

## AVR401 : 8ビット精度A/D変換器

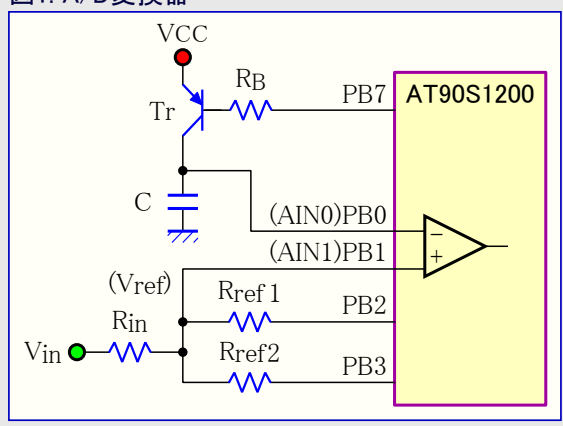
## 要点

- 非常に低い費用
- 高い精度
- 部品の不正確さを消す自動校正
- 0~VCC間の電圧測定
- 最大変換時間:1,1ms

## 序説

この応用記述はAVRマイクロコントローラで一種の2重積分A/D変換器を実行する方法を記述します。この変換器は非常に低費用で、AVRに加えて6つの個別部品だけを必要とします。AVRの5つのピンが使用されます(図1をご覧ください)。この例はAT90S1200に基きますが、アナログ比較器を持つどのAVRでも使用することができます。

図1. A/D変換器



## 動作の理屈

コンデンサはトランジスタによって供給される定電流で充電されます。コンデンサ電圧は直線的に上昇します。コンデンサを放電するのにAIN0ピンが0を適用された出力に設定されます。Rref1とRref2の抵抗網によってVCC/2の基準電圧が供給されます。PB1とPB2のピンが入力として形態設定されると、基準(電圧)がOFFされ、AIN1ピンの電圧レベルはVinの入力電圧になります。ピンを出力として設定し、“0”と“1”を適用することにより、AIN1ピンのレベルは(抵抗が同じ値の場合に)VCC/2になります。入力抵抗(Rin)は測定誤差を避けるために、Rref1とRref2の基準抵抗よりも最低100倍大きくなければなりません。

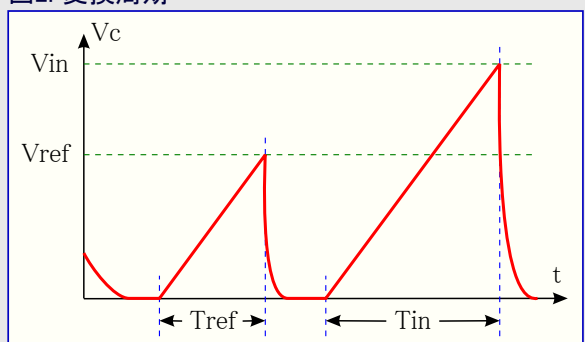
変換に用いられる方法は次の通りです。

1. 基準(電圧)をONにしてください。
2. 基準電圧に達するまでコンデンサを充電してください。これに必要な時間(Tref)を測定してください。
3. 基準(電圧)をOFFにしてコンデンサを放電してください。
4. 入力電圧に達するまでコンデンサを充電してください。これに必要な時間(Tin)を測定してください。

この変換周期は図2で示されます。

時間測定はタイマ/カウンタ溢れ割り込みを使用することで9ビットに拡張されたタイマ/カウンタによって実行されます。

図2. 変換周期



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. 0953C-02/03, 0953CJ2-11/13

## 計算

VCCは5Vと仮定します。入力電圧と基準電圧の関連が次式で与えられます。

$$V_{in} = \frac{V_{ref} \times T_{in}}{T_{ref}} \dots\dots\dots \text{式1.}$$

変換での理想出力は0Vが0、5Vが255に対応する8ビット数値です。基準電圧 (VCC/2)は従って128に対応します。式は次のように書き直すことができます。

$$V_{in} = \frac{T_{in} \times 128}{T_{ref}} \dots\dots\dots \text{式2.}$$

けれども、基準用抵抗に於ける不正確さで基準電圧は僅かに変わるかもしれませんが。これを補償するため、入力に既知の電圧を印加し、そしてこれを基準 (電圧)と比較することによって校正を実行することができます。印加された校正電圧が正確に2.5Vなら、基準電圧は次式によって得られます。

$$V_{ref} = \frac{T_{ref} \times V_{cal}}{T_{cal}} = \frac{T_{ref} \times 128}{T_{cal}} \dots\dots \text{式3.}$$

電源投入中にPB7ピンをLowに保持することによって校正周期が実行されます。そして校正電圧を印加してPB7ピンを開放してください。(訳注:試供プログラムに合わせ、前2行修正)これが校正を開始し、1度実行され、基準電圧の値がEEPROM内に格納されます。標準動作の時は基準電圧がEEPROMから読まれ、入力電圧は式1.を使用して計算されます。

## 構築例

結果の出力が8ビットになるように、計時器(タイマ/カウンタ)は分解能を維持するために最低9ビットであるべきです。部品はコンデンサをVCCまで充電する公称時間が計時器の約256計数になるように選択されるべきです。そのようにして最大計時周期よりも長い、または短すぎる充電時間を引き起こし、より低い分解能を生じることなく、部品値での不正確さと温度変化は許容されます。十分な精度を達成するために8またはより大きな前置分周係数が使用されるべきです。AT90S1200のタイマ/カウンタは8ビットだけで、故に第9ビットはソフトウェアで処理されなければなりません。以降の例は部品値がどう得られるかを説明します。

最初にどのクリスタル周波数で動作するかを決めてください。4MHzクリスタルでのクロック周期は250nsです。前置分周器にCK/8を設定することにより、計時器は2μs毎に増やされます。9ビットでの計時器最大周期は512×2μs=1024μsです。これから2×Trefを512μsに設定します。

定電流でのコンデンサの充電は次式によって記述されます。

$$V = \frac{I}{C} \times t \dots\dots\dots \text{式4.}$$

コンデンサ容量、時間、基準電圧が既知の時に必要とする電流を求めることができます。

$$I = \frac{V \times C}{t} \dots\dots\dots \text{式5.}$$

コンデンサはVCC=5Vまで充電され、220μFのコンデンサでトランジスタは2.15mAの電流を供給しなければなりません。RB値はトランジスタのhFEに依存します。BC558A(PNPトランジスタ)についてはhFEが125~250の範囲内です。指定範囲内のどのhFEも使用できるので、使用に関してこれはこのトランジスタを理想的と見積もります。hFEの全範囲が使用できるのを確かめるために、平均値188が計算に用いられます。結果のベース電流は11.4μAです。

トランジスタは対応するピンに“0”を適用することによってONにされます。この電流値に於いてB(ベース)-E(エミッタ)間電圧は約0.1Vです。ベース抵抗は次式で得られます。

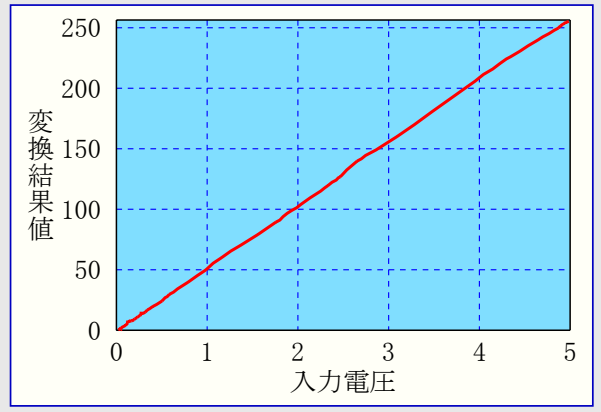
$$R_B = \frac{V_{CC} + V_{BE}}{I_B} = \frac{4.9V}{11.4\mu A} = 430k\Omega \dots\dots \text{式6.}$$

基準電圧はRref1とRref2の分圧器によって生成されます。入力電圧が基準電圧に影響を及ぼさないように、Rinはこれらの2つよりもずっと大きくなければなりません。Rinに100kΩ、Rref1とRref2の各々に1kΩが適当です。

トランジスタは可能な限りアナログ比較器入力から遠く離れたピンに接続されるべきです。ピンが切り換えられる時に近隣ピンに尖頭雑音が現れます。これはコンデンサ電圧が測定電圧に達する前に尖頭雑音がアナログ比較器を起動するかもしれないので、低電圧測定時に問題を引き起こすでしょう。

図3.は上の例で計算した部品値を使用して4MHzでクロック駆動される応用に対して測定された直線性を示します。

図3. 測定された直線性



## 実装

ソフトウェアは多数のサブルーチンから成ります。“reference”と“convert”のルーチンは充電とタイミングを扱います。それらが完全に実行された後で主プログラムは必要とする計算を実行しなければなりません。これは乗算“mul9”と除算“div17u”を実行する2つのサブルーチンを用いて行われます。他のルーチンと主プログラムによって使用される2つの遅延もあります。これらはコンデンサを完全に放電するためと各変換間で遅延を生成するのに使用されます。

### “reference”サブルーチン – 基準電圧測定

このルーチンはコンデンサを放電し、トランジスタをONにしてコンデンサ電圧が基準電圧と等しくなるまでコンデンサを充電します。充電の開始から電圧が等しくなるまでの時間が測定されます。そしてコンデンサが再び放電されます。この充電時間は“convert”ルーチンからの充電時間と共に入力電圧を計算するのに用いられます。

このルーチンは変換が実行される時毎に呼び出されなければならない訳ではなく、周囲温度の変化に依存します。特にトランジスタの $h_{FE}$ パラメータがかなり温度依存で、故に周囲温度が変化する場合にこのサブルーチンが度々実行されなければなりません。例プログラムに於いて、“reference”ルーチンは変換が実行される時毎に呼び出されます。

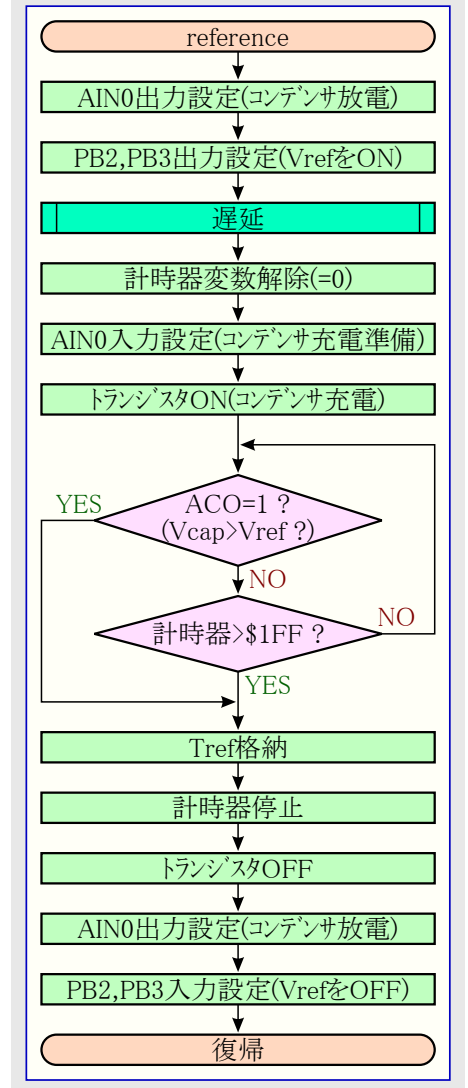
表1. “reference”サブルーチン性能表

項目	値
コード量(語)	24
実行周期数	基準電圧に依存
使用レジスタ	下位レジスタ=0 上位レジスタ=2 全体変数=1

表2. “reference”使用レジスタ

レジスタ	入力	内部	出力
R17			$T_{ref}$ : 基準電圧到達時間を保持
R18		TH: 計時器上位部	
R19		temp: 一時レジスタ	

図4. “reference”流れ図



## “input”サブルーチン - 入力電圧測定

このルーチンはトランジスタをONにしてコンデンサ電圧が入力電圧と等しくなるまでコンデンサを充電します。その後、コンデンサは放電されます。これを行うのに要した時間が測定され、Tin内に格納されます。

コンデンサが完全に放電されるのを保証するために、2つの変換周期間に数μsの遅延を置くべきです。例プログラムに於いて、これは遅延ルーチンと呼ぶことによって行われます。

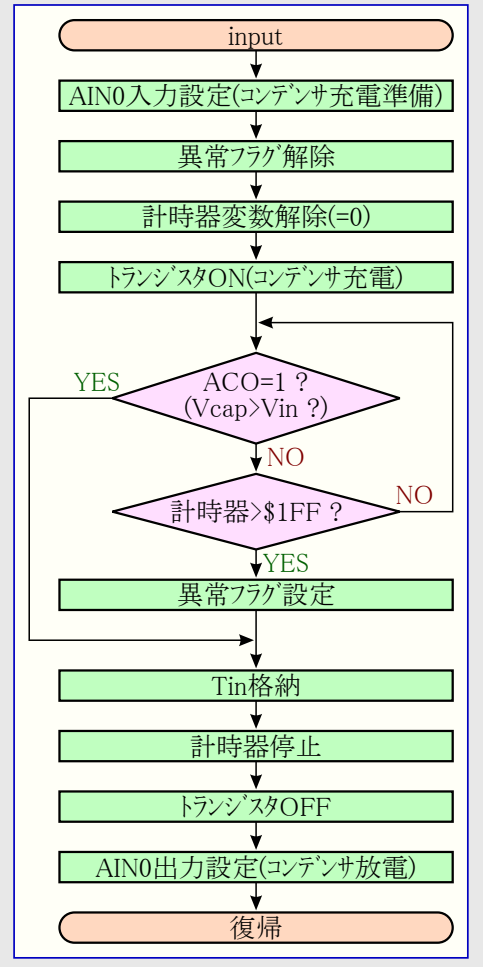
表3. “input”サブルーチン性能表

項目	値
コード量(語)	19
実行周期数	入力電圧に依存
使用レジスタ	下位レジスタ=2 上位レジスタ=0 全体変数=1

表4. “input”使用レジスタ

レジスタ	入力	内部	出力
R14			TinH:入力電圧充電時間上位部
R15			TinL:入力電圧充電時間下位部
R19		temp:一時レジスタ	

図5. “input”流れ図



## “T0\_int”割り込み処理ルーチン

このルーチンに関する機能は16ビット計時器が作成されるようにTH変数を増やすことだけです。(下位側)9ビットだけが使用されます。

表5. “T0\_int”割り込み性能表

項目	値
コード量(語)	2
実行周期数	RETI命令を含み9
使用レジスタ	下位レジスタ=0 上位レジスタ=0 全体変数=1

## “mpy9u” 9 × 8ビット乗算

このルーチンは9 × 8ビット乗算を実行します。9ビット乗数はキャリー フラグ(C:MSB)と“mp9u”レジスタに格納されなければなりません。被乗数は“mc9u”レジスタに格納されます。答えは“C:m9uH:m9uL”に置かれます。この結果に使用されるレジスタは除算ルーチンに対して入力に使用されるそれらと同じです。このルーチンはAVR200応用記述で記載される“mpy8u”(日本語版“ML8U”)に基きます。

表6. “mpy9u”サブルーチン性能表

項目	値
コード量(語)	11
実行周期数	83
使用レジスタ	下位レジスタ=3 上位レジスタ=0 全体変数=1 ステータス フラグ=C

表7. “mpy9u”使用レジスタ

レジスタ	入力	内部	出力
R0	mc9u:被乗数		
R1	mp9u:乗数		m9uL:結果下位バイト
R2			m9uH:結果上位バイト
Cフラグ	乗数第9ビット		結果第17ビット
R19		temp:繰り返し計数器に使用	

## “div17u”17÷16ビット除算

このルーチンは17÷16ビット除算を実行します。17ビット被除数はキャリーフラグ(C)が最上位ビットで(C:didH:didL)変数に格納されなければなりません。除数は(divH:divL)変数に格納されます。結果は(dresH:dresL)変数と(remH:remL)内の剰余に置かれます。このルーチンはAVR200応用記述で記載される“div16u”(日本語版“DV16U”)に基きます。

表8. “div17u”サブルーチン性能表

項目	値
コード量(語)	18
実行周期数	最小209,最大292
使用レジスタ	下位レジスタ=6 上位レジスタ=0 全体変数=1 ステータスフラグ=C

表9. “div17u”使用レジスタ

レジスタ	入力	内部	出力
R1	didL:被除数下位部		dresL:結果下位部
R2	didH:被除数上位部		dresH:結果上位部
Cフラグ	被除数第17ビット		
R3	divL:除数下位部		
R4	divH:除数上位部		
R5			remL:剰余下位部
R6			remH:剰余上位部
R19		temp:繰り返し計数器に使用	

## 例プログラム

含められた例プログラムは繰り返し変換を実行します。最初に基準に対し、その後に入力電圧に対して充電時間が測定されます。結果はポートD(PD6~0)とPB4(MSB)に出力されます。結果を見るためにLow活性のLEDが接続できるように、この結果はそれが出力される前に反転されます。この変換周期が無限に繰り返されます。

校正を実行するにはPB7ピンが最初にLow状態でなければなりません。その後、使用者はPB7ピンを開放する前に入力へ2.5Vを印加すべきです。(訳注:試供プログラムに合わせ、前2行修正) 校正されたVrefがEEPROMに格納され、そしてこれは通常の電源投入毎に取得されます。

## 性能表

表10. 全体性能表

項目	値
コード量(語)	43: 変換ルーチンのみ(mpy9uとdiv17uなし) 147: 完全な応用記述
使用レジスタ	下位レジスタ=9 上位レジスタ=5 ポインタ=0
使用割り込み	タイマ/カウンタ0溢れ割り込み
使用周辺機能	タイマ/カウンタ0 アナログ比較器 PB7, PB3~0 PD6~0 (例プログラムのみ) PB4 (例プログラムのみ)

校正ルーチンは単に校正値が測定されたと仮定して飛ばすことができます。そして基準電圧が128と仮定され、これは計算もより簡単にします。

もっと良い精度を達成するために基準電圧源で基準抵抗網を取り替えることができます。そしてそれを分圧器経由で入力へ接続することにより、VCCの変化を測定することが可能です。



## 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 2003.

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 2013.

本応用記述はATMELのAVR401応用記述(doc0953.pdf Rev.0953C-02/03)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。