

# AVR121 : 過採取によるA/D変換分解能増強

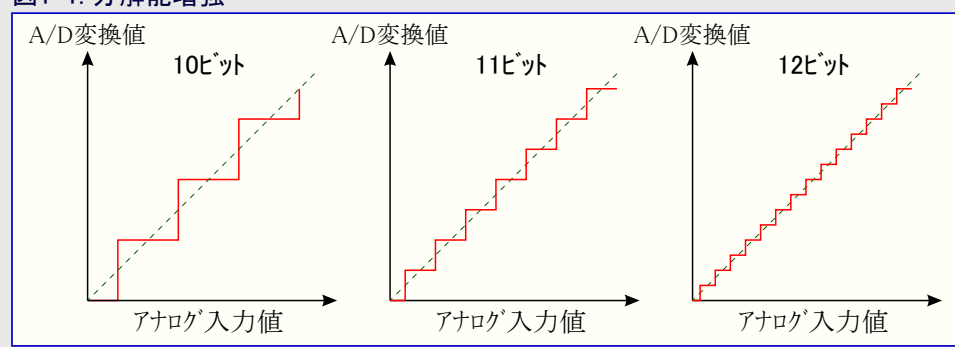
## 要点

- 過採取による分解能増加
- 平均化と間引き
- 平均化採取による雑音低減

## 1. 序説

AtmelのAVRは10ビット分解能のA/D変換器を提供します。殆どの場合で10ビット分解能は充分ですが、いくつかの場合でより高い精度が求められます。測定の分解能を改善するために、特別な信号処理技術が使えます。'過採取と間引き'と呼ばれる方法を使うことによって、外部A/D変換器を使わずにより高い分解能が達成できます。本応用記述はこの方法とこの方法を正しく動かすために履行されるべき必要とする条件を説明します。

図1-1. 分解能増強



## 2. 動作の理屈

本応用記述の残りを読む前に、読者は「AVR120 : AVRのA/D変換器の特性付けと校正」応用記述とAVRのデータシートの「A/D変換器」項を読むのを奨励されます。後続の例と数値は連続変換動作のシングルエンド入力に対して計算されます。A/D変換雑音低減動作は使われません。この方法は後続例内の数値を違えることで、他の動作種別でも有効です。

A/D変換器の基準電圧と分解能はA/D変換段階数を定義します。A/D変換器の基準電圧(VREF)はAVCC、内部1.1V/2.56VまたはAREFピンでの基準電圧を選択できます。より低いVREFはより高い電圧精度を提供しますが、入力信号の活動範囲を極小化します。2.56VのVREFが選択される場合、これは測定される最高入力電圧2.56Vで、変換結果での約2.5mV精度を使用者に与えます。代わりに利得段付きのA/D変換入力チャネルの使用を考慮できます。これはA/D変換器の活動範囲を犠牲にして、より良い電圧精度でのアナログ信号測定の可能性を使用者に与えます。より良い電圧分解能に対して活動範囲の交換を受け入れられないなら、改善された分解能に対する信号の過採取交換を選べます。けれども、この方法はA/D変換器の特性によって制限されます。過採取と間引きの使用はA/D変換の量子化誤差をより低くするだけで、A/D変換積分直線性に関して補償を行いません。

### 2.1. 採取周波数

ナイキストの定理は「波形を正確に再構築するために、信号は信号の帯域幅の最低2倍より速く採取されなければならない、さもなければ重要な範囲(通過帯域)の内側の周波数で偽周波数になるでしょう」と述べています。必要とされる最低採取周波数は、ナイキストの定理に一致する、ナイキスト周波数です。

$$\text{式2-1. ナイキスト周波数} \quad f_{nyquist} = 2 \times f_{signal}$$

ここで $f_{signal}$ は入力信号内の関心がある最高周波数です。 $f_{nyquist}$ より高い採取周波数は'過採取(オーバーサンプリング)'と呼ばれます。けれども、この採取周波数は正に理論上の絶対最低採取周波数です。実際問題として、使用者は時間の領域に於いて、測定した信号の可能な最良の標本を与えるために、可能な最高の採取周波数であればよいと思います。殆どの場合で入力信号は既に過採取されていると言えます。



8ビット AVR<sup>®</sup>  
マイクロコントローラ

## 応用記述

本書は一般の方々の便宜のため有志により作成されたもので、Atmel社とは無関係であることを御承知ください。しおりのはじめにでの内容にご注意ください。

Rev. 8003A-09/05, 8003AJ3-01/21

採取周波数はCPUクロックの前置分周の結果で、より低い前置分周係数がより高いA/D変換クロック周波数を与えます。或る点で、より高いA/D変換クロックは実効ビット数(ENOB: Effective Number Of Bits)が低下するために変換の精度を減らします。全てのA/D変換器は帯域幅制限を持ち、AVRのA/D変換器も例外ではありません。データシートに従い、変換結果で10ビット分解能を得るため、A/D変換クロック周波数は50kHz~200kHzであるべきです。A/D変換クロックが200kHzのとき、採取周波数は約15k採取/秒(SPS)で、そしてそれは採取信号内の高い周波数を約7.5kHzに制限します。データシートに従い、A/D変換クロックは1MHzまでの周波数で駆動でき、それによってこれはENOBをより低くするでしょう。

### 3. 理論

#### 3.1. 過採取と間引き

‘過採取と間引き’の背景理論はむしろ複雑ですが、この方法を使うことはかなり容易です。この技法はより多くの採取量が必要です。これらの追加採取は信号の過採取によって成し遂げられます。分解能の各追加ビット(n)に対して、信号は4回採取されなければなりません。どの周波数で入力信号を採取するかは式3-1.で与えられます。平均した時により多くの採取量が入力信号のより良い標本を与えるので、アナログ入力信号の可能な最良の標本を得るために、これだけは信号を過採取する必要があります。これは本応用記述の主要な要素として考慮され、後続する理論と例によって更に説明されるでしょう。

$$\text{式3-1. 過多採取周波数} \quad f_{\text{oversampling}} = 4^n \times f_{\text{nyquist}}$$

#### 3.2. 雑音

この方法を正しく動かすには、関心のある信号成分が変換の間に変化すべきではありません。けれども、分解能増強の成功に対する別の基準は、採取時に入力信号が変化しなければならないことです。これは矛盾するように思えるかもしれませんが、この場合の偏移はほんの数LSBを意味します。変化は信号の雑音成分として見られるべきです。信号の過採取時、信号内の小さな変化のその求めに応じるために雑音があるべきです。A/D変換器の量子化誤差は少なくとも0.5LSBです。従って、雑音振幅はLSBを交互するのに0.5LSBを越えなければなりません。1~2LSBの雑音振幅は、多数の採取が全く同じ値にならないことを保証するでしょうから、ずっと良くなります。

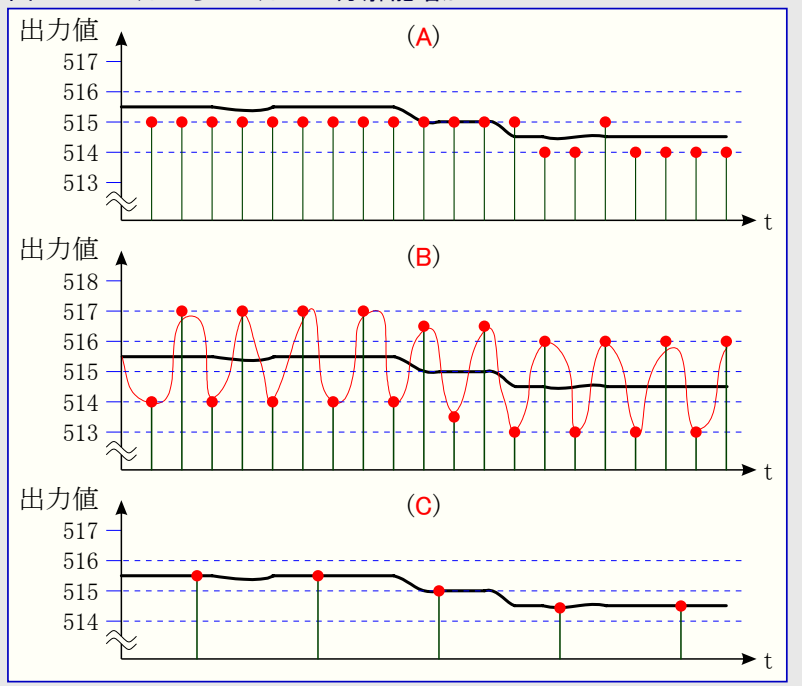
間引き技法使用時の雑音に関する基準は以下です。

- ・ 関心のある信号成分は変換の間に意味なく変化すべきではありません。
- ・ 信号内に或る程度の雑音が存在すべきです。
- ・ 雑音の振幅は少なくとも1LSBであるべきです。

普通、変換の間に或る程度の雑音が存在するでしょう。その雑音は熱雑音、CPUコアからの雑音、I/Oポート切り替え、電源の変動、その他で有り得ます。この雑音は殆どの場合でこの方法を動かすのに充分でしょう。特殊な条件によっては、或る程度の人為的な雑音を入力信号に加える必要があるかもしれません。この方法は‘デザリング(身震い)’として判断されます。図3-1.のAは2つの量子化段階間の電圧値での信号測定の問題を示します。同じ低調な値が結果になるので、4つの採取の平均は助けにならないでしょう。それは信号変動を減じるのを助けるだけかもしれません。図3-1.のBは或る程度の人為的な雑音を加えることにより、変換結果のLSBが交互することを示します。図3-1.のCで示されるように、それらの採取の4つを加算することが量子化段階を不完全にし、より良い入力値の標本を与える結果を生みます。A/D変換器の‘仮想分解能’は10ビットから11ビットに増します。この方法は‘間引き’として判断され、3.3.項で更に説明されるでしょう。

この方法を使う別な理由は信号対雑音(S/N)比を増すことです。実効ビット数(ENOB)の増強は、より大きな2進数で雑音を撒き散らすでしょう。各2進桁で影響する雑音は減るでしょう。採取周波数を2倍にすることは帯域内雑音を3dB下げ、測定分解能を0.5ビット増やすでしょう。

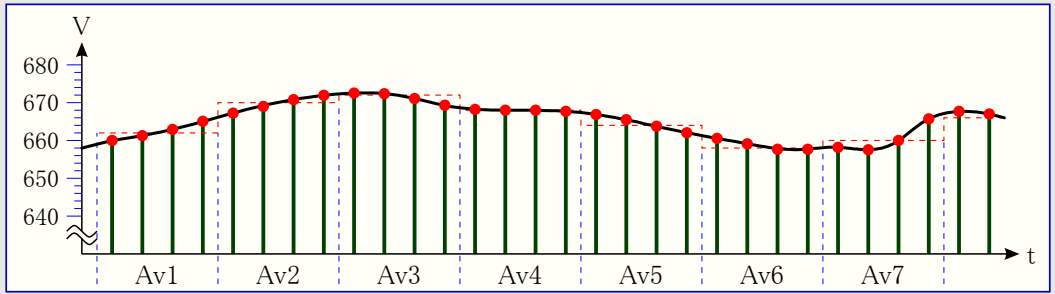
図3-1. 10ビットから11ビットへの分解能増加



### 3.3. 平均化

伝統的な平均化の意味は $m$ 採取に増やして結果を $m$ で割ることです。一般的な平均化として判断してください。A/D変換測定からのデータ平均化は低域通過濾波器(ローパスフィルタ)と等価で、信号変動や雑音を低減する利点を持ち、入力信号内の頂点を平らにします。移動平均法はこれを行うのに非常によく使われます。これは $m$ 回読み取り、それらを循環キュー内に置き、最終 $m$ 個の平均を意味します。これは各採取が最終 $m$ 採取の結果なので僅かな遅延時間を与えます。これは $m$ 窓の重複ありまたはなしで行えます。図3-2は $m$ 窓重複なしでの7つの個別移動平均結果(Av1~Av7)を示します。

図3-2. 移動平均原理



一般的な平均が変換の結果を増やさないのを覚えて置くことが大事です。間引きまたは内部補間は過採取と組み合わせた平均化の方法で、それは分解能を増やします。低域通過濾波と過採取デジタル信号処理した信号は度々内部補間として判断されます。この条件では、内部補間がより大きな採取量の'平均'の結果として新しい標本(採取値)を生成するのに使われます。より多くの平均された採取数と多くの選択的な低域通過濾波器が内部補間をより良くするでしょう。追加の採取(数) $m$ は丁度通常の平均化でのように、過採取する信号の追加によって成し遂げられますが、その結果は通常の平均化でのように $m$ で除算されません。代わりに結果は $n$ 回右移動されます。ここで $n$ は答えを正しく尺度調整するための求められた分解能の追加ビット数です。2進数を1回右移動することは2の除数で2進数を除算するのと当価です。式3-1で見られるように、10ビットから12ビットへの分解能増加は16個の10ビット値の総和を必要とします。16個の10ビット値の合計は、最後の2ビットが価値ある情報を期待できない、14ビットの結果を生成します。12ビットに'戻す'にはその結果を尺度調整する必要があります。式3-2で与えられる尺度係数 $sf$ は、結果を正しく尺度補正するために、 $4^{12}$ 採取の合計が除算されるべき係数です。 $n$ は望む追加ビット数です。

$$\text{式3-2.} \quad sf = 2^n$$

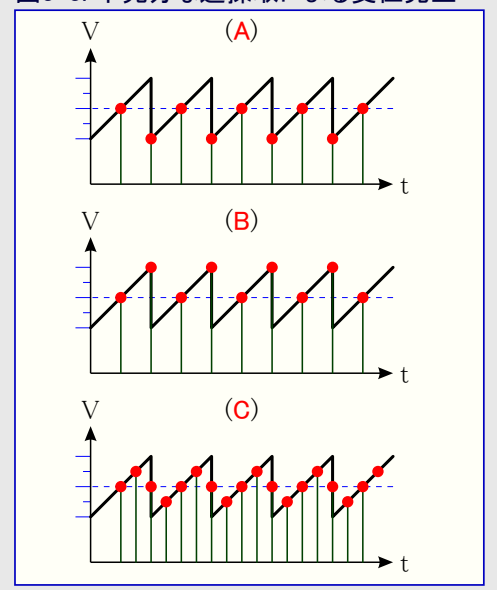
### 3.4. '過採取と間引き'は何時動くのか?

通常、信号は或る程度の雑音を含み、この雑音はかなり度々ガウス雑音(もつと共通的には広い周波数スペクトル、周波数範囲全体に渡って分割されたものに等しい総エネルギーで認識される、白色雑音(ホワイトノイズ)または熱雑音として知られる)の特性を持ちます。これらの場合では、雑音の振幅がA/D変換のLSBを交互するのに充分であれば、'過採取と間引き'の方法は動くでしょう。

他の場合では、入力信号に人為的な雑音を加える必要があるかもしれず、この方法はデジタリング(微振動)と判断されます。この雑音の波形はガウス雑音であるべきですが、周期的な波形でも動くでしょう。この雑音信号がどの周波数であるべきかは採取周波数に依存します。経験則は" $m$ 採取増加時、雑音信号周期は $m$ 採取の周期を越えるべきではない"です。雑音の振幅は少なくとも1LSBであるべきです。信号に人為的な雑音を追加するとき、雑音が0の値を意味するのを覚えて置くことが重要で、従って不十分な過採取は図3-3で示されるように変位(オフセット)を生じるかもしれません。

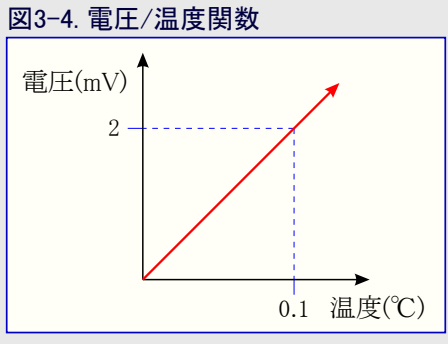
破線は鋸波の平均値を描きます。図3-3のAは負の変位を生じます。図3-3のBは正の変位を生じます。図3-3のCでは採取が充分で、変位が避けられます。人為的な雑音信号を作成するのに、AVRのタイマ/カウンタの1つが使えます。タイマ/カウンタとA/D変換器が同じクロック元を使うため、これは雑音同期の可能性と変位を避けるための採取周波数を与えます。

図3-3. 不十分な過採取による変位発生



### 3.5. 例1

ダブリン(Dublin,アイルランドの首都)の醸造主は彼の醸造所で工程の温度を測定することを欲します。緩やかに変化する信号が温度測定を表し、その環境温度での標準電圧は2.5Vです。図3-4.は温度測定装置の特性を示します。



醸造主は入力信号の活動範囲を狭めることを望まず、A/D変換器に対して5Vの基準電圧を選びます。この場合は、結果のLSBが約5mV段階を表すため、A/D変換器が十分な精度の変換結果を提供できません。これは0.25°C単位程度の結果を与えるでしょうから、これは受け入れられません。醸造主は0.1°C精度を持つ結果を欲望し、そしてそれは2mV以下の電圧分解能を要求します。測定が12ビットA/D変換器で代行されたなら、LSBが表す電圧'段階'は約1.22mVに減少するでしょう。醸造主が行うのに必要な何かは、10ビットA/D変換器を仮想12ビットA/D変換器に変形することです。入力信号は非常にゆっくり変化し、従って非常に高い採取周波数は必要とされません。データシートに従い、A/D変換クロック周波数は10ビット実効分解能を保証するために50kHz~200kHz間であるべきです。従って醸造主は50kHzのA/D変換クロック周波数を選びます。それで採取周波数は約3800採取/秒(SPS)になります。表3-1.は $V_{in}=2.4729V$ ,  $V_{REF}=5V$ 時にこの値を測定する各種分解能任意選択を示します。

表3-1. 分解能任意選択

分解能	電圧分解能	過採取	右移動	仮想間引き結果	仮想電圧表現	最大帯域幅(注)
10ビット	約5mV	なし	なし	なし	2.4658V	約7.6kHz
11ビット	約2.5mV	4倍	1回	1012	2.4707V	約1.9kHz
12ビット	約1.22mV	16倍	2回	2025	2.4719V	約475Hz
13ビット	約610μV	64倍	3回	4051	2.4725V	約118Hz
14ビット	約300μV	256倍	4回	8103	2.4728V	約29Hz
15ビット	約150μV	1024倍	5回	16206	2.4728V	約7Hz
16ビット	約75μV	4096倍	6回	32413	2.4729V	約3Hz

注: A/D変換クロック=200kHz

単一変換の結果は505で、最初は一見正しいと思われるかもしれませんが。しかし、この2進数は例えば2.4683Vにも対応しています。これは使用者を不安にし、温度測定での誤りを引き起こします。或る場合ではこれが重要かもしれません。前で結論付けされたように、信号は通常間引き法を可能にするための十分な雑音を含んでいます。

分解能を1ビット増やすため、同様の'隣接'となる4採取に増やされます。これらの採取は雑音のために他の各々と数LSB異なる値を持ちます。これらの4採取は加算されます( $508+507+505+505=2025$ )。間引き原理に従い、答えは直ぐに11ビットへの縮尺が必要です。これはn回の右移動を必要とし、ここでのnは希望する追加ビット数です。結果は1012です。分解能増加後、元の量子化段階間の採取を成し遂げることが突然に可能となります。未だ信号は更に12ビットへ分解能を増すために充分過採取されています。16回の10ビット採取と結果の2回の右移動がこれを行うでしょう。その結果は2025です。12ビットの結果を使って誤差余裕が約1.22mVに減少されるので、この数値はもっと信用できます。本例は、約5mVの電圧精度で秒当たり3800回の採取、また12ビット分解能の約1.22mVの電圧精度で秒当たり240回の採取の緩やかに変化する信号で動き始める使用者を示しています。

使用者は伝統的な方法、16回の12ビット採取の平均での信号変動除外までも未だ希望するかもしれません。これは16採取に増やして結果を16で除算することによって行われます。最後に、使用者は隣接した12ビット採取を平均した16個から成る15SPSを持ちます( $16 \times 16 \times 15 = 3840$ )。

- ・ 通常平均化は乱雑音の結果を極小化します。
- ・ '過採取と間引き'は分解能増強のために雑音を利用します。



### 3.6. 例2

この方法の効果を示すのに、次の例はより高い精度を得るのに外部A/D変換器の使用を必要としないことを示します。0Vから5Vまでの傾斜直線信号を生成するのに信号発生器が使われます。'低雑音'環境、信号発生器とSTK500に装着されたAVRマイクロコントローラとでは、10ビット信号の最下位側数ビットを交互するのに十分な雑音でないかもしれませんが。従ってLSBを交互するために、入力信号に人為的な'雑音'を付加する必要があります。4つの方法が首尾よく使われます。

- ・ 信号発生器で生成した雑音を直接入力信号に付加
- ・ PWMを使ってAVRで雑音を生成し、それを入力信号に付加
- ・ VREFとしてAVCC使用時、AVRで生成した雑音をAREFに付加
- ・ VREFとしてAREF使用時、AVRで生成した雑音をAREFに付加

信号を微振動する最も簡単な方法は白色雑音(ホワイトノイズ)を直接信号に付加することですが、殆どの場合で使用者はその測定環境に於いてこの種の雑音信号を持たないか、または持つのを望みません。より利用可能な方法はPWMを生成するようにAVR内のタイマ/カウンタの1つを設定し、そして数LSBのp-p(peak-to-peak)値波とのDCとして現れるようにこの'雑音'を低域通過濾波することです。このような濾波器の詳細と部品値の例は図3-5.で示されます。

VCCが5Vの場合、AREFピンでの濾波された信号はタイマ/カウンタのデューティサイクルが0%の時に2.5Vとして、タイマ/カウンタのデューティサイクルが100%の時に5Vとして現れます。本例ではPWM信号のデューティサイクルが50%、基本周波数が約3900Hzです。10kΩの可変抵抗器がこの波形を調節するのに使われます。PWM信号はAREFピンでA/D変換器への基準電圧、またはAREFピンへ接続される雑音発生器のどちらかとして使われます。AVCCとでA/D変換器基準電圧として設定します。考えは基準電圧内の小さな変化が、入力信号を邪魔することなく、入力信号内の小さな変化と同じ効果を与えることです。

図3-6.で示されるような傾斜直線信号の測定は、図3-7.、図3-8.、図3-9.、図3-10.で示されるような4つの図表を与えます。図3-7.は人為的雑音付加なしで測定した入力傾斜信号の10ビット不連続標本を示します。'量子化段階'が非常に目立ちます。分解能を増やすには量子化段階を縮める必要があります。

図3-8.はAREFがA/D変換器基準電圧で、AREFが数LSB雑音を付加されている時の入力信号の12ビット不連続標本を示します。

式3-1.に従い、12ビットの結果の各々は16回の10ビット採取から成ります。変位(オフセット)はA/D変換器に関して補正され、AVR120応用記述に従って利得誤差の補正も必要です。図3-9.は入力信号の14ビット不連続標本を示し、図3-10.が入力信号の16ビット不連続標本を示します。雑音を含む信号の測定時、またはこの例のように基準電圧が変化するとき、最高と最低の値が雑音信号の振幅と同じ値で減じられ、測定された信号の活動範囲内で僅かな低減を与えるのを覚えて置くことが重要です。この或る場合には、安全余裕として差分は100mVに調節されました。

図3-5. 低域通過濾波器

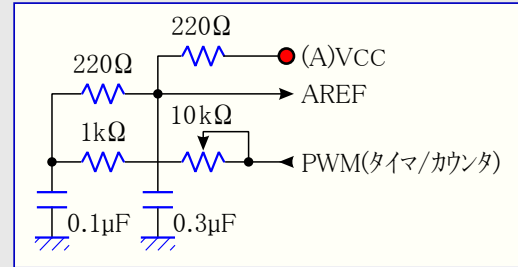


図3-6. 傾斜信号,0~5V,100%同期

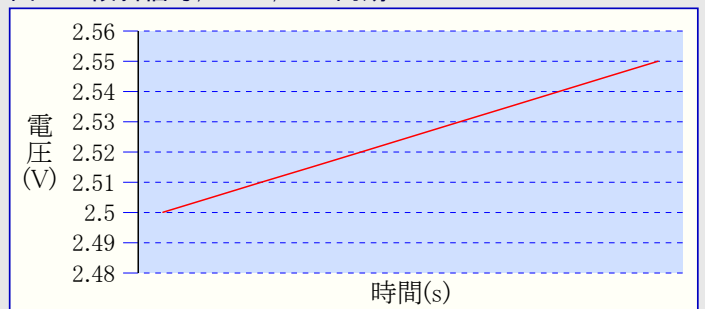


図3-8. 12ビット分解能で再生された傾斜信号

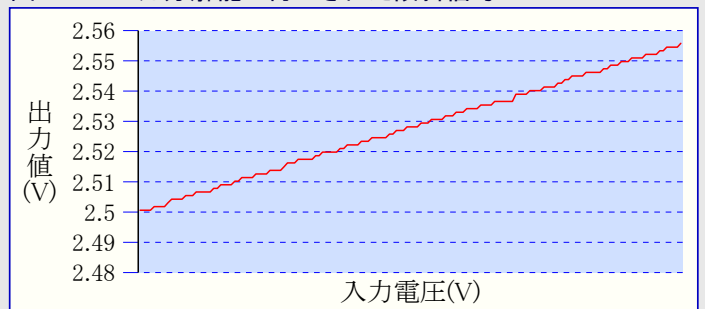


図3-7. 10ビット分解能で再生された傾斜信号

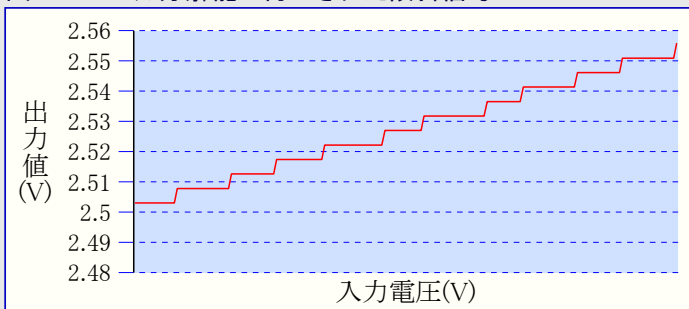


図3-9. 14ビット分解能で再生された傾斜信号

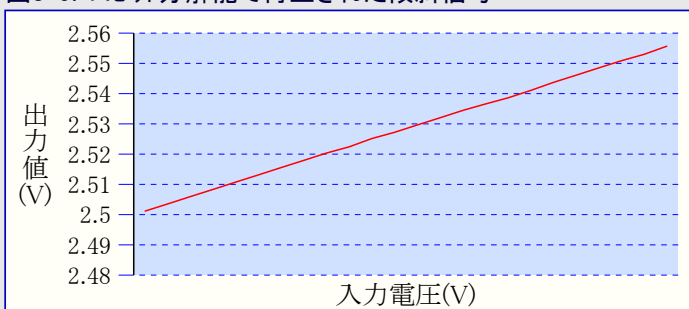
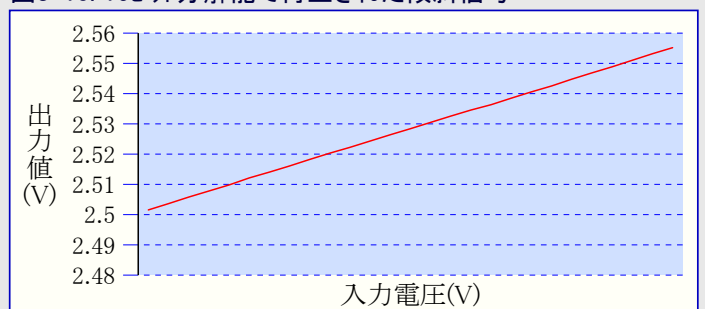


図3-10. 16ビット分解能で再生された傾斜信号



過採取と間引きの方法を使うことで容易に見ることができ、それは意味ある分解能増加を可能にします。

## 要約

A/D変換器が信号を採取するとき、信号を不連続な段階で量子化します。これは度々量子化誤差として判断されるいくつかの誤差を誘引します。通常の平均化は信号の変動を平らにならすだけで、一方間引きは分解能を増やすでしょう。4倍過採取された信号では4つの隣接データ点が新しいデータ点を生成するために平均化されます。信号をどの周波数で過採取するかは、[式3-1](#)によって計算できます。それらの追加採取を加算して係数 $n$ で右移動した結果が $n$ ビット増強された分解能での結果をもたらします。新しい結果を得るための4つのA/D変換結果の平均化は、A/D変換器が1/4の速度で採取した場合と同じですが、それが量子化雑音を平均化する効果を持ち、そしてそれはS/N比(SNR, 信号対雑音比率)を改善します。これは実効ビット数(ENOB)を増し、量子化誤差を減らすでしょう。より速いA/D変換器と低いメモリ費用とでの過採取の利点は費用効率でそれが望まれるでしょう。

- 或る雑音が少なくても1LSBで信号内に存在しなければなりません。
- 雑音振幅が不十分なら、信号に雑音を追加してください。
- $4^n$ 回10ビット採取を累積してください。ここで $n$ は分解能での望む追加ビット数です。
- 累積結果を $n$ 回の右移動によって尺度補正してください。
- AVR120応用記述に従って誤差を補償してください。



## 本社

### *Atmel Corporation*

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131, USA  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 487-2600

## 国外営業拠点

### *Atmel Asia*

Unit 1-5 & 16, 19/F  
BEA Tower, Millennium City 5  
418 Kwun Tong Road  
Kwun Tong, Kowloon  
Hong Kong  
TEL (852) 2245-6100  
FAX (852) 2722-1369

### *Atmel Europe*

Le Krebs  
8, Rue Jean-Pierre Timbaud  
BP 309  
78054 Saint-Quentin-en-Yvelines  
Cedex  
France  
TEL (33) 1-30-60-70-00  
FAX (33) 1-30-60-71-11

### *Atmel Japan*

104-0033 東京都中央区  
新川1-24-8  
東熱新川ビル 9F  
アトメル ジャパン株式会社  
TEL (81) 03-3523-3551  
FAX (81) 03-3523-7581

## 製造拠点

### *Memory*

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131, USA  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 436-4314

### *Microcontrollers*

2325 Orchard Parkway  
San Jose, CA 95131, USA  
TEL 1(408) 441-0311  
FAX 1(408) 436-4314  
  
La Chantrerie  
BP 70602  
44306 Nantes Cedex 3  
France  
TEL (33) 2-40-18-18-18  
FAX (33) 2-40-18-19-60

### *ASIC/ASSP/Smart Cards*

Zone Industrielle  
13106 Rousset Cedex  
France  
TEL (33) 4-42-53-60-00  
FAX (33) 4-42-53-60-01

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.  
Colorado Springs, CO 80906, USA  
TEL 1(719) 576-3300  
FAX 1(719) 540-1759

Scottish Enterprise Technology Park  
Maxwell Building  
East Kilbride G75 0QR  
Scotland  
TEL (44) 1355-803-000  
FAX (44) 1355-242-743

### *RF/Automotive*

Theresienstrasse 2  
Postfach 3535  
74025 Heilbronn  
Germany  
TEL (49) 71-31-67-0  
FAX (49) 71-31-67-2340

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.  
Colorado Springs, CO 80906, USA  
TEL 1(719) 576-3300  
FAX 1(719) 540-1759

### *Biometrics*

Avenue de Rochepleine  
BP 123  
38521 Saint-Egreve Cedex  
France  
TEL (33) 4-76-58-47-50  
FAX (33) 4-76-58-47-60

## 文献請求

[www.atmel.com/literature](http://www.atmel.com/literature)

## © Atmel Corporation 2005.

Atmel製品は、ウェブサイト上にあるAtmelの定義、条件による標準保証で明示された内容以外の保証はありません。本製品は改良のため予告なく変更される場合があります。いかなる場合も、特許や知的技術のライセンスを与えるものではありません。Atmel製品は、生命維持装置の重要部品などのような使用を認めておりません。

本書中の®、™はAtmelの登録商標、商標です。  
本書中の製品名などは、一般的に商標です。

## © HERO 2021.

本応用記述はAtmelのAVR121応用記述(doc8003.pdf Rev.8003A-09/05)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には( )内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。