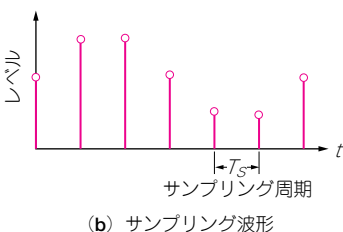
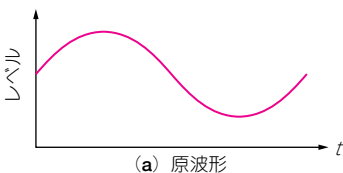


図2 アナログ→デジタルのサンプリング(離散化)
連続信号として考えると、サンプル点とサンプル点の間はゼロ

理解しておく必要があります。

■ アナログからデジタルへの変換

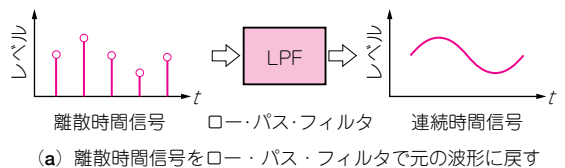
● サンプリングにより扱える周波数に上限ができる
アナログ信号のデジタルへの変換は、A-Dコンバータが行います。デジタル信号はその原理上、連続の信号ではありません。図2のように一定間隔で飛び飛びの値をとります。これをサンプリング(標本化)と呼びます。

このとき、サンプリングの間隔をサンプリング周期 T_S と呼び、その逆数をサンプリング周波数 f_S と呼びます。サンプリングされた瞬間しか値を持たないこの波形は、離散時間信号と呼ばれ、

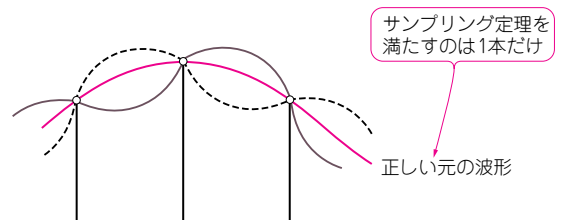
$$x(nT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t-nT) \quad \dots\dots(1)$$

と表します。この式は、サンプル点の振幅をディラックのデルタ関数という超関数で表現しています。

この飛び飛びの波形は、図3(a)のように適切なロー・パス・フィルタを通すと元の連続波形に戻すこと



(a) 離散時間信号をロー・パス・フィルタで元の波形に戻す



(b) サンプル点とサンプル点を通る結び方は一見いくらでもありそう
図3 離散時間信号を元の連続時間信号に戻すようす
サンプリング定理を満たすようにサンプリング周期を選ぶ

ができます。そもそも完全に元の波形に戻すことは可能なのでしょうか、一見、同図(b)のようにサンプル点と次のサンプル点を通る結び方はいくらでもありそうです。

完全に元の波形に戻すには、次の要件を満たす必要があります。それは、

A-Dコンバータでサンプリングする際、必要とするアナログ周波数の2倍以上のサンプリング周波数でサンプルされている

というものです。これを**サンプリング定理**と呼びます。サンプリング周波数の1/2の周波数を**ナイキスト周波数**と呼び、サンプリング周波数が決まっている場合、完全再生できるリミットの周波数はナイキスト周波数になります。ナイキスト周波数はスイッチング周波数より十分高くとる必要があります。

● 量子化により誤差(雑音)が発生する

アナログ信号のデジタルへの変換は、振幅方向でも飛び飛びの値をとります。A-Dコンバータは、12ビットなどの有限の解像度をもっています。

図4に示すように、その解像度より細かな信号変化を正確にデジタル・データに変換することはできません。ステップとステップの間のアナログ値は、どちらか近いほうのステップ値に丸められるのです。これは真値に対して誤差が付加されることを意味します。この誤差を**量子化雑音**と呼んでいます。

当然ながらステップ幅が小さい、つまり解像度の高いA-Dコンバータほど量子化雑音が小さく、S/Nが良くなります。一般的に、量子化雑音が信号成分と無相関とみなせる場合、量子化ビットNのA-Dコンバータの理論S/Nは、

$$S/N = 6.02N + 1.76 \text{ [dB]} \dots\dots\dots(2)$$

N: A-Dコンバータの量子化ビット数

となります。高S/Nが求められるオーディオの場合には16~24ビットが選ばれますが、デジタル制御電源では10~12ビットで十分です。

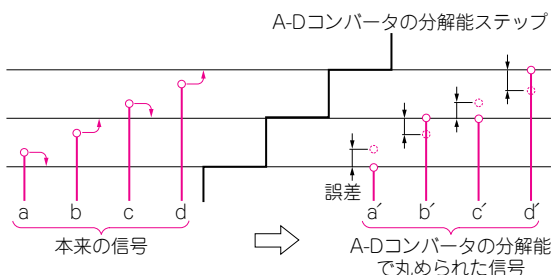


図4 A-Dコンバータの分解能によって誤差が発生する
誤差は雑音と考えられるので、必要なS/Nが得られるように分解能を選ぶ

■ デジタルをアナログに変換する

● スwitchingにはPWMがマッチする

デジタル信号をアナログ信号に戻すには、普通D-Aコンバータが使われますが、デジタル制御電源の場合、デジタル信号を図1のようにPWMモジュールでパルスの幅の変化として出力し、LCフィルタを通すことでアナログ信号に戻します。

● 復元できる周波数はPWM周期のおよそ1/10

PWMをD-Aコンバータと考えた場合、PWMの周期が100kHzであれば、サンプリング定理により、その1/2のナイキスト周波数の50kHzまで復元できそうな気がします。

しかし、前編(2008年7月号)の図10に示したようにPWMではイメージ成分が広がるので、1/2の周波数までは復元できないのが実際です。D-Aコンバータと違って、PWMには振幅方向の表現がないためです。

一般的に、PWMを用いる場合は、そのPWM周期の1/10までの周波数を復元できる目安とします。つまりPWM周期が100kHzならば、復元できるのは最大10kHz程度です。

高精度が求められるオーディオ用D級アンプでは、PWM周期と再生周波数の関係は10倍以上の比率となっています。

デジタル信号処理で必須のZ変換

デジタル制御電源では、アナログのエラー・アンプで行っていたPIやPID制御をソフトウェアに組んでいきます。デジタルで各制御要素をどのようにして実現するのかを解説します。

● 扱いやすくするためにZ変換を使う

デジタル信号処理には、**Z変換**という数式を用いて設計を進めます。普通、回路の信号処理を数学的に扱う場合、時間関数をそのまま扱うよりも、何らかの変換系にワープしたほうが扱いが楽になり、見通しがよくなります。Z変換もそういったものの一つです。

身近な例として交流理論があります。交流理論では虚数jの性質を使って正弦波の時間関数からベクトル

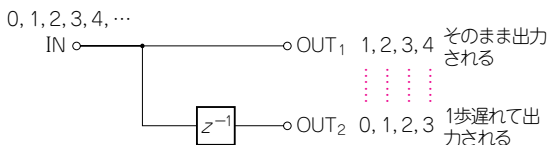


図5 z⁻¹は1サンプルの遅れを表す
デジタル制御でフィルタや積分/微分などを扱うために必要な要素