

# GEN II ウェアラブル・デバイスを支えるセンサー

著者: Jan-Hein Broeders  
ヘルスケア・ビジネス開発マネージャ  
Analog Devices, Inc.

人口の高齢化が進み、ヘルスケア・サポートを必要とする人々が増加していることで、全体的な医療支出に大きな影響が生じつつあります。その結果、政府機関や医療保険各社は、予防、健康に対する意識、ライフスタイルをより重視するようになっています。これは単に運動時間を増やしたり、食事を改善したりすることにとどまらず、一般に、身体の一部のバイタル・パラメータをモニタリングすることにより多くの関心が向けられています。スマートウォッチやヘルスウォッチ・ビジネスの売り上げが過去数年にわたって増加しているのは、このためです。

ただし、ヘルスウォッチを購入してバイタル・パラメータを測定しても、それだけでより健康な人生を送ることができるわけではありません。大事なことは、一定の身体パラメータを長期間にわたってモニタしてこれらの数値をよく把握し、日々の生活を改善するためにそのデータを使っていくことです。このプロセスは、身体がどのように機能しているのか、また、長期的にかかる健康のためのコストをどうすれば減らすことができるのか、ということについて、理解を深める助けとなり得るものです。

この記事では、アナログ・デバイセズの最新ウェアラブル VSM プラットフォームと、そこに使われているセンサー技術について説明します(ウェアラブル・デバイスは図 1 を参照)。アナログ・デバイセズは最終製品のメーカーではありません。しかし、このプラットフォームは、エレクトロニクス設計者やシステム・アーキテクトが医療従事者や医療市場向けに、新しく、よりスマートで、より正確なウェアラブル・デバイスを設計する際に、その開発プロセスの短縮を助けるリファレンス・デザインとして設計されたものです。

## 何を、どのように、どこで測定するのか

ウェアラブル・デバイスは、広範なバイタル・パラメータを測定することができます。全体の目標に応じて、特定のパラメータの測定が他のパラメータの測定よりも重要になります。ウェアラブル・デバイスの装着部位は、何を測定でき、何を測定できないかに大きく影響します。最もわかりやすい位置は手首です。人は手首に何かを装着するのに慣れており、スマートウォッチや手首装着型デバイスなどの製品がこれだけ大量に販売されている理由もここにあります。手首の他には、頭部もウェアラブル・デバイスの装着に適しています。例えば、ヘッドフォンやイヤフォンは、心拍数、酸素飽和度、体温などのパラメータを測定するためのセンサーを組み込んだ、さまざまなスタイルのものが提供されています。ウェアラブル・デバイスの装着に適した 3 つ目の場所は胸です。第 1 世代の心拍数モニタはチェスト・ストラップに取り付けて使用するよう設計されてい

ましたが、この生体電位測定法は現在でも非常に正確な方法とされています。しかし、チェスト・ストラップは付け心地があまり良くないので、現在ではチェスト・パッチが使われる傾向にあります。いくつかのメーカーが、バイタル・パラメータ・モニタ用のスマート・パッチ設計に参入しています。



図 1. アナログ・デバイセズの GEN II 統合ウェアラブル・デバイスのリファレンス設計

身体の位置によっては、どのパラメータを測定するかという選択だけでなく、どのような技術を使用するかを選択する必要があります。例えば、心拍数の測定では、生体電位測定が最も古典的な技術の一つです。信号は強く、2個以上の電極を利用して容易に測定することができます。この場合は、チェスト・ストラップやヘッドフォンに回路を組み込むのが最良の方法です。しかし、手首のように 1 か所だけで生体電位信号を測定することはほぼ不可能です。測定は、これらの電気信号が生成される心臓を挟んで行う必要があります。シングル・スポット測定には、光学技術のほうが適しています。この場合は光が組織に当てられ、その反射が動脈内の血流を示すものとして取り込まれて測定されます。この光学的に受け取った信号から、心拍に関する情報を引き出すことが可能です。この技術は比較的簡単なように聞こえますが、身体の動きや周囲の光など、設計を非常に難しくする可能性のある課題や影響因子があります。

アナログ・デバイセズの GEN II ウェアラブル・デバイス用リファレンス・プラットフォームは、上述したほとんどの技術を搭載しています。このデバイスは手首に装着するように設計されていますが、ソフトベルトを取りはずして胸に取り付け、スマート・パッチとして使用することもできます。このデバイスには、生体電位測定、光学式心拍数測定、生体インピーダンス測定、モーション・トラッキング、体温測定のための技術が搭載されており、そのすべてが小型のバッテリー駆動デバイスに統合されています。

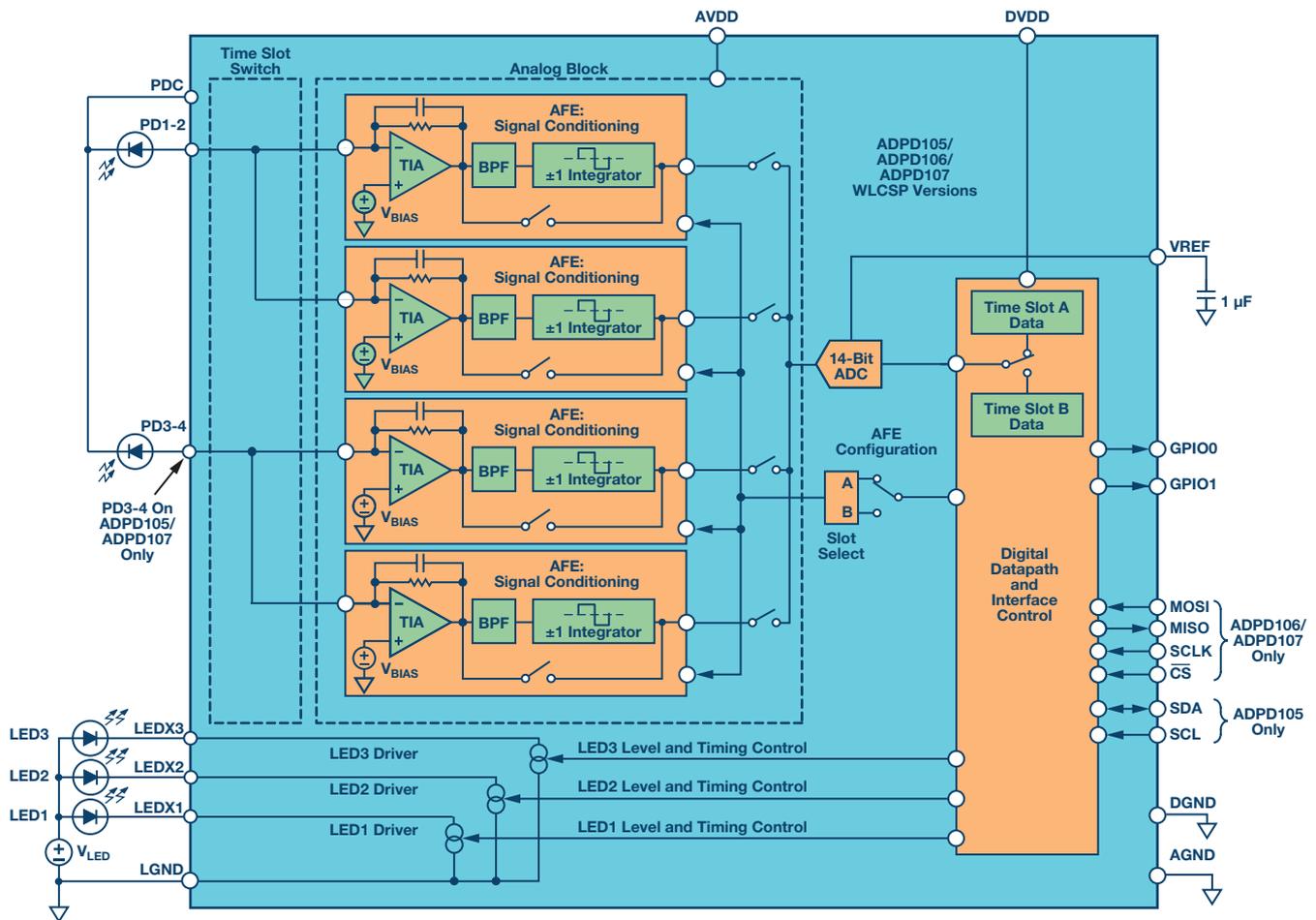


図 2. ADPD105/ADPD106/ADPD107 のブロック図

## 根底にあるメッセージ

アナログ・デバイゼズは、なぜGEN II ウェアラブル・デバイスのようなシステムを設計したのでしょうか。こうしたシステムの目標は、さまざまなセンシング技術を評価することと、身体の複数のバイタル・パラメータを簡単な方法で測定することを可能にすることにあります。これらの測定値はフラッシュ・メモリに保存するか、BLEワイヤレス接続を介してスマート・デバイスに送信することができます。また、測定は同時に行われるので、それが複数パラメータ間の相関関係を知る手助けにもなります。バイオメディカル・エンジニア、アルゴリズム・プロバイダ、起業家は、病気の発見が遅れた場合に予想される体への悪影響や損害を最小限に抑えるために、早期に病気を発見するための新技術、アプリケーション、使用事例を常に探し求めています。

## センサーがデバイスを作る

このデバイスは、サンドイッチのように重ねられた2枚のPCBを中心に設計されています。メイン・ボードには低消費電力のプロセッサ、BLE無線、そしてバッテリーのコンディショニングおよび充電機能を含むフル機能の電源管理セクションが組み込まれています。2枚目のボードは、すべてのセンシング技術をサポートしています。

PPG測定(フォトプレキシモグラフィ、光電式容積脈波記録法)用の光学システムは、アナログ・デバイゼズの第2世代光学アナログ・フロント・エンドである **ADPD107** を中心に構成されています。ADPDファミリーのブロック図を図2に示します。

ADPD107はフル機能のトランシーバーとして動作し、システム内のLEDを駆動してフォトダイオードからのリターン信号を測定します。その目的は、所定のLED消費電流に対して、できるだけ大きい光電流(電流伝達率)を測定することです。入力受信シグナル・チェーンはコンフィギュラブル・トランスインピーダンス・アンプを中心に設計されており、200kを最大値としてゲインを4段階にプログラムできます。第2段では周囲光を除去します。周囲光の干渉は大きな問題で、LEDを使用するソリッドステート・ライティング・システムや節電型ランプのように光が変調される場合は、周囲光の影響を特に受けやすくなります。周囲光除去ブロックでは、バンドパス・フィルタに続き、同期復調を行うための積分器が接続されています。これは重要な機能で、周囲光を非常に効果的に除去します。何らかの理由で周囲光除去段が必要ない場合は、このブロックをバイパスすることもできます。

光学システムでは光パルスを利用しています。3つあるLED電流源はプログラム可能で、LED電流は最大370 mAまで設定できます。また、パルス幅も最小1 μsまでプログラム可能です。ただし、信号応答を良好なものとするには、パルス幅を2 μs ~ 3 μs程度にする必要があります。通常は、一連のLEDパルスが出力され、A/Dコンバータがそのパルス形式のLED送信パルスに関連するフォトダイオード受信信号をサンプリングします。このデジタル・エンジンは、複数のサンプルを平均して全体的な有効ビット数を増やすことができます。

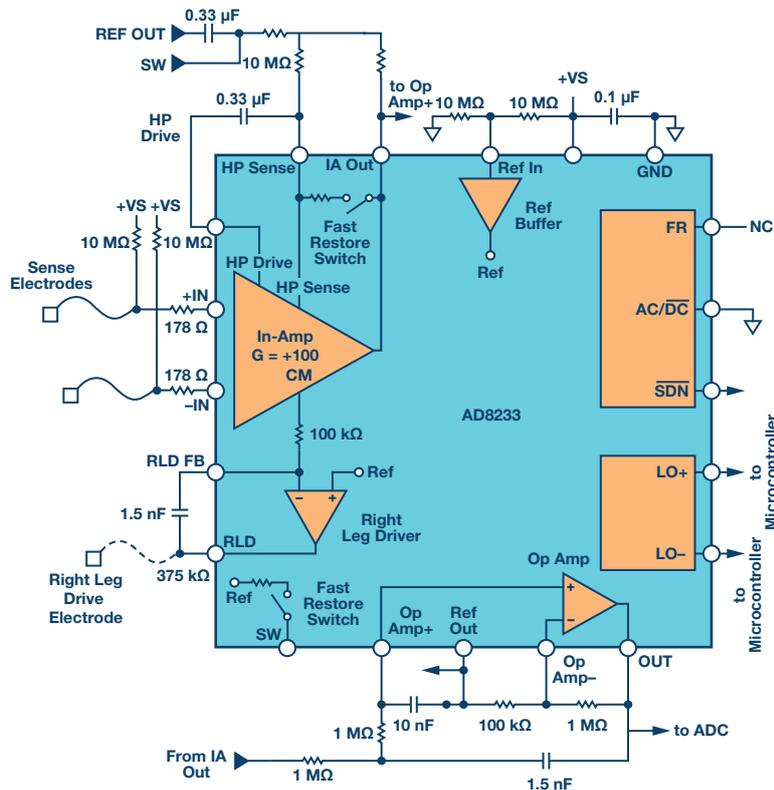


図 3. AD8233 ECG フロント・エンドのブロック図

光学システム同様、機械的設計も全体の性能に大きく影響します。この GEN II デバイスの光学部品は、ディスクリット・デバイスとして選択されたものです。これにより、フォトダイオードの選択と LED 波長、および LED とフォトダイオード間の間隔などの機械的制約に高い柔軟性がもたらされます。GEN II デバイスでは、2 個の緑色 LED、1 個の赤色 LED、および 1 個の赤外線 LED が使用されています。光学システム的设计経験が浅い人にとっては、すべての光学モジュールが組み込まれているほうが簡単です。フォトダイオードの数、そのサイズ、LED 波長の選択に関してはさまざまな選択肢があります。最新のモジュールは、プラスチック・ウィンドウ越しに取り付けた場合でも優れた光学性能を発揮できるように開発されています。第 1 世代のモジュールでは、内部的な光害（光学的なクロストークと見なすことができます）を除去するためにスプリット・ウィンドウが必要でした。スプリット・ウィンドウは、身体に入り込まず LED から直接放出されてくる光による DC オフセットを減らすのに有効でした。しかし、このようなスプリット・ウィンドウを組み込むのは容易でなく、また、コストの点からも好ましいものではありません。ADPD144RIZ や ADPD175GGIZ のような最新ファミリーではこの点が大幅に改善されており、完全なウィンドウは 1 つだけですが、内部光害の影響はほとんどゼロまで減少しています。

生体電位測定は、2 個の AD8233 アナログ・フロント・エンドでサポートされています。AD8233 (図 3 参照) はアナログ・デバイスの第 2 世代のシングル・リード ECG 用フロント・エンドで、右足駆動 (RLD) 機能を内蔵しており、ノイズの多い環境でもわずかな生体電位信号を抽出して増幅し、フィルタリングできるように設計されています。このコンポーネントが対象とするアプリケーションは、ウェアラブル・デバイス、ポータブル・ホームケア・システム、エクササイズ機器などです。AD8233 は DC カップリング構成で動作します。入力段は 2 つのゲイン段に分割されています。ゲインが制限された最初の段の後には、2 次ハイパス・フィルタと 2 番目のゲイン段が続いています。この入力ブロックの合計ゲインは 100 V/V で、これは電極のハーフセル電位によって生じるオフセットを引いた

値です。AD8233 の 2 つ目の段は 3 次ローパス・フィルタに接続されています。これはゲイン 1 で動作する 2 次サレンキーで、さらにこの後に追加のローパス・フィルタが続いています。このフィルタの目的は、筋肉の動きによって生じるすべての EMG 関連信号を除去することです。

生体電位フロント・エンドの動作周波数は用途によって異なります。QRS の検出だけが必要とされる通常の心拍数モニターでは、より多くの情報が必要な ECG モニターに比べると、動作周波数範囲がはるかに狭くなります。ECG モニターでは、P 波、QRS 複合、T 波からのタイミング・データや振幅データなどの情報が必要です。AD8233 の対象帯域は、外付けの抵抗とコンデンサで設定できます。柔軟性を持たせるために、GEN II ウェアラブル・デバイスは内蔵電極に接続された ECG フロント・エンドを備えています。これはスポーツ帯域幅内に設定されていて、7 Hz ~ 25 Hz の対象帯域をサポートしています。外部電極と組み合わせると動作可能な別の AD8233 は、0.5 Hz ~ 40 Hz の信号をモニターするように設定されています。基本的に、ほぼあらゆる帯域幅を選択することができますが、そのためには、R と C の設定を変えることによってハードウェアを変更する必要があります。

必要な精度によっては、AD8233 の出力を、センサー・ボードの Cortex<sup>®</sup>-M3 プロセッサに組み込まれた 12 ビット逐次比較レジスタ (SAR) ADC に送るか、スタンドアロンの 16 ビット AD7689 SAR ADC によってデジタル化することもできます。また、精度を優先するかバッテリー寿命を優先するかに応じたトレードオフが可能です。

デバイスの裏側には 2 本の電極があります。これらの電極には 2 つの機能があり、ECG の他に皮膚電気活動 (EDA) の測定にも使用できます。

EDAは皮膚電気反射(GSR)とも呼ばれ、皮膚の導電率に関係していますが、感情によって刻々と変化します。これは、内部的または外部的な刺激、例えばストレスやてんかんによる皮膚のインピーダンス変化によるものです。GENIIデバイスは、このわずかな導電率の変化を検出することができます。このシステムは、2個のドライ電極に加えられるAC励起信号を使用しています。ウェット電極も使用可能で、そのほうがより良い結果を得ることができますが、このデバイスは、2個のステンレス製内蔵ドライ電極だけを使用しています。励起信号を使用する主な利点は、電極の分極がなくなることです。受信シグナル・チェーンはトランスインピーダンス・アンプを構成しており、その後AD7689 16ビットSARADCが続いています。ADCのサンプリング・レートは、性能上の理由から励起レートよりはるかに高くなっています。ADC出力の後段には、ADuCM3029プロセッサ上で実行される離散フーリエ変換(DFT)エンジンが続いており、複素インピーダンスを構成しています。以上に述べた測定原理は、高いS/N比で皮膚のインピーダンスや導電率を測定することができ、50 Hz/60 Hz 環境ノイズの除去性能も良好です。この測定原理に基づいた回路は、すべてディスクリート部品で作ることができます。このような設計にした主な理由は、比較的低い消費電力での柔軟性と精度です。現在、アナログ・デバイスでは上述のアプリケーションをサポートする新しいチップの開発を続けています。この設計は、最小限の消費電力で高い精度を実現します。ADuCM350は消費電力条件の厳しいアプリケーション用に最適化されたものではありませんが、これも同様の測定に対応しています。

人間の体がしていることがわからないままウェアラブル・デバイスでバイタル・パラメータを測定しても、意味がありません。このため、モーションの検出とプロファイリングが重要になります。光学式心拍数モニタリングなどの一部の使用事例は動作に対して非常に敏感で、測定の精度が動作によって完全に失われてしまうことも考えられます。したがって、アーチファクトを補償するには動作も追跡する必要があります。モーション・センサーは動作を追跡する助けとなり、必要な場合は、最終的な指示値において動作を補償することもできます。ADXL362は、入手可能なものの中では最も消費電力の小さいモーション・センサーです。これは12ビットADCを組み込んだ3軸MEMSセンサーで、X、Y、Z軸方向の動作を検出します。このセンサーの消費電力はADCの出力データ・レート(ODR)によってほぼ決まりますが、その値は、各軸400 HzのフルODR時で3  $\mu$ Aです。出力データ・レートの関数として表した消費電力のプロットを、図4に示します。

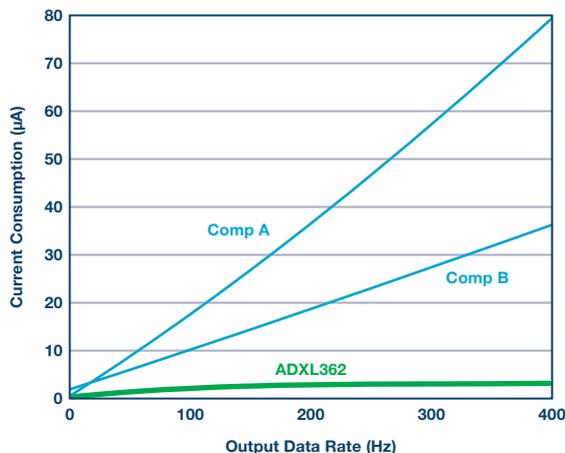


図4. 出力データ・レートの関数として表したADXL362の消費電力

このセンサーはモーション起動スイッチとしても使用でき、サンプリング・レートをわずか6 Hzに減らすことも可能です。センサーは150msごとにウェイクアップして動作を測定します。動作がないときはそのままスリープ状態に戻り、さらに150ms待機します。この時点で、プログラムされた閾値以上のgがプログラムされた最小時間以上にわたって生じると、動作が検出され、センサーが割込みを生成するか、電源スイッチをイネーブルしてアプリケーションを起動します。このモードでセンサーが消費する電流はわずか300 nAで、コイン型電池1個で数年間動作させることができます。ここに概要を示したこの使用事例でも、モーション・センサーはウェアラブル・デバイスに不可欠なものとなっています。

もう1つのバイタル・パラメータが体温測定です。GEN II ウェアラブルに2個の温度センサーが組み込まれているのも、このためです。手首装着型デバイスは、NTCを使用して皮膚温度とデバイス内温度の両方を測定します。身体に接触したセンサーを介して温度を測定する方法は複数あります。NTCはディスクリート回路によって電源供給と調整が行われ、最終的に16ビットADCが信号をデジタル領域に変換します。アナログ・デバイスは、さまざまな精度レベルの広範な温度センサーを提供しています。GEN IIの温度センサーがディスクリート構成になっている理由は、ADCなどのいくつかの機能をどのような形で使用できるからで、そのために設計者はいくつかのブロックを可能な限り再利用して冗長性を減らし、余分な消費電力がかからないようにしています。

### 必要な機能をすべて備えたADuCM3029

GEN II デバイスには2つのプロセッサが使われています。どうしても2個のプロセッサが必要なわけではありませんが、より高い柔軟性を得ることができます。プロセッサはBLEインターフェース・ボードに1個搭載されている他、自律的な動作が可能のように、センサー・ボードにも同じプロセッサが搭載されています。

プロセッサとしては、センサー・データを収集してアルゴリズムを実行するために、超低消費電力のADuCM3029が組み込まれています。このプロセッサに統合されたブロックの概要を図5に示します。

コアは、豊富なペリフェラル・セット、オンボード・メモリ、アナログ・フロント・エンドを備えた26 MHzのCortex-M3です。動作モードは4種類で、フル動作時で1 MHzあたり38  $\mu$ Aを消費します。処理能力が必要ないときは、フレキシモードでデバイスを使用できます。この動作モードでは、アナログ・フロント・エンドを動作させてペリフェラルをアクティブにし、DMAを通じて測定信号をメモリに保存することができます。フレキシモードで消費される電流はわずか300  $\mu$ Aなので、低消費電力であることが求められるバッテリー駆動システムに最適です。このデバイスは、コード保護のためのいくつかのセキュリティ機能と、暗号化機能用のハードウェア・アクセラレータを備えています。

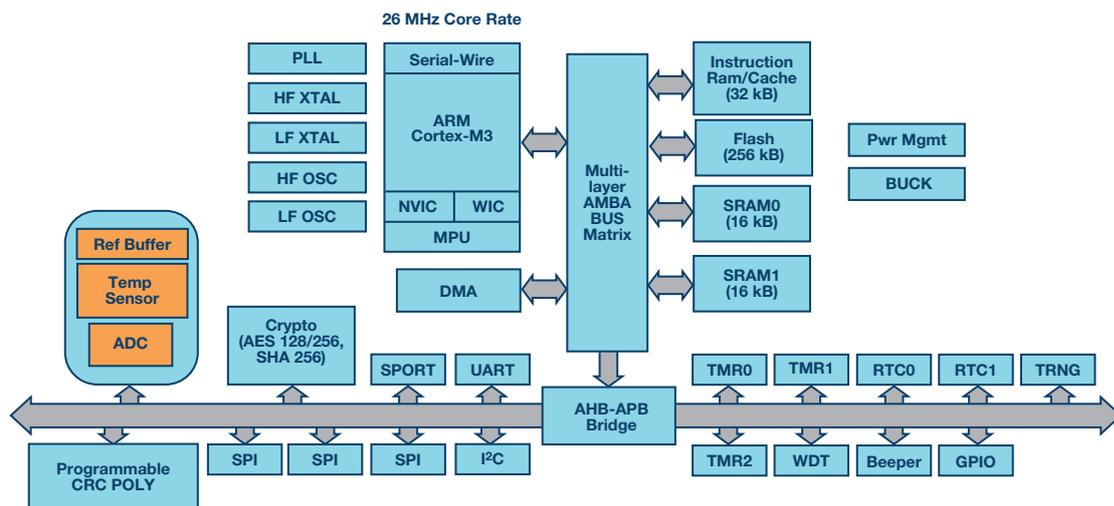


図 5. ADuCM3029 の統合化されたブロック

## 使用事例

GENIIウェアラブル・デバイスは、さまざまな目的に使用できます。センサーはスマートウォッチに組み込むことができますが、正確な心拍数モニタリングや活動計測/カロリー消費を含む一連の機能は、スポーツウォッチにとっても有用です。スマートウォッチとスポーツウォッチのトレードオフは、主に精度とバッテリー寿命の間で行われます。

このデバイスは、ストレスや感情状態の計測に使用でき、通常は信頼性の高い測定値を得るために、皮膚インピーダンス、心拍数変化、体温など、複数の測定値を組み合わせています。

もう1つの興味深い使用例が血圧のモニタリングです。これは非常に重要なパラメータですが、そのシステムはほとんどがカフを使用するもので、ウェアラブルかつ継続的なシステムに組み込むことは困難です。ただし、カフを使用せずに血圧を測定できる手法もいくつかあり、その1つが脈波伝播時間(PTT)を使用する方法です。この方法では、ECG測定とPPG測定を組み合わせる必要があります。GENIIウェアラブル・デバイスに組み込まれたセンサーは、この方法に対応可能です。

最後の重要な市場は、老人介護と自立生活支援に関するものです。介護者による特定パラメータのリモート・モニタリングを支援できるシステムには、非常に大きなニーズがあります。このウェアラブル・デバイスは、必要とされる機能の95%をサポートします。このシステムは複数のバイタル・パラメータをモニタし、人が動いたり歩いたりしている場合はそれを追跡することもできますが、さらに、転倒を検知することも可能です。このウェアラブル・デザインには緊急ボタンがありませんが、これは、プロセッサの1本のI/Oピンをデバイス上面のスイッチに接続するだけで実装できます。

## プロトタイプから製品へ

GEN II デバイスでは、多くの高性能センサーと機能が小型のウェアラブル・システムに組み込まれています。また、エレクトロニクスの設計の他に、数多くの機械的側面も考慮されています。このような点で、このプラットフォームは、セミプロ・スポーツ市場や医療市場に重点を置く設計会社やデバイス・メーカー、そしてスマート・ビルディング、自立生活支援、老人介護などに携わる企業にとって、非常に魅力的なものとなっています。すべてのパラメータは同時に計測可能ですが、さまざまな用途に対応するには、アルゴリズムによってアプリケーションを補完する必要もあります。このデバイスを利用すれば、開発者とデバイス・メーカーは、ハードウェアを構築してからアルゴリズムのテストと妥当性確認を行う代わりに、開発をすぐに開始することができます。提供可能な GEN II デバイスの数量は限られていますが、アナログ・デバイセズは、プロの介護士や医療保険会社に販売できる最先端のシステムを、設計会社やアルゴリズム・プロバイダと協力して開発することに強い関心を抱いています。

詳細は、[analog.com/jp/healthcare](http://analog.com/jp/healthcare) を参照してください。

## 著者について

Jan-Hein Broeders。アナログ・デバイセズのEMEAヘルスケア・ビジネス部門のヘルスケア・ビジネス開発マネージャ。ヘルスケア産業界との密接な協力関係の下、市場をリードするアナログ・デバイセズのリニア・コンバータ技術とデータ・コンバータ技術、およびデジタル信号処理製品や電力用製品をベースに、現在および将来の要求をソリューションに反映させる業務に従事。Jan-Hein は、20 年前、Burr-Brown のアナログ・ワールド・アプリケーション・エンジニアとして、半導体業界でのキャリアをスタート。Texas Instruments による同社買収の 5 年後、Philips 担当のグローバル FAE としてアナログ・デバイセズに入社。2008 年よりヘルスケア・ビジネス部門で現職を務める。オランダのスヘルトーヘンボス大学で電気工学士の学位を取得。

連絡先: [jan.broeders@analog.com](mailto:jan.broeders@analog.com)

## オンライン・サポート・コミュニティ



当社のオンライン・サポート・コミュニティで、アナログ・デバイセズの技術専門家と連携することができます。設計上の難問について問い合わせたり、FAQ を参照したり、話し合いに参加することができます。

[ez.analog.com](http://ez.analog.com)

\*英語版技術記事は [こちら](#) よりご覧いただけます。

## アナログ・デバイセズ株式会社

本社 〒105-6891 東京都港区海岸1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル10F  
大阪営業所 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原3-5-36 新大阪トラストタワー10F  
名古屋営業所 〒451-6040 愛知県名古屋市中区牛島町6-1 名古屋ルーセントタワー40F

©2018 Analog Devices, Inc. All rights reserved.  
本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。  
Ahead of What's Possible はアナログ・デバイセズの商標です。

TA16175-0-9/17

[www.analog.com/jp](http://www.analog.com/jp)



想像を超える可能性を  
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™