

백서

MCU 기반 고정밀 측정 시스템

페드로 파추카(Pedro Pachuca), Sr. Manager, Renesas Synergy™ Product Marketing, Renesas Electronics Corp.

2018 년 11 월

Abstract

측정 시스템은 센서에서 수집한 데이터를 사용하여 효율성과 신뢰성, 안전성을 향상시키는 산업과 의료, 빌딩 자동화 응용 분야에서 중요한 역할을 수행한다. 여기서는 MCU 기반 고정밀 시스템을 구현하여 BOM 을 줄이고 설계를 간소화하며 출시 시간을 단축 할 수 있는 방법에 대해 살펴보고자 한다.



소개

온도와 힘, 압력, pH, 바이오 센서 등은 의료, 공장 및 빌딩 자동화 응용 분야에서 일반적으로 사용되고 있으며 이들 센서는 감지 및 측정하도록 설계된 물리적 특성에 대한 전기 아날로그 신호를 생성한다. 이들 센서의 대부분은 노이즈에 민감한 낮은 아날로그 출력 신호를 제공한다. 정밀한 데이터 수집을 위해서는 신호의 무결성을 확보하고 디지털 시스템에서 해석할 수 있도록 신호를 증폭 및 변환하는 과정이 필요하다.

센서는 다음과 같이 수동(Passive) 센서와 능동(Active) 센서로 분류된다:

- 써모커플(thermocouple)과 같은 수동 센서는 자극 소스(excitation source) 없이 출력 신호를 생성한다.
- 바이오 센서나 서미스터(thermistor)와 같은 능동 센서는 외부 자극 소스를 필요로 한다. 이들 센서는 또한 전기 출력을 생성하기 위해 자극 전압이나 전류를 필요로 한다.

센서가 수동이든 능동이든 설계자는 정해진 예산과 개발 시간에 맞춰 정밀한 시스템을 설계해야 하는 과제에 직면한다. 설계상의 복잡성을 줄이는 것은 이러한 과제를 달성하는데 있어 중요한 요소로 작용한다.

여기서는 MCU 기반의 고정밀 데이터 수집 시스템이 높은 수준의 통합과 유연성을 요구하는 외부 컴포넌트를 제거하여 설계상의 복잡성을 줄여줄 수 있는지 살펴보고자 한다. 고집적, 고정밀 아날로그 기능을 갖춘 Renesas Synergy™ S1JA Group MCU 를 예로 들 수 있으며 이 제품은 소프트웨어 제어와 연산 증폭기(operational amplifier) IP 의 일부로 전략적 구현이 가능한 인터커넥트 패브릭(interconnect fabric)으로 아날로그 스위치를 구현하여 최소한의 외부 컴포넌트로 기본적인 아날로그 회로에서 복잡한 아날로그 블록에 이르기까지 개발 과정에서 유연성을 극대화시켜 준다.

측정 시스템

기본적인 측정 시스템은 그림 1 에 표시된 바와 같이 센서, 신호 조정, 신호 처리의 3 단계로 구성된다. 센서 단계는 물리적 특성 (예: 힘)을 전기 신호 (예: 전압, 전류, 저항, 전기용량 등)로 변환하고 신호 조정 단계에서는 다양한 작은 신호를 추가 처리에 적합한 수준으로 변환한다. 신호 처리 단계에서는 특정 작업이나 동작을 구현할 수 있도록 추가 분석이 가능하도록 아날로그 신호를 디지털로 변환해준다.

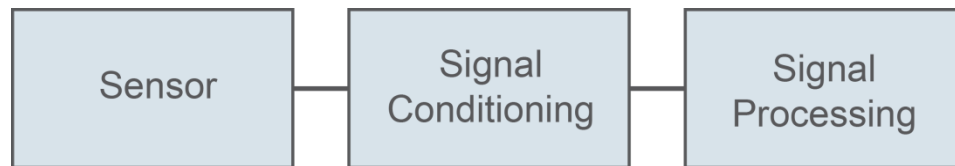


그림 1: 기본 측정 시스템

신호 조정은 측정 시스템의 성능을 보장하는 매우 중요한 단계다. 센서의 신호는 대부분 상당히 민감하고 진폭이 매우 낮다. 출력의 세분성으로 인해 증폭 시 각별한 주의가 필요하며, 내부에서 생성되었거나 외부에서 유도 또는 발생된 노이즈가 오류로 나타나 신호 정보를 왜곡한다. 신호 조정 단계에서 능동 센서는 일정하거나 동적인 자극 신호를 필요로 한다. 바이오 센서는 동적 자극을 필요로 하는 능동 센서의 좋은 예다. 센서를 적절하게 활성화하려면 화학 반응이 완료될 수 있도록 다양한 가변 신호가 얼마의 시간에 걸쳐 적용되어야 한다. 센서 신호의 안정적인 출력을 보장하기 위해서는 자극 신호의 정확성과 세분성이 매우 중요하게 작용한다.

전자 부품은 그 전기적 사양이 신호 조정 단계의 품질에 상당한 영향을 줄 수 있기 때문에 선택 시 각별한 주의가 필요하다. 본 문서에서는 신호 조정 회로와 가장 일반적으로 사용되는 전자 컴포넌트의 전기적 특성이 미치는 영향에 대하여 간략히 설명한다.

신호 처리 단계는 일반적으로 아날로그-디지털 컨버터와 선형화 회로(linearization circuit)와 같은 데이터 컨버터로 구현된다. 아날로그-디지털 컨버터의 정확성과 정밀도는 전체 측정 시스템에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 특히 중요하다. 정확성은 실제 값과 측정값 간의 오차로 정의된다. 이 오차가 너무 크면 측정 시스템 전체에 오류나 잘못된 동작을 초래할 수 있다. 여기서는 신호 처리의 가장 일반적인 요소들과 전기적 사양을 살펴보고자 한다.

Renesas Synergy S1JA MCU 는 사용이 간편하고 아날로그 기능의 통합과 유연성을 갖추고 있어 아날로그 기능의 주요 전기 사양과 신호 조정 및 처리 단계를 설명하는데 좋은 예가 된다.

신호 조정 회로

센서의 최대 출력(full-scale)이 상대적으로 작기 때문에 디지털 처리를 위해서는 조정이 필요하다. 그림 2 와 같이 일반적인 신호 조정 회로로 증폭, 필터링, 임피던스 커플링(impedance coupling)을 들 수 있다.

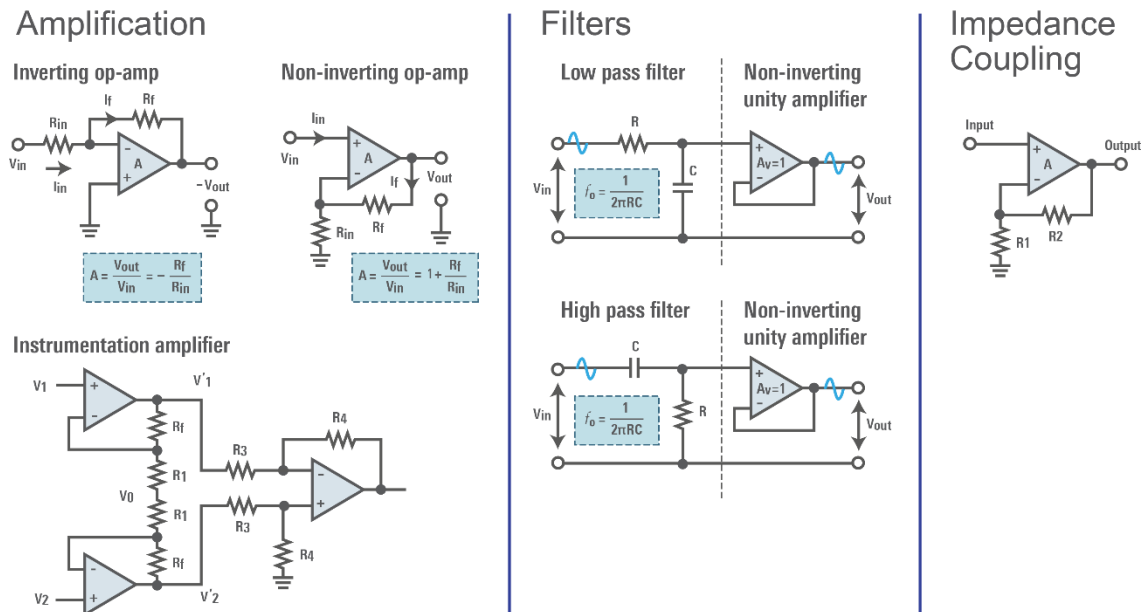


그림 2: 신호 조정 회로

지금까지 신호 조정 회로들은 외부 독립형 컴포넌트(OP-AMPS)를 사용하여 구현되어 왔다. 통합 마이크로컨트롤러 제품에서는 입력 오프셋(offset), 레일투레일(rail-to-rail) 동작, 입력 노이즈 밀도와 같은 민감한 사양을 달성하기가 매우 어려웠다. 하지만 기술 프로세스와 설계 기술의 발전으로 매우 높은 품질과 신뢰성을 갖춘 회로를 구현할 수 있게 되었다.

예를 들어 Renesas Synergy S1JA MCU 는 세 가지의 서로 다른 연산 증폭기를 제공한다. 또한 인터커넥트 패브릭(interconnect fabric)으로 아날로그 스위치를 전략적으로 구현하여 신호 조정 회로

설계 시 외부 컴포넌트를 최소화시켜 준다. 그림 3 은 간략한 설명과 함께 연산 증폭기의 구현 방식을 보여준다.

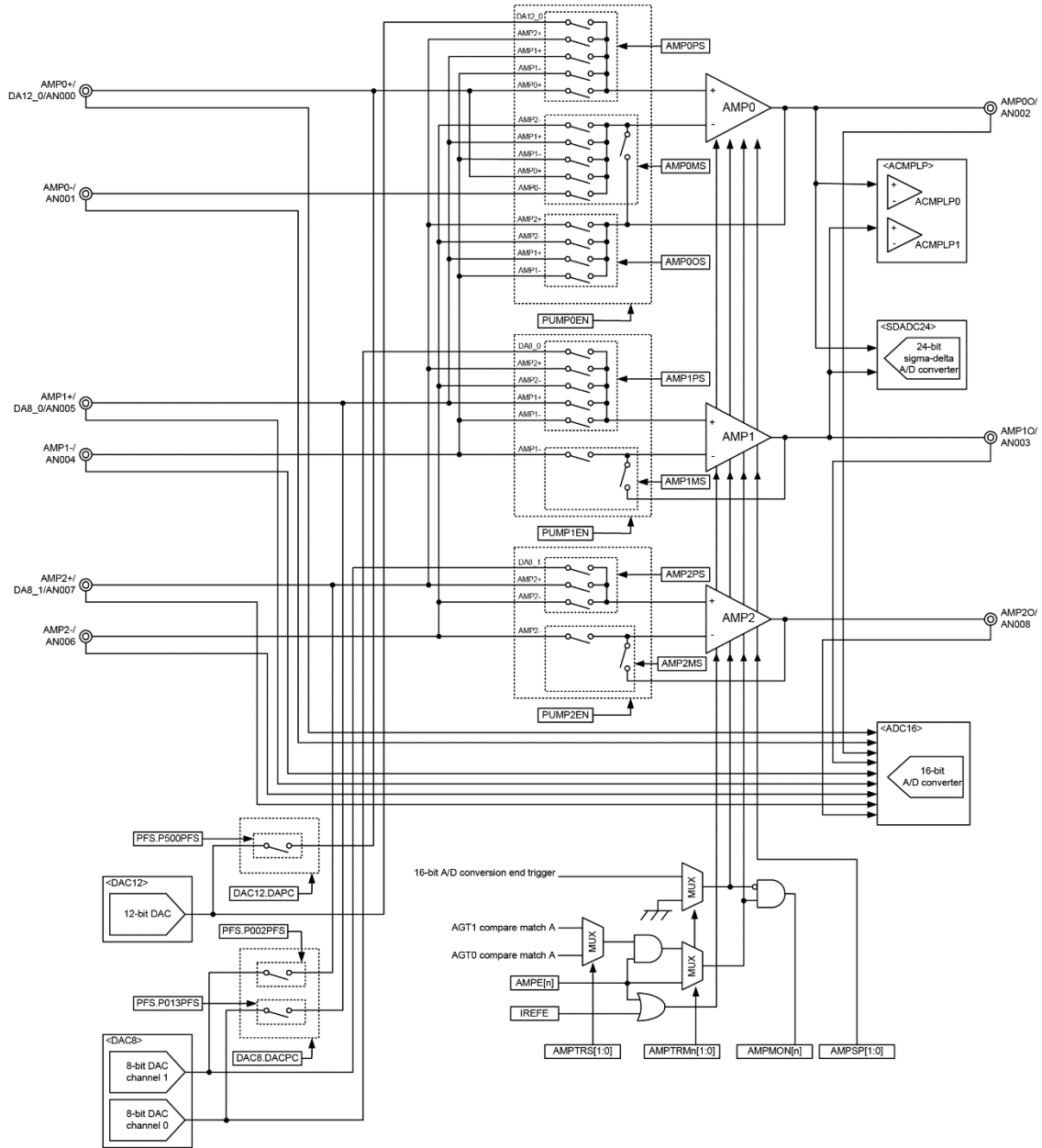


그림 3: Renesas Synergy S1JA 의 신호 조정을 위한 연산 증폭기

S1JA 가 통합된 OPAMP 구성 기능

S1JA MCU 의 통합 연산 증폭기는 다음과 같은 기능과 모드를 제공하여 구현 가능한 구성의 가짓수가 늘어난다. 내부 연결로 외부 PCB 트레이스(trace)를 사용할 필요가 없어 PCB 의 복잡성도 줄어 든다.

- 3 개의 OPAMP0 와 OPAMP1 을 사용하여 저전력 아날로그 비교기(ACMPLP)와 24 비트 시그마-델타 A/D 컨버터(SDADC24)에 신호를 입력할 수 있다.
- 고속 모드(높은 전류 소모), 중속 모드(중간 수준의 전류 소모), 저전력 모드(저속 응답)가 지원되며 응답 속도와 전류 소모 간의 조정에 따라 어떤 모드든 선택이 가능하다.
- 비동기 범용 타이머(AGT)의 트리거로 동작을 시작할 수 있다.
- 16 비트 A/D 변환 종료 트리거로 동작을 정지할 수 있다.
- 모든 유닛에는 입력 신호를 선택할 수 있는 스위치가 있으며 OPAMP0 에는 출력 핀을 선택할 수 있는 스위치가 있다.
- 스위치를 거치지 않고 OPAMP 의 출력을 AMP00 에서 AMP20 핀으로 출력 할 수 있다.
- 모든 OPAMP 장치의 입출력 신호는 ADC16 의 입력 신호로 사용이 가능하다.
- DAC8 과 DAC12 에서 출력되는 신호는 각 OPAMP 의 양의 입력 신호로 사용할 수 있다.
- OPAMP 의 음의 입력 신호로 자체 OPAMP 출력 신호를 피드백 하여 전압 폴로어(voltage follower) 회로를 구성할 수 있다.

그림 4 는 소프트웨어 제어가 가능한 인터커넥트 스위치 패브릭(interconnect switch fabric)을 사용하여 일반적인 신호 조정 회로를 손쉽게 구현할 수 있는 방법을 보여준다(자세한 내용은 renesas.com 에서 S1JA 사용자 매뉴얼 참조).

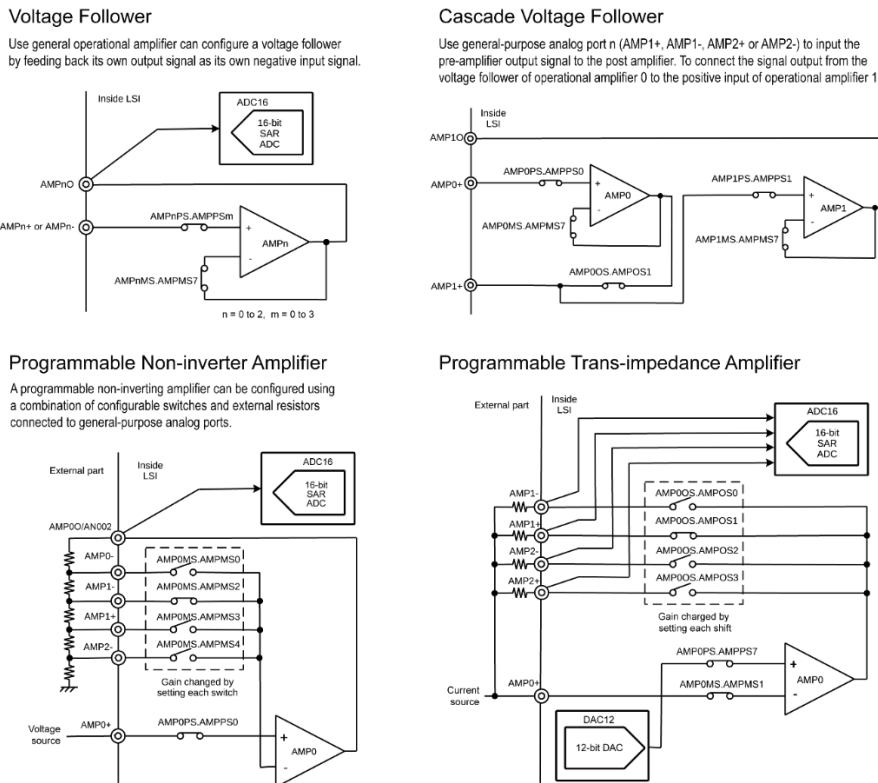


그림 4: Renesas S1JA MCU 를 사용한 신호 조정 회로 구현도

계측 증폭기(instrumentation amplifier)와 디지털-아날로그 버퍼 증폭기와 같은 추가 구성은 인터커넥트 스위치 패브릭을 사용하여 손쉽게 구현이 가능하다. 소프트웨어 구성이 가능한 인터커넥트 패브릭으로 일부 구성을 즉시 구현할 수 있어 새로운 차원의 애플리케이션이 가능해진다. 이러한 유연성과 함께 S1JA 의 연산 증폭기는 사용자의 필요에 따라 오프셋 조정이 가능한 사용자 트리밍(user trimming) 기능을 제공한다.

신호 처리 회로

아날로그-디지털 컨버터(ADC)는 신호 처리 체인에서 아날로그 요소 기능의 하나로 아날로그 시스템을 디지털화하는 기본 기능을 갖추고 있다. ADC 는 외부 신호를 처리해야 하는 모든 디지털 회로의 선두주자다.

특정 애플리케이션의 요구 사항에 따라 ADC 의 유형이 선택된다. 많은 유형의 ADC 가 있지만 특정 신호를 특정 비트 수로 변환하는 주요 기능은 동일하다. 아래 그림은 계단 램프 기술(staircase ramp technique)을 사용하는 ADC 의 기본 기능을 보여주고 있다.

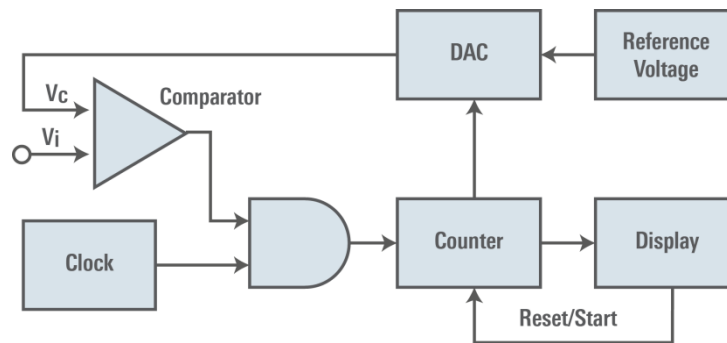


그림 5: ADC 의 기본 기능

기본 원리: V_i 입력은 내부 계단 전압(staircase voltage)과 비교된다. 측정 시작 시 $V_c = 0$ 이고 카운터는 0 으로 설정된다. 비교기(comparator) 출력은 $V_i > V_c$ 일 때 비교기 출력이 게이트를 열고 카운터가 클럭 입력을 기준으로 카운팅을 시작하도록 설정된다. 카운터가 DAC 에 전압을 공급하면 DAC 가 출력 전압을 생성하고 V_c 를 증가시킨다. V_c 가 V_i 와 같거나 약간 크면 비교기 출력은 극성을 바꾸고 게이트를 닫아 카운터를 정지시킨다. 카운트된 수는 V_c 에 비례하기 때문에 V_i 에도 비례하고 카운터는 신호 값의 디지털 값을 유지한다.

앞에서 언급한 것처럼 많은 유형의 ADC 가 있는데 여기서는 SAR(Successive-Approximation Register)와 Sigma Delta ADC 를 중점적으로 다루고 이들 ADC 가 Renesas Synergy S1JA MCU 에서 어떻게 구현되어 측정 시스템을 완성하는지 설명한다.

Renesas Synergy S1JA 연속근사 레지스터 (SAR) ADC

S1JA MCU 는 16 비트의 연속 근사 아날로그-디지털 컨버터를 제공한다. 이러한 ADC 구현을 통해 사용자는 정밀 전압 레퍼런스와 같은 MCU 의 내부 리소스를 사용하고 외부 ADC 컴포넌트인 외부 전용 크리스탈을 제거하며 연산 증폭기와 아날로그 스위치의 인터커넥트 패브릭과 함께 작업함으로써 BOM 을 줄이고 설계를 단순화시킬 수 있다. 그림 6 은 S1JA 의 SAR ADC 가 어떻게 구현되는지 보여준다.

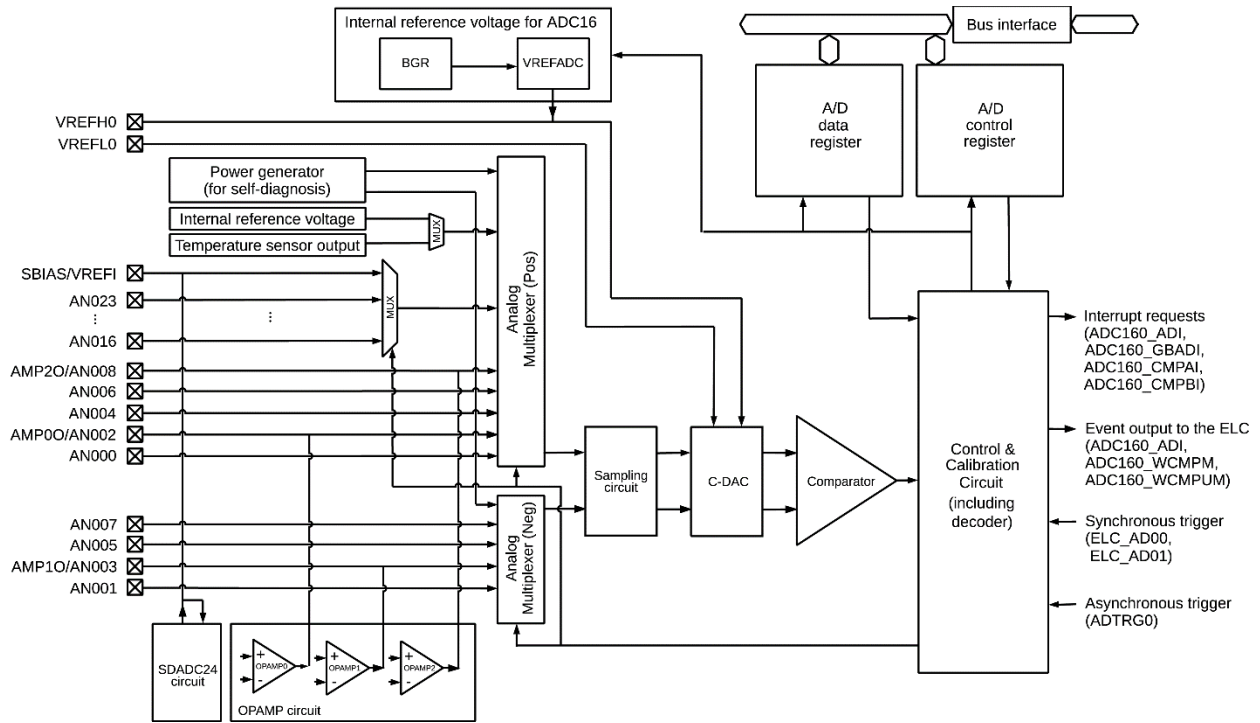


그림 6: S1JA 의 SAR ADC 구현도

S1JA SAR ADC 는 변환을 위해 선택할 수 있는 내부 레퍼런스 전압과 최대 17 개의 아날로그 입력 채널을 제공하여 BOM 을 줄일 수 있도록 해준다. 내부 레퍼런스 전압은 1.5V 와 2V, 2.5V 의 값에 대해 프로그래밍이 가능하다. 이러한 다양한 옵션을 통해 사용자는 외부 전압 레퍼런스를 제거할 수 있게 된다.

신호 조정에 사용할 수 있는 S1JA 내부 연산 증폭기는 내부적으로 SAR ADC 입력에 연결하여 신호의 무결성을 제한하는 외부 라우팅을 제거할 수 있게 해준다. 또한 자가 진단과 아날로그 입력 단락 감지와 같은 안전 기능을 가지고 있어 ADC 기능을 모니터링 하기 위한 외부 컴포넌트가 필요하지 않다.

표 1 은 S1JA SAR ADC 의 전기 사양을 간략하게 보여준다.

매개변수	대표 값	단위	특정 조건은 사용자 매뉴얼 참조
해상도	16	Bit	
통합 비선형성(Integral non-linearity)	± 4	LSB	
차동 비선형성(Differential non-linearity)	-1 to +2	LSB	
ENOB	13.2	Bit	
변환 시간	0.82	uS (채널 당)	

표 1: S1JA SAR ADC 의 기술 사양

S1JA SAR ADC 는 또한 C-DAC 단계의 사용 조건에서 내부적으로 생성된 아날로그 입력으로부터 선형 오차 보정과 이득 (오프셋) 오차 보정 값을 얻어 고정밀 측정을 가능하게 해주는 보정(calibration) 기능을 제공한다. 이를 통해 사용자는 측정 시 ADC 를 보정하여 최상의 결과를 얻을 수 있다. 보정은 다음과 같이 3 단계로 진행된다.

- 1 단계 - ADC 변환이 시작되면 C-DAC 선형 오차 및 이득에 대한 보정 값이 계산된다.
- 2 단계 - 모든 값의 계산이 완료되면 ADC 인터럽트 보정이 생성된다.
- 3 단계 - 보정이 완료되고 사용자가 스캐닝 절차를 시작할 수 있다.

ADC 클럭이 32MHz 일 때 보정 시간은 약 24.22ms 가 소요된다.

Renesas Synergy S1JA 24 비트 Sigma-Delta A/D 컨버터

시그마 - 델타 ADC 는 기본적으로 고해상도 데이터 스트림 출력을 생성하는 오버 샘플링 모듈레이터와 디지털/데시메이션(decimation) 필터로 구성된다. 이들 ADC 는 온도 센서와 산업용 중량 스케일에서 프로세스 제어 센서에 이르기까지 다양한 산업용 애플리케이션에 널리 사용되고 있다. 일반적인 독립형 Sigma-Delta ADC 는 외부 정밀 전압 레퍼런스와 외부 클럭을 필요로 하며 이러한 외부 컴포넌트로 인해 설계가 복잡해지고 비용이 증가하게 된다.

Renesas Synergy S1JA MCU 는 단일 종단(single-ended)과 차동 측정 기능을 지원하는 통합 솔루션을 제공한다. 선택 가능한 전압 레퍼런스는 0.8V~2.4V로 0.2V 단위로 증가하며 유연하고 폭넓은 선택이 가능하여 광범위한 애플리케이션의 요구 사항을 수용할 수 있다. 또한 24 비트 Sigma-Delta A/D 컨버터 클럭이 MCU 근접 클럭에서 생성되어 외부 클럭이 필요하지 않아 시스템의 신뢰성을 향상시켜주고 비용과 복잡성이 줄어든다.

전력 감응형 설계는 저전력에서 동작이 가능해야 하는데 S1JA 가 통합된 Sigma-Delta ADC 는 125KHz ~ 500KHz 의 레퍼런스 클럭을 사용하여 저전력 변환 모드를 지원한다. 이는 MCU 의 내부 주파수 디바이더(divider)를 사용하여 외부 저주파 클럭의 필요성을 제거하기 때문에 가능하다.

일반적인 측정 시스템에서 신호 조정 시스템의 출력은 Sigma-Delta ADC 에 연결되어 아날로그 신호를 디지털로 변환해준다. 그림 7 과 같이 통합 OPAMP 의 아날로그 스위치 "인터커넥트-패브릭(interconnect-fabric)"을 사용하여 손쉽게 연결이 가능하고 외부 연결이 필요하지 않아 PCB 설계를 단순화시킬 수 있다. OPAMP0 출력과 OPAMP1 출력은 Sigma-Delta ADC 의 입력으로 선택할 수 있다.

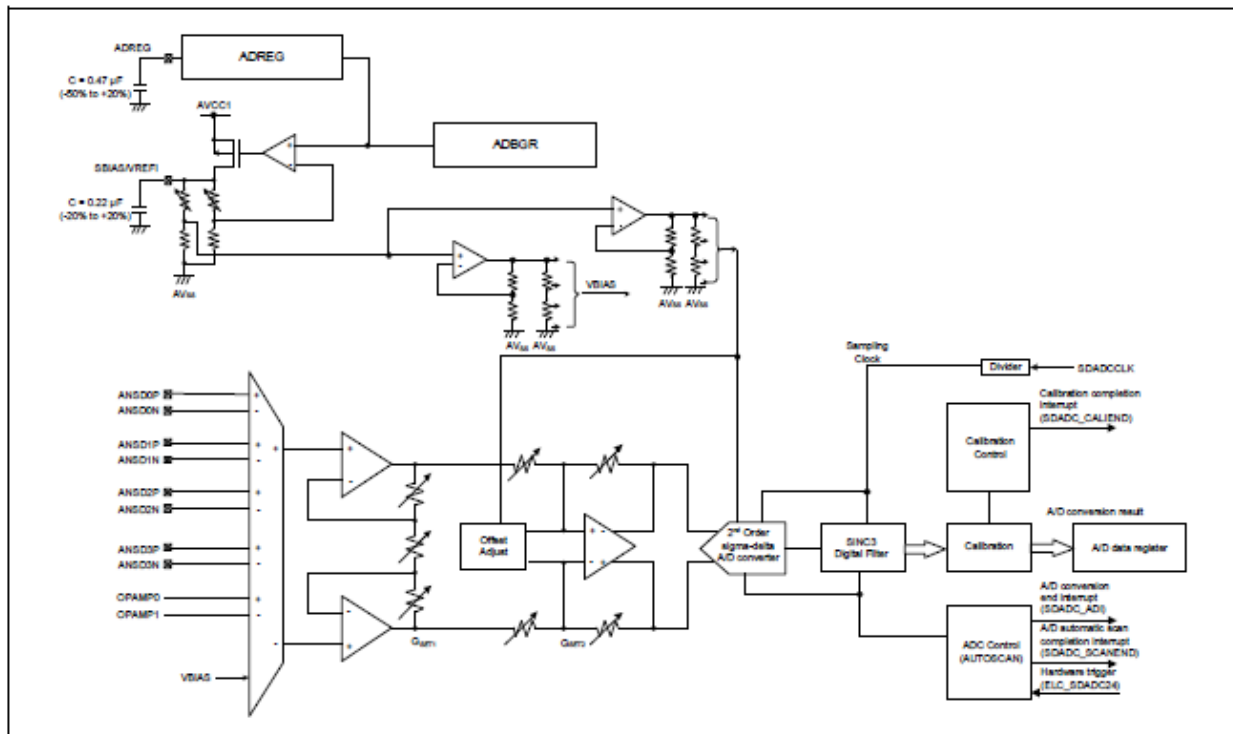


그림 7: Renesas S1JA MCU에 대한 Sigma-Delta ADC 구현도

S1JA Sigma-Delta ADC에는 외부 센서에 전원을 공급하는 데 사용할 수 있는 독창적인 기능인 SBIAS가 통합되어 있다. 출력 전압 범위는 0.8V~2.2V로 0.2V 단위로 설정할 수 있다. 출력 전류는 10mA(최대)다. SBIAS는 과전류 (최대 전류 초과) 보호 회로를 가지고 있으며 습니다. 과전류 상태가

발생하면 보호 회로가 내부 회로를 보호합니다. SBIAS 회로는 바이어스 센서(bias sensor)에 대한 외부 전원 공급의 필요성을 제거해준다.

여기서 다른 이점 이외에도 S1JA Sigma-Delta ADC는 이벤트 링크 컨트롤러 모듈을 통해 제어가 가능한 변환 시작(start-conversion) 기능을 지원한다. 이는 다양한 주변 모듈에 의해 생성된 이벤트 요청을 소스 신호로 사용하여 다른 모듈에 연결할 수 있어 CPU 개입 없이 모듈 간 직접 연결을 구현해준다. 설계자는 이 기능을 사용하여 정확한 시간으로 측정하거나 동적 바이어싱 시스템(dynamic-biasing system)과 같은 제품 향상을 위한 다양한 기능을 구현할 수 있다. 자세한 내용은 사용자 매뉴얼의 S1JA 이벤트 링크 컨트롤러 챕터에서 확인할 수 있다.

결론

연산 증폭기, Sigma-Delta ADC, 연속 근사 ADC, 디지털-아날로그 컨버터 등 고정밀 아날로그 기능을 제공하는 S1JA 와 같은 완전 통합형 마이크로 컨트롤러는 외부 컴포넌트를 제거하여 설계를 단순화시켜주고 비용을 절감하고 시스템의 안정성을 높여준다. 기술 프로세스와 설계 기술의 발전으로 전에는 외부 전용 컴포넌트로만 가능했던 고사양 아날로그 기능을 구현할 수 있게 되었다. 또한 마이크로 컨트롤러에 아날로그 기능이 통합되면서 사용자가 완벽하게 제어할 수 있는 다양한 조합의 아날로그와 디지털 기능을 구현할 수도 있다. 이제 설계자들은 다양한 방식으로 자신이 원하는 새로운 애플리케이션을 설계할 수 있게 된 것이다.

© 2018 Renesas Electronics America Inc. (REA). All rights reserved. 모든 상표와 상호는 해당 소유권자의 상표입니다. REA에서는 본 자료에 포함된 정보의 정확성을 신뢰하나 그 품질이나 사용에 대해서는 어떠한 책임도 지지 않습니다. 모든 정보는 있는 그대로 제공되며 상품성, 특정 용도 또는 권리 침해 여부에 대한 적합성 등에 대해 어떠한 명시적 또는 묵시적, 법적 보증이나 거래 또는 사용에 대한 보증도 하지 않습니다. REA는 본 자료에 포함된 정보의 사용 또는 이로 인해 발생하는 직간접적, 특수적, 결과적, 부수적 또는 기타 손해에 대하여 어떠한 책임도 지지 않습니다. REA는 사전 공지 없이 본 자료에 포함된 제품의 생산을 중단하거나 본 자료에 명시된 제품 설계나 사양, 기타 정보를 수정할 수 있습니다. 본 자료의 모든 내용은 미국과 국제 저작권법의 보호를 받습니다. 본문에서 달리 명시한 경우를 제외하고는 본 자료의 어떠한 부분도 Renesas Electronics America Inc.의 사전 서면 동의 없이 어떠한 형식이나 수단으로든 복제할 수 없습니다. 방문자 또는 사용자는 본 자료를 어떠한 공공 또는 상업적 목적으로도 수정, 배포, 출판, 전송하거나 이를 기반으로 작업물을 생성할 수 없습니다.