

ホワイトペーパー

測定システム用高精度アナログ回路内蔵 MCU

ルネサスエレクトロニクス株式会社

Renesas SynergyTM プロダクト・マーケティング シニア・マネージャ Pedro Pachuca

2018年11月

概要

産業・医療・ビルディングオートメーションなどの分野の計測システムは、センサからのデータを収集し、機器の動作効率を高め信頼性を確保し、機器の安全動作確認といった重要な役割を担っています。本資料では、こういった機器に測定システム用高精度アナログ回路内蔵マイコンがどのように実装され、実装部品の削減や設計の簡素化、市場投入までの時間短縮などに、どのように貢献しているかを解説します。



はじめに

温度、応力、圧力、pH、バイオセンサなどのセンサ類は、医療機器、工場システム、およびビルオートメーション等のアプリケーションで一般的に使用されています。これらのセンサは、センサ固有の物理的特性に相関する電気的アナログ信号を発生するという特性を利用して検知や測定が行えます。ほとんどのセンサは、ノイズの影響を受けやすい微弱なアナログ信号しか出力できません。したがって高精度でデータ収集を行うためには、微弱信号を確実にとらえ増幅し、精度の高いデジタル信号に変換する必要があります。

センサの多くはパッシブ型またはアクティブ型に分類できます：

- 熱電対などのパッシブ・センサは、外部電力を必要とせず信号を出力します。
- バイオセンサやサーミスタなどのアクティブ・センサは、動作のために外部電力が必要で、さらに電気信号出力の生成にも励起電流または電圧が必要となります。

センサがパッシブ型かアクティブ型に関わらず、設計担当者は、正確なシステム設計、コスト削減、納期厳守といった課題に直面します。つまり、複雑な設計を軽減できるとのチョイスは、多くの設計課題を克服するための重要な選択肢の1つとなります。

このホワイトペーパーでは、測定システム用高精度アナログ回路内蔵マイコンが、その高い集積度と柔軟性を生かして、どのように外付け部品を削減し、設計の複雑さを軽減できるかについて説明します。

Renesas SynergyTMS1JA グループ MCU には、高精度・高機能のアナログ機能が内蔵されており、アナロ

グ回路内蔵マイコンの高精度データ収集システムへの応用例として紹介します。このMCUは、内部で複数のオペアンプに接続されているアナログスイッチ・ブロックをソフトウェアによって制御し、オペアンプの接続経路を自由に変更することにより、最小限の外付け部品で基本アナログ回路から複雑なアナログ・ブロックまで、多様な計測回路を構築することが可能です。

測定システムの構成

測定システムの基本構成は、図1に示すように、センサ、信号調整、信号処理の3つのブロックで構成されています。センサブロックでは、センサの物理的特性（力など）を電気信号（電圧、電流、キャパシタンスなど）に変換します。信号調整ブロックは、微弱信号の変化を後段ブロックの処理に適した電圧レベルに変換します。信号処理ブロックは、アナログ信号をデジタル信号に変換します。このデジタル信号を解析することによって、システムの特定タスクの実行や動作が可能となります。



図1：測定システムの基本ブロック構成

信号調整ブロックは、測定システムの優劣を左右する非常に重要な部分です。センサ信号は、一般に感度が高く微弱な信号なので非常にセンシティブです。出力される信号の品質は、ノイズの影響を受けやすく、センサ信号の増幅段階で十分注意した対応が必要となります。ノイズには、MCU内部で発生したものや外部から誘導されたり侵入してきたものがあり、センサ信号を歪め、エラーとなりセンサ出力情報をゆがめてしまいます。アクティブ・センサは、信号調整段階の一部として、一定もしくは動的な励起信号が必要です。バイオセンサは、動的励起を必要とするアクティブ・センサの良い例ですが、バイオセンサを適切に作動させるためには、化学反応を完了させるために時間経過に比例した特定範囲の励起信号を慎重に送る必要があります。励振信号の精度と品質は、センサから信頼できる出力を確保するために非常に重要です。

信号調整ブロックで使用される電子部品は、その電気的仕様が信号調整ブロックの品質に重大な影響を及ぼす可能性があるため、慎重に選択する必要があります。そしてこの本ドキュメントでは、信号調整回路の簡単な説明と、信号調整回路でごく一般的に使用される電子部品の中で、最も重要な電気的特性の影響について記載しています。

信号処理ブロックは、一般にADコンバータおよび線形化回路などで構成されるデータ変換器です。ADコンバータの精度と分解能の仕様は、計測システム全体の性能に大きな影響を与える可能性があるため、特に重要です。分解能は、実値と計測値との誤差として定義されています。この誤差が大きすぎると、測定システムが全体システムの不規則な動作や誤った挙動に導く可能性があります。この本ドキュメントでは、信号処理で最も一般的な要素とその電気的仕様を説明します。

Renesas Synergy S1JA MCUは、高機能なアナログ機能を内蔵しており、柔軟で使いやすい回路設定機能があるため、信号調整や信号処理ブロックの説明や電気的仕様を説明する上で、非常に良い例となります。

信号調整回路

一般にセンサ出力は、フルスケールでも比較的小さい信号なので、デジタル処理を行う前に適切に調整する必要があります。図2には、増幅、フィルタリング、インピーダンス・カップリングなど最も一般的な信号調整回路を紹介します。

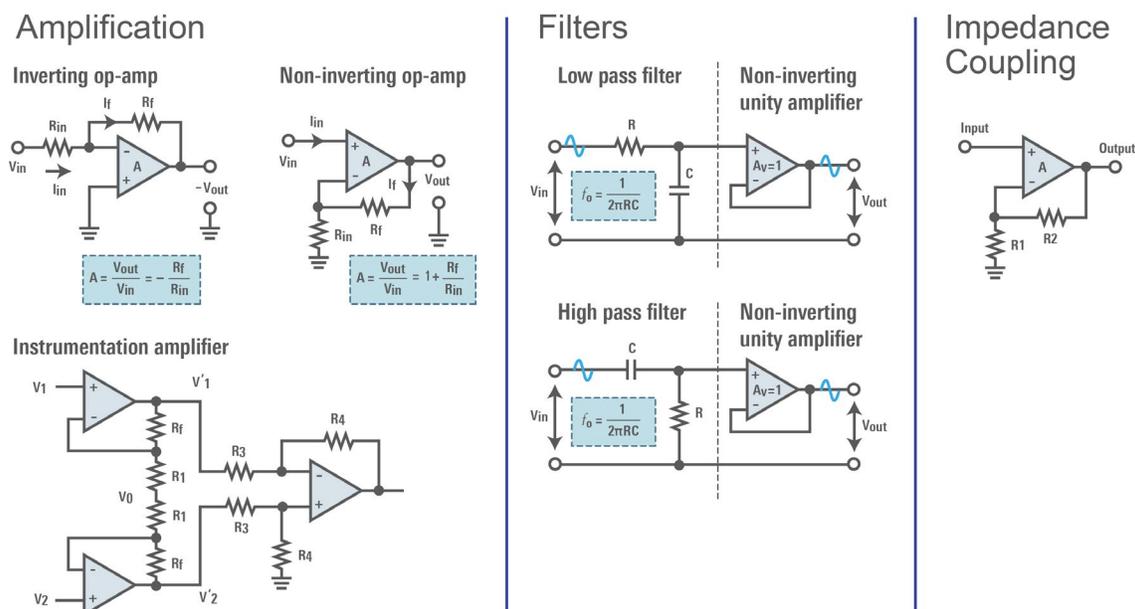


図2：代表的な信号調整回路の例

従来、入力オフセット、レール・トゥ・レール動作、入力ノイズ密度などの敏感な仕様をマイクロコントローラ製品に内蔵することは非常に困難でしたので、信号調整回路は外部の個別部品（OP-AMPS）を使用して実装されていました。しかし、プロセス技術と設計技術の進歩により、非常に高品質で高信頼の仕様でこれらの回路を内蔵することができるようになりました。

例えば、Renesas Synergy S1JA MCU は3ユニットのオペアンプを内蔵しています。さらに、各オペアンプの入出力信号はアナログスイッチ・ブロックに接続されており、そのスイッチ設定を変更することでユーザは最小限の外付け部品で様々な信号調整回路を構成することが可能となります。図3に、各オペアンプとアナログスイッチ・ブロックの構成を示します。また、その簡単な機能概要も追記しています。

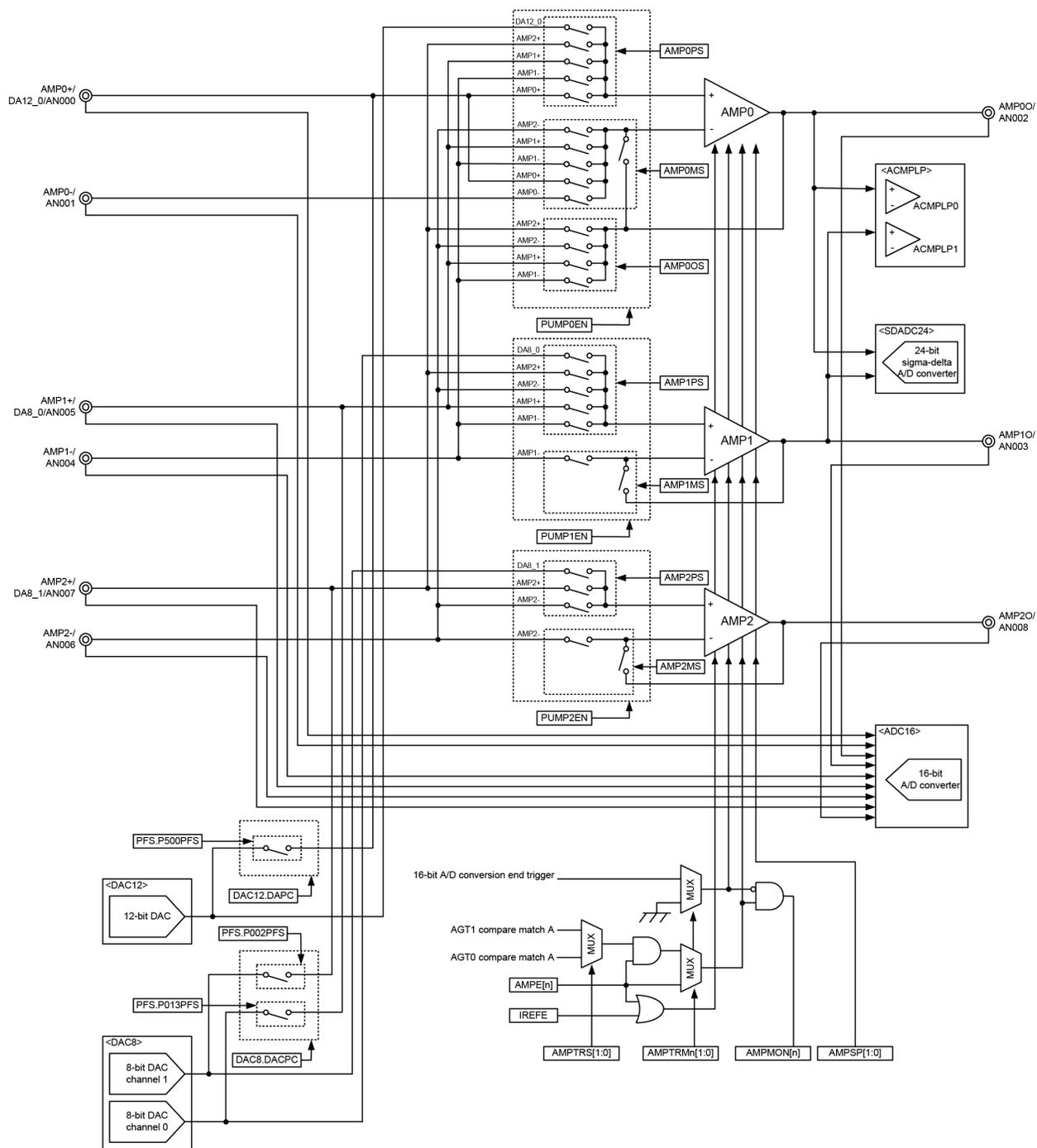


図 3 : Renesas Synergy S1JA オペアンプによる信号調整用の設定回路

S1JA 内蔵オペアンプの設定機能

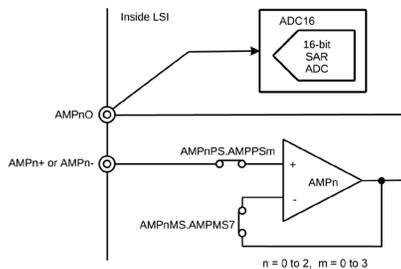
S1JA MCU の内蔵オペアンプ (AMP0~AMP2) は、次の機能と動作モードを持っており、多種多様な回路構成を実現することができます。また、アナログスイッチを組み合わせた内部接続により、MCU 外部での接続が不要で、プリント基板上で複雑な配線をする必要がなくなります。

- 3ユニットあるオペアンプのうち **AMP0** と **AMP1** は、低電力アナログコンパレータ (**ACMPLP**) と 24 ビット・シグマデルタ A/D コンバータ (**SDADC24**) の入力信号として使用可能。
- 高速モード (大電流消費)、中速モード (中電流消費)、低電力モード (低速応答) が用意されており、応答速度と消費電流はトレードオフの関係にある為、それらを考慮頂いたモードが選択可能。
- 非同期汎用タイマ (**AGT**) からのトリガによって動作を開始可能。
- 16 ビット A/D コンバータの変換終了トリガで動作を停止させることが可能。
- すべてのオペアンプには入力信号を選択できるスイッチを有し。さらに、オペアンプ **AMP0** の出力には他のオペアンプの入力を選択できるスイッチを有する
- オペアンプ **AMP0**~**AMP2** の出力は、スイッチを介さずに **AMP00** ピンから **AMP20** ピンに出力可能
- すべてのオペアンプの I/O ピンは **ADC16** の入力信号として使用可能。
- **DAC8** および **DAC12** からの信号出力は、各オペアンプの正の入力信号として使用可能。
- 各オペアンプの出力信号を自身の負の入力信号としてフィードバックすることで、電圧フォロア回路を構成可能。

図 4 に一般的な信号調整回路を示します。これらの回路は、**SAJA MCU** 内部のアナログスイッチ・ブロックをソフトウェアで設定することで簡単に設定することができます。(詳細は renesas.com の **S1JA ユーザーズマニュアル** を参照してください)。

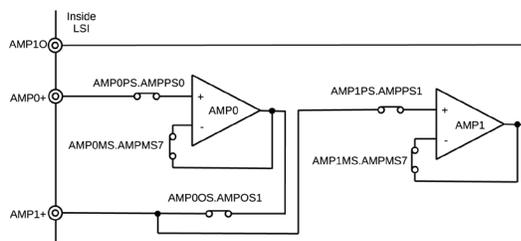
Voltage Follower

Use general operational amplifier can configure a voltage follower by feeding back its own output signal as its own negative input signal.



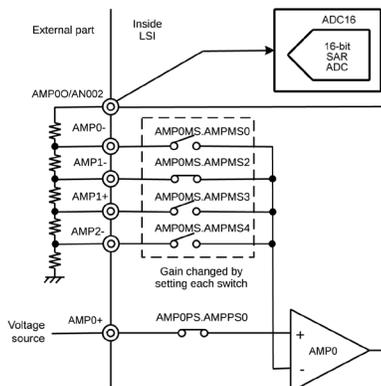
Cascade Voltage Follower

Use general-purpose analog port n (AMP1+, AMP1-, AMP2+ or AMP2-) to input the pre-amplifier output signal to the post amplifier. To connect the signal output from the voltage follower of operational amplifier 0 to the positive input of operational amplifier 1.



Programmable Non-inverting Amplifier

A programmable non-inverting amplifier can be configured using a combination of configurable switches and external resistors connected to general-purpose analog ports.



Programmable Trans-impedance Amplifier

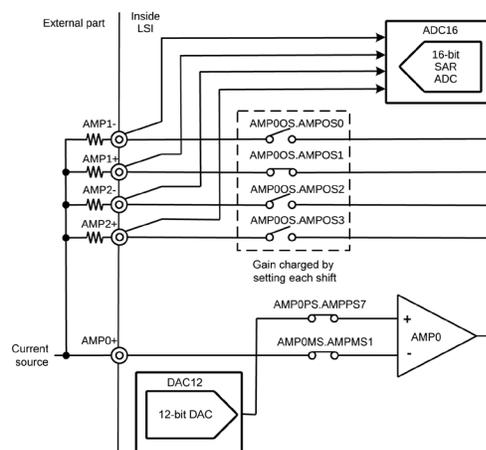


図 4 : Renesas S1JA MCU を使用した信号調整回路の実装例

計装アンプや D-A バッファアンプなどの他のアンプ構成も、アナログスイッチ・ブロックの設定を変更することで簡単に実装できます。アナログスイッチ・ブロックはソフトウェアで設定変更できるので、いくつかのアンプ構成は MCU の動作中にも実装可能な為、まったく新しいアプリケーションへの扉を開くことができます。S1JA のオペアンプは、フレキシブルなアンプ構成に加えて、ユーザ要求に合わせてオフセットを調整することができるユーザトリミング機能も備えています。

信号処理回路

信号処理ブロックの基本機能の 1 つがアナログ・デジタル変換器 (ADC) で、その機能はアナログ信号を受け取りデジタルデータに変換して出力することです。ADC は、外界の信号をデジタル処理する必要がある回路のフロントエンドになります。

一般にアプリケーション要件に応じて、ADC のタイプが選択されます。様々な種類の ADC がありますが、その主な機能は同じで、入力された電圧信号をそれに対応したビット数に変換します。下記の図を使って、階段傾斜法 (ステアケース・ランプ法) を使った ADC の動作原理を説明します。

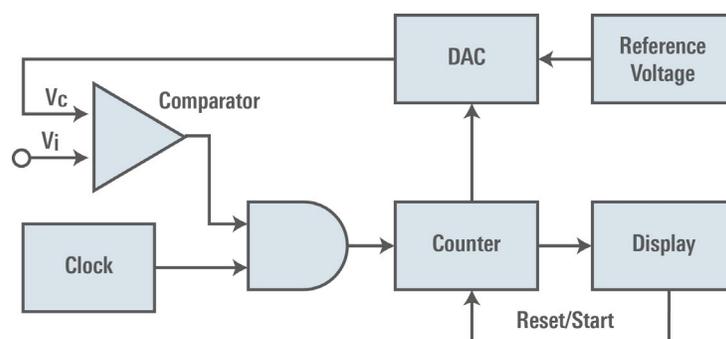


図 5 : ADC の基本機能

基本原理：入力電圧 V_i は、コンパレータで階段状に変化する電圧 V_c と比較されます。測定開始時は、 $V_c = 0$ でカウンタも 0 に設定されています。 $V_i > V_c$ 状態では、コンパレータ出力が AND ゲートを開いているので、クロック入力に基づいてカウンタがカウント状態になります。カウンタは DAC を制御しカウンタ値に比例した出力電圧を生成し、電圧 V_c のレベルが上がっていきます。 V_c が V_i と等しいかごくわずかに大きくなった瞬間、コンパレータ出力は極性を反転し AND ゲートを閉じカウンタを停止させます。このとき カウント値は V_c に比例しているため、従って V_i にも比例し、このカウンタ値が入力電圧 V_i のデジタル値となります。

前述したように、多くのタイプの ADC があります。本ドキュメントでは、逐次比較型 ADC とシグマデルタ ADC に注目し、これらの ADC がどのように Renesas Synergy S1JA MCU に実装され、優れた測定システムを提供しているかについて説明します。

Renesas Synergy S1JA 逐次比較型 (SAR) ADC

S1JA MCU は、16 ビット逐次比較型 A-D コンバータ (ADC) を備えています。この高精度 ADC や、アナログスイッチによって相互接続可能な内蔵オペアンプ、さらには高精度電圧比較器といった MCU の内部リソースを活用することで、外部に専用の発振器や ADC が不必要となり、ユーザは大幅な部品点数の削減とプリント基板設計の単純化が可能となります。

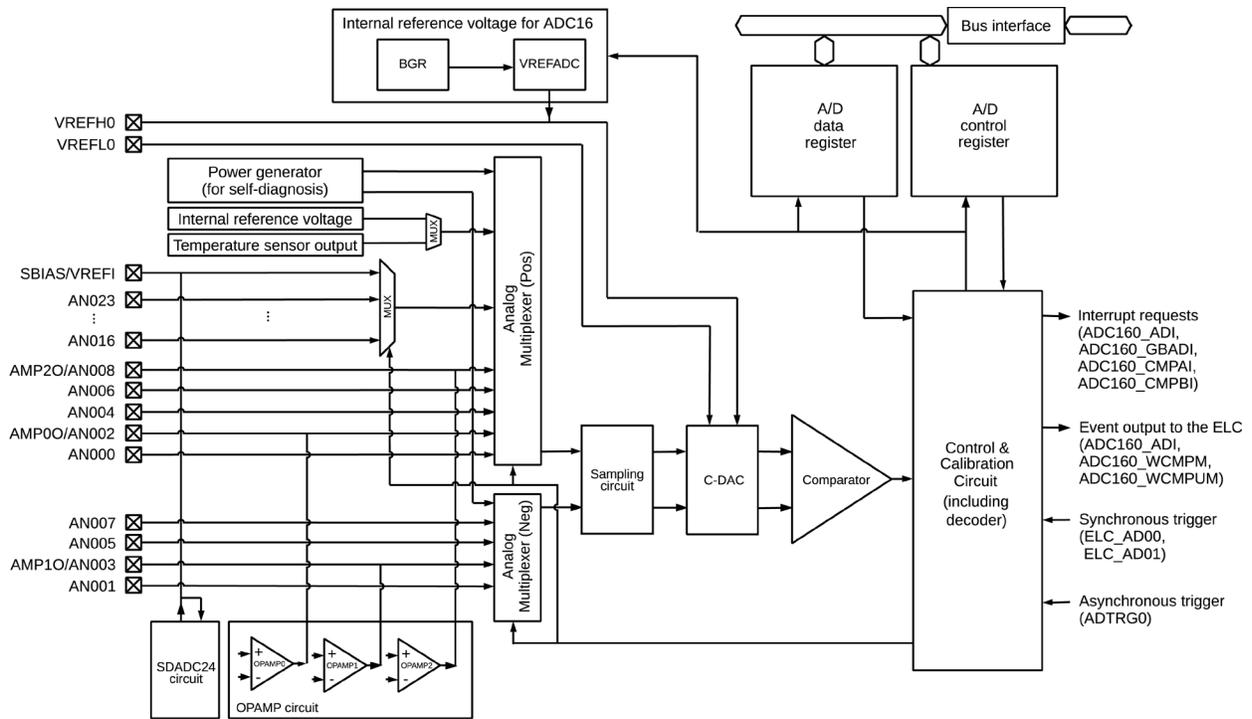


図 6 : S1JA の SAR 型 ADC のブロック図

S1JAMCU の SAR 型 ADC は、AD 変換時に選択できる最大 17 本のアナログ入力ピンと内部リファレンス電圧生成器 1 つを備えており、外部部品点数の削減に大きく貢献しています。内部リファレンス電圧は、1.5V、2V、2.5V の標準値をプログラムで選択可能です。広範囲のリファレンス電圧を MCU 内部で選択できるので、ユーザは外部にリファレンス電圧回路を組む必要がなくなります。

S1JA の内部オペアンプは、信号調整回路として使用し SAR 型 ADC 入力に接続することができます。これによって、信号の整合性を損なう可能性のある外部配線を排除することができます。さらに、自己診断やアナログ入力断線検出などの安全機能を備えており、ADC 機能が正常に動作しているか監視するための外付け部品が不要になります。

表 1 に、S1JA の SAR 型 ADC の仕様概要を示します。

パラメータ	標準値	単位	条件等は、ユーザーマニュアルを参照してください。
分解能	16	Bit	
積分非直線性誤差	± 4	LSB	
微分非直線性誤差	-1 to +2	LSB	
ENOB (有効ビット数)	13.2	Bit	
変換時間	0.82	μ 秒 (チャンネル毎)	

表 1 : S1JAMCU の SAR 型 ADC の技術仕様

また、S1JA SAR 型 ADC は、C-DAC ステージの使用条件下で、内部生成されたアナログ入力から直線性誤差補正値およびゲイン（オフセット）誤差補正値を取得することにより、高精度測定を可能にするキャリブレーション機能を備えています。これにより、ユーザは測定開始時に ADC を補正して最良の測定結果を得ることができます。キャリブレーションは、次の 3 つのステップで実行されます。

ステップ 1：ADC 変換が開始されると、C-DAC の直線性誤差とゲインの補正値を計算
ステップ 2：すべての値の計算が完了すると、ADC キャリブレーション割り込みが発生
ステップ 3：キャリブレーションが完了し、ユーザは ADC スキャンを開始

ADC クロックが 32MHz の場合、キャリブレーションは約 24.22ms で完了します。

Renesas Synergy S1JA 24 ビット・シグマデルタ A/D コンバータ

シグマデルタ ADC の基本構造は、オーバーサンプリング・モジュレータとデジタル・デシメーション・フィルタとを組み合わせて構成され、高分解能のデータストリーム出力を生成します。このタイプの ADC は、温度センサや工業用スケール、プロセス制御センサといった工業製品に幅広く使用されています。一般に単独動作のシグマデルタ ADC は、外部に高精度基準電圧回路と外部クロックを必要とし、これらの外付け部品により回路設計が複雑になりコスト増となります。

Renesas Synergy S1JA MCU は、シングルエンド・差動型測定機能をサポートするオールインワン、24 ビット・シグマデルタ ADC を内蔵しています。内部リファレンス電圧は 0.8V~2.4V 範囲で 0.2V 刻みで選択可能で、これにより多様なアプリケーション要件に柔軟に対応することが可能です。さらに ADC のクロック・ソースは、MCU 周辺クロックから生成されているため、外部クロックが不要となり、システムの信頼性を高めながらコスト削減でき複雑な設計を回避できます。

電力に敏感な製品では低消費電力動作が求められますが、S1JA が内蔵するシグマデルタ ADC は、125KHz~500KHz のリファレンスクロックを使用して低電力変換モードで対応することができます。これは、MCU 内の分周器を使用することで実現できるので、外部から低周波クロックを入力する必要がありません。

一般に測定システムでは、信号調整回路の出力がシグマデルタ ADC に接続されていますが、そのアナログ電圧出力が ADC によってデジタル値に変換されます。図 7 に信号調整回路と ADC の接続回路が示します。この回路構成は、内蔵オペアンプとアナログスイッチ・ブロックのスイッチ設定で簡単に実現することができるので、外部配線の必要性がなくプリント基板設計を簡素化できます。オペアンプ AMP0 と AMP1 のどちらか一方の出力を、シグマデルタ ADC の入力として選択することができます。

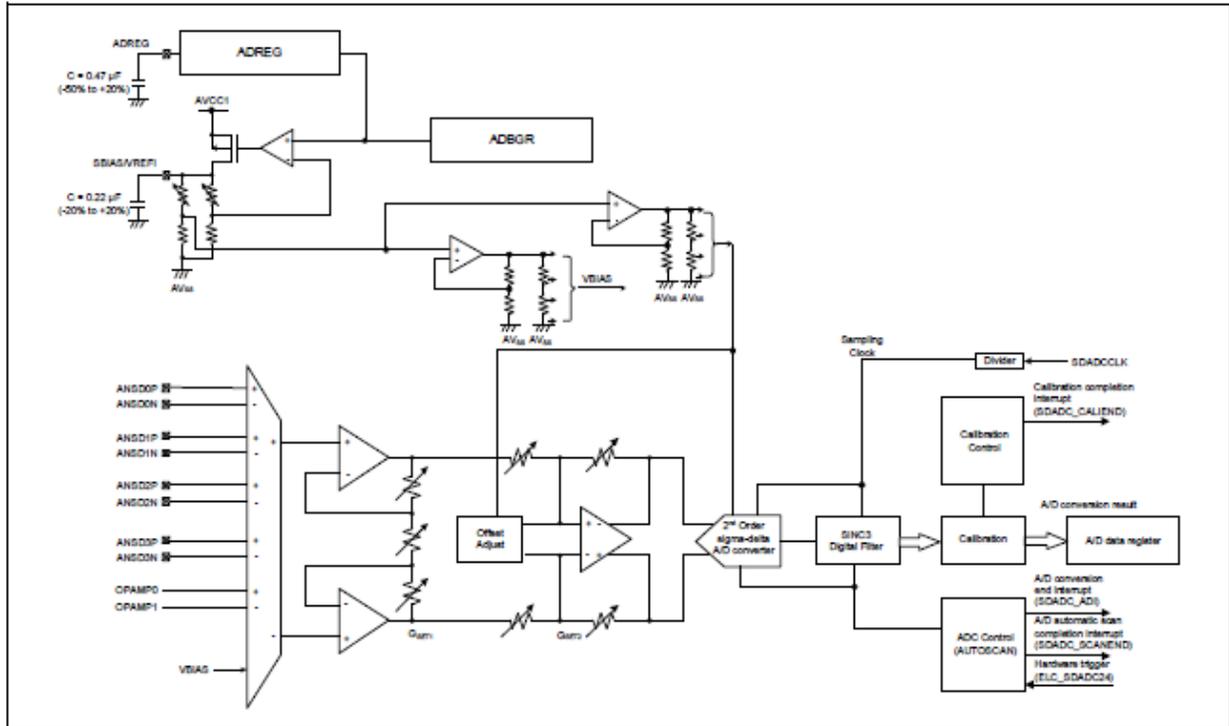


図7 : Renesas S1JA MCUのシグマデルタADCのブロック図

S1JAのシグマデルタADCには、外部センサの電源として使用できるSBIASという特別な機能が組み込まれています。SBIASの出力電圧は、0.8V~2.2Vの範囲で0.2V単位で設定でき出力電流は最大10mAです。さらに過電流（最大電流を超える電流）保護回路を備えているので、過電流状態が発生するとMCU内部回路を保護します。SBIAS回路を使用することによって、ユーザは外部電源を除去しセンサにバイアス電源を供給することが可能です。

これまで説明してきた利点に加えて、シグマデルタADCの変換開始動作をイベントリンク・コントローラ・モジュールによって制御することが可能です。このコントローラ・モジュールは、さまざまな周辺モジュールによって生成されたイベント要求をソース信号源として使用し、ADC変換をスタートさせることができます。また、1つの周辺モジュールのイベントリクエストをもう1つの周辺モジュールに連動させるといった複雑な制御を行うことができ、CPUの介入なしにモジュール間を直接リンクすることができます。開発担当は、この機能を使用して正確なタイミング測定や動的バイアス設定動作など、多様な機能を利用して製品の機能強化を行うことができます。詳細は、ユーザーマニュアルのS1JAイベントリンク・コントローラの章を参照してください。

まとめ

Renesas Synergy S1JA の様な高度に集積された MCU は、オペアンプ、シグマデルタ ADC、逐次比較型 ADC など多機能・高精度のアナログ機能を内蔵していることから、外付け部品を不要にして設計を簡素化でき、さらにコストを削減し、システムの信頼性を向上させることが可能です。プロセス技術と設計技術の進歩により、これまで専用の単一部品を組み合わせた外部回路でしか実現しなかった高品質仕様のアナログ機能を内蔵することが可能となりました。高精度・高機能のアナログ機能を MCU に統合することで、ユーザの制御の下、アナログとデジタルを動的に組み合わせた全く新しいアプリケーションを実現することが可能となり、設計者の想像力が試される時代となりました。

©2018 ルネサス エレクトロニクスアメリカ社 (REA) が全著作権を所有。すべての商標および商号は、それぞれの所有者のもので。REA は、ここに記載されている情報は、与えられたときに正確であったと考えていますが、その品質や使用に関してはリスクはないと考えています。すべての情報は、商品性、特定の目的への適合性、非侵害性などを問わず、明示的、黙示的、法的、または取引、使用方法、または貿易実務から生じるいかなる保証もなく、現状のまま提供されます。REA は、たとえそのような損害の可能性について知らされていたとしても、ここに記載された情報の使用または信頼に起因する直接的、間接的、特別、派生的、付随的、またはその他の損害について一切の責任を負うものではありません。REA は、予告なしに製品を中止したり、製品の設計または仕様またはその他の情報を変更する権利を留保します。すべてのコンテンツは、米国および国際著作権法によって保護されています。ルネサスエレクトロニクス社の事前の書面による許可なく、本資料のいかなる部分も複製、転載することはできません。お客様またはユーザは、この資料のいずれかの公的または商業目的での修正、配布、公開、送信、または派生物の作成を許可されていません。