

インダストリアル IoT のセンシングと計測: エッジ・ノード

著者: Ian Beavers
Analog Devices, Inc.

インダストリアル IoT (Internet of Things: モノのインターネット) は、幅広い分野で変革を巻き起こしています。複数の接続されたマシンをセンシングすることは、競争上有利なだけでなく、基本的サービスとして不可欠なものになるでしょう。インダストリアル IoT は、対象とするセンシングと計測の入口となるエッジ・ノードから始まります。エッジ・ノードは、物理的な世界がコンピュータによるデータ分析と相互作用する場となります。ネットワーク接続された産業機械は、重要な決定に使用するさまざまな情報を検知することができます。このエッジ・センサーは、履歴分析データを格納するクラウド・サーバから遠く離れていることがよくあります。センサーを、エッジ・データをインターネットに集約するゲートウェイ経由で接続する必要があります。理想的には、スペースが限られた環境でも容易に配置できるように、エッジ・センサーのノードは小型公称フォーム・ファクタ内で邪魔にならない大きさにします。

センシング、計測、解釈、接続

インダストリアル IoT シリーズのこの最初の部分では、IoT のより大きな枠組みにおけるエッジ・ノードのセンシング機能と計測機能の基本的な側面、すなわちセンシング、計測、解釈、接続について検討します。また、パワー・マネージメントとセキュリティについても検討します。それぞれの面に、独自の課題があります。エッジ・ノードのスマート・パーティショニングは、実装を成功させるための鍵となることがあります。超低消費電力 (ULP) が最も重要な性能指標となることもあります。重要なイベント中にセンサーがスリープ・モ

ードから復帰すると、有望なデータの大部分がフィルタリングされてしまう可能性があります。

センサーは、インダストリアル IoT のエレクトロニクス・エコシステムのフロント・エンド・エッジとなります。計測は、センシングした情報を意味のあるもの、例えば、圧力、変位、回転といった定量化できる値に変換します。解釈の段階では、エッジ分析と処理によって、測定データが実行可能なイベントに変換されます¹。最も重要な情報だけを、予測処理または履歴処理のためにノードを越えてクラウドに接続する必要があります。シグナル・チェーン全体で、初期許容上限値に基づいてデータを拒否またはフィルタリングすることができます。理想的には、センサー・ノードは、絶対に必要な情報のみを送信し、また重要なデータが利用可能になり次第すぐに重要な決定を下すべきです。

エッジ・ノードは、有線または無線のセンサー・ノード (WSN) を介して外部ネットワークに接続する必要があります。シグナル・チェーンのこのブロックでも、データの完全性が重要です。最適な検出データと測定データであっても、通信に整合性がなかったり、通信が消失したり破壊された場合には、ほとんど価値がありません。通信におけるデータの欠落は、他に対処できる方法はありません。電気的ノイズの多い産業環境は厳しく過酷です。特に金属が多量に存在する環境における無線周波数通信にとっては、それが言えます。したがって、システム・アーキテクチャの設計の際は、堅牢な通信プロトコルとなるように事前に考慮しなければなりません。

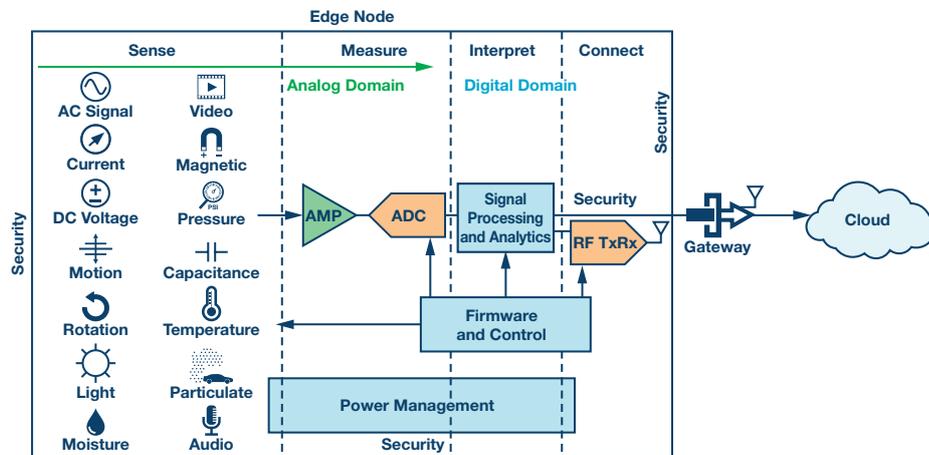


図 1. エッジ・ノード・デバイスは、クラウドへのインターネット・ゲートウェイに対してセンシング、計測、解釈、接続のためのインテリジェンスを提供します。データを何らかの分析形式で前処理してから、より高度なデータ・マイニング・インテリジェンスのために送信できます。

ULPシステムの電源管理は、効率を最大化するようにレギュレータ・コンポーネントを選択することから始まります。しかし、エッジ・ノードは短いデューティ・サイクルでウェイクアップやスリープする可能性もあるため、パワーアップとパワーダウンの時間も無視すべきではありません。外部トリガまたはウェイクアップ・コマンドは、エッジ・ノードにすばやくアラートしてデータのセンシングと計測を開始させる機能に役立ちます。

インダストリアル IoT システムでは、データ・セキュリティについても考慮しなければなりません。エッジ内のデータ保護を確保するのみならず、ネットワーク・ゲートウェイへのアクセスを悪意ある目的から保護することも必要です。不正操作を目的とした偽装によるネットワーク・アクセスを、エッジ・ノードが許可してはなりません。

エッジでのインテリジェンスの開始

エッジには多くのセンシング・ソリューションがあり、単一のディスクリート・デバイスとは限りません。エッジは、多種多様で互いに無関係なデータを同時に取得することがあります。温度、音、振動、圧力、湿度、動き、汚染物質、オーディオ、ビデオは、センシングして処理し、ゲートウェイ経由でクラウドに送信してさらなる履歴分析や予測分析を行うことのできる、変数の一部にすぎません。

センサーは、インダストリアル IoT のバックボーンであると言っても過言ではありません²。しかし、知見を引き出すための中枢神経系であると言ったほうがより正確かもしれません。エッジ・ノードのセンシング技術と計測技術は、目的とするデータが生まれる源といえます。ソリューション・チェーンのこの段階で不良または不正確なデータがそのまま記録されてしまったら、クラウド内での後処理では失われた価値を取り戻すことはできません。

重大な結果を伴うヘルスケアや生産ライン停止の監視など、ミッション・クリティカルなシステムでは、高品質なデータ計測が確実に行われることが要求されます。データの品質が最重要です。偽陽性や脱落は費用や時間を消費し、生命を脅かす可能性があります。高くつくエラーは、最終的に予定外の保守や労働力の非効率的な使用につながったり、IoTシステムを完全に無効にしてしまいかねません。インテリジェンスはエッジ・ノードで始まります。ここでも、「ごみを入れればごみしか出てこない」の古い格言どおりにならないようにします。

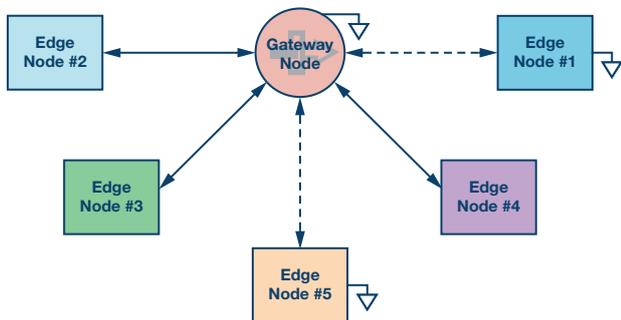


図2. 有線および無線の多くのエッジ・ノード出力は、ゲートウェイ・ノードに自律的に接続して集約させてから、クラウド・サーバに送信することができます。

大量データ・アクセスに伴う大きな負担

エッジ・ノードのインテリジェンスがない従来のシグナル・チェーン・ソリューションでは、データは意味を持たない単なるデータにすぎません。インテリジェンスのないノードは、実行可能な意思決定のための見識や知識を生むのには役立たず¹、目標とするシステム・パフォーマンスに対して効果のない低品質の生データが大量に生じる可能性があります³。このデータをす

べて変換してクラウドの最終的な格納先に送信すると、電力や帯域幅を大量に消費してしまいます。

対照的に、インテリジェントでスマートなパーティショニング・エッジ・ノードにおけるセンシングと計測では、データが実行可能な情報に変わります。インテリジェント・ノードは、全体の消費電力を低減し、遅延を短くし、帯域幅の浪費を減らします⁴。これにより、遅延の大きい事後対応的な IoT から、リアルタイムかつ予測的な IoT モデルへの移行が可能になります。基本的なアナログ・シグナル・チェーン回路の設計思想は IoT にも適用されます。複雑なシステムで処理データを解釈するには、アプリケーションに対する高度な専門知識がしばしば必要となります。

最適化されたスマート・パーティショニングによるクラウド価値の最大化

最も重要な計測情報だけが、最終処理のためにゲートウェイを介してクラウドに送信されるようにする必要があります⁵。データの大部分がまったく重要でないこともあります⁵。ただし、ローカルでリアルタイムに決定しなければならない緊急を要するシステム・データは、リモート・アクセスで遠隔地に集約されるずっと以前に処理する必要があります。一方、長期的な知見に影響を与える予測モデルに履歴の価値を生かす情報の使い方は、クラウド処理にとって理想的です。適時的な処理や意思決定のためにデータを大量データベースにアーカイブすることは、強力なクラウド処理とストレージの強みだからです⁶。

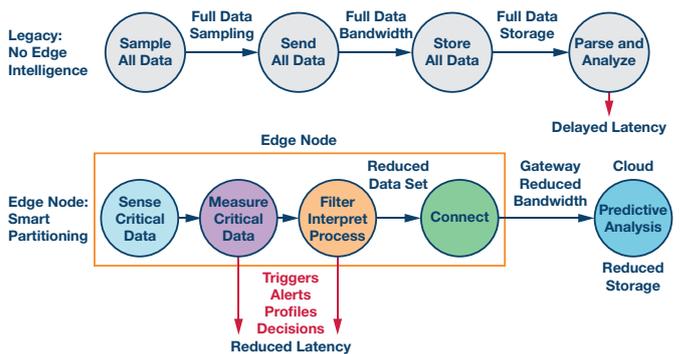


図3. エッジ・ノードでのスマート・パーティショニングは、他の方法ではこれまで解決できなかった課題を解決します。シグナル・チェーンのさらに先で処理能力とインテリジェンスの無駄を省くと、IoTソリューション全体をより効率化できます。

エッジにおけるリアルタイムの意思決定

IoT センサーは主にアナログです。特定の産業アプリケーションの要件によって、エッジ・ノードのフロント・エンドで必要となるセンサーのダイナミック・レンジと帯域幅が決まります。シグナル・チェーンのフロント・エンドはアナログ・ドメイン内にあり、その先で、信号がデジタルに変換されてエッジ外部に送信されます。アナログ・シグナル・チェーンの各コンポーネントは、適切に選択しないと、エッジ・ノード全体の性能を制限してしまう可能性があります。ダイナミック・レンジとは、目的とするセンサーのフルスケールとノイズ・フロアまたは次に高い不要な信号との比率です。

IoT センサーは、一般に既知と未知の両方のアクティビティを探しているため、アナログ・フィルタは必ずしも有効ではありません。信号には、サンプリング後にデジタル・フィルタリングが実行されます。アナログ・フィルタをセンサーのフロント・エンドで使用しなければ、基本波の高調波または他のスプリアス信号が検出した情報に混入して、目的の信号と電力レベルで競合する可能性があります。したがって、設計の段階で時間領域と周波数領域の両方に目的外のセンシング信号があることを予期しておく、計測データに不要な信号が現れるのを防ぐことができます。

センシング情報は通常、シグナル・チェーン内の次段にある ADC で測定されます。IoT エッジ・ノードがディスクリート部品を用いて設計されている場合は、センサーのダイナミック・レンジを減少させない計測用 ADC を選択するように注意する必要があります。組み込み ADC の入力フルスケール・レンジは、通常、センサーの出力振幅に適合します。理想的には、センサーの出力を ADC で飽和させず、また動作範囲内でクリップさせることなく、ADC の入力レンジのほぼ全域に 1 dB 以内で振幅させます。ただし、ADC 自身のダイナミック・レンジが最大になるように、増幅段を使ってセンサーの出力信号を増幅または減衰させることも可能です。ADC のフルスケール入力、サンプル・レート、ビット分解能、入力帯域幅、およびノイズ密度はすべて、エッジ・ノードの信号計測性能に影響を及ぼします。

フロント・エンド・アンプはノードの計測部に組み込むか、または ADC の前段にディスクリート部品として追加することができます。また、アンプの利得、帯域幅、ノイズの特性によってもエッジ・ノードの性能を向上させることができます。

シグナル・チェーン内でセンサーの後に配置される計測 ADC は、多くの場合、ナイキスト・レートまたは連続時間 $\Sigma\text{-}\Delta$ (CTSD) の 2 種類のサンプリング・アーキテクチャのいずれかです。後者のほうが組み込み ADC では一般的です。ナイキスト・レート ADC では、公称フラット・ノイズ・フロアがサンプル・レート周波数の半分、すなわち $f_s/2$ に等しくなります。CTSD では、ダイナミック・レンジを大きくするためにノッチ型通過帯域でオーバーサンプリング・レートを使用します。これにより、ノイズが目的の帯域幅外に押し出されます。計測 ADC のアーキテクチャとその分解能は、エッジ・ノードのアナログ帯域幅とダイナミック・レンジを理解するうえで重要です。

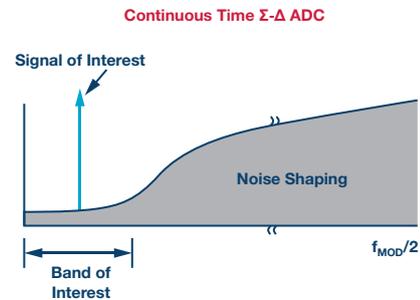
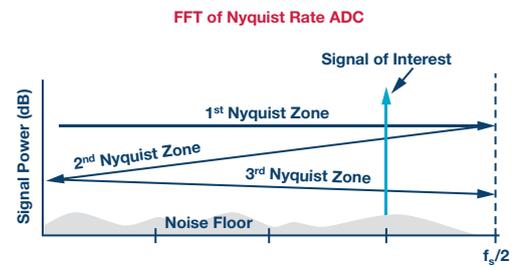


図 4. ナイキスト・レート ADC では、IoT センサーにフロント・エンドのアナログ・フィルタを用いなければ、高次周波数が 1 次ナイキスト・ゾーンを超えて目的とする帯域幅に折り返されてしまいます。対照的に、オーバーサンプリング変調クロックを用いる CTSD ADC アーキテクチャでは、ノイズ・シェーピングにより目的の帯域内で高いダイナミック・レンジが可能になります。CTSD は固有のフィルタリングを用いるため、信号のエイリアシングの影響を受けづらくなります。

例えば、周波数領域では、1 Hz の単位帯域幅あたりのノイズ密度は、ADC の SNR と、のサンプリングされた ADC のスペクトル全体にノイズが広がる程度に基づいて決まります。ナイキスト・レート ADC では、ノイズ・スペクトル密度 (1 Hz 帯域幅あたり) = $0 \text{ dB} - \text{ADC の S/N 比 (SNR)} - 10 \times \log (f_s/2)$ となります。ここで、 $f_s/2$ はサンプル・レートを 2 で除算したもので、つまり ADC の単一ナイキスト・ゾーンです。理想的な SNR は、 $\text{SNR} = 6.02 \times N + 1.76 \text{ dB}$ として計算できます。ここで、 N は ADC のビット数です。ただし、実際の ADC の SNR には、電氣的ノイズやトランジスタ・レベルでの部品の欠陥など、トランジスタや半導体のプロセスにおける非理想的なものが含まれます。これらの非線形性は SNR 性能を理想値以下に低下させるため、ADC のデータシートで目標とする SNR 性能を確認してください。

エッジ・ノードのダイナミック・レンジは、センサーのダイナミック・レンジや、信号の増幅 (必要な場合)、および ADC のフルスケールのダイナミック・レンジで構成されます。フルスケールのセンサー出力信号が ADC フルスケール入力レンジの 1 dB 以内に達しない場合、ADC のダイナミック・レンジの一部は未使用のままになります。逆に、センサーからの信号が ADC 入力レンジを超えると、サンプリングされた信号が歪むようになります。また、アンプの帯域幅、ゲイン、ノイズもエッジ・ノードのダイナミック・レンジを考慮するうえでの要素になります。センサー、アンプ、および ADC で重畳された電氣的ノイズは、それぞれの rms 成分の平方和を平方根したのになります⁷。

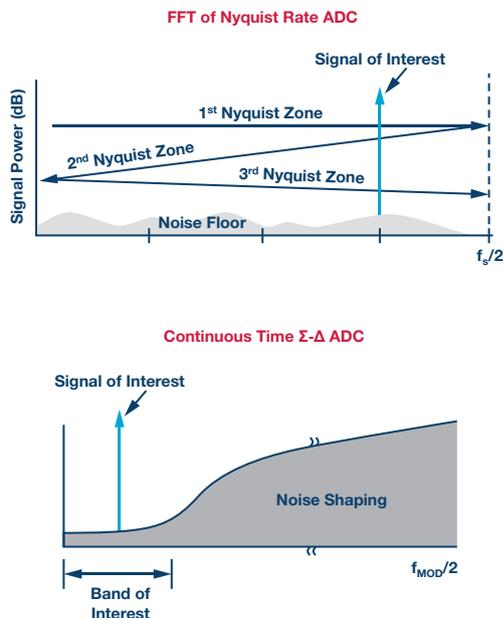


図 5. ADC の入力フルスケールに適合しないセンサー信号の出力振幅と、それによってダイナミック・レンジが失われる例（青色）。ADC で飽和（赤）を防止して、センサーのダイナミック・レンジを最大にするには、アンプが必要です。信号のマッチングでは、エッジ・ノードのシグナル・チェーン全体の帯域幅、ダイナミック・レンジ、ノイズを考慮する必要があります。

スマート・ファクトリー

インダストリアル IoT における重要な用途の 1 つに、機械振動状態のモニタリングがあります。機械装置には、新しいものでも従来のものでも、高ダイナミック・レンジの MEMS 加速度計を装備した回転軸やギアなどの重要な機械部品が搭載されています⁸。これらの多軸センサーは、機械の振動変位をリアルタイムでサンプリングします。振動シグニチャを測定および処理し、理想的な機械プロファイルと比較することができます⁹。工場では、この情報を分析することで効率が向上し、ライン停止状態が減り、機械的な故障を事前に予測することができます。極端な場合、機械部品の劣化が急激で、さらなる損傷を招く可能性のある機械は、直ちに停止することができます。

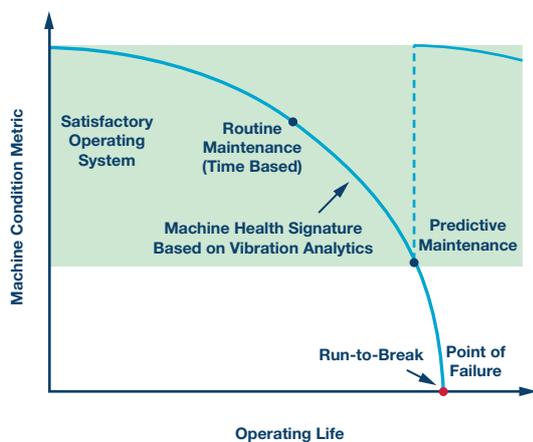


図 6. 定期的な機械メンテナンスを定期的な時間間隔で実行できますが、機械の状態についてインテリジェンスが用いられることはあまりありません¹⁰。特定の機械動作の振動性能を分析すると、障害の予測点やメンテナンスのマイルストーンをエッジ・ノードで警告することができます。

エッジ・ノード分析を有効にすることで、意思決定時間の遅延を大幅に短縮できます。この例を図 7 に示します。この場合、MEMS センサーの警告閾値を超えるとすぐにアラートが送信されます。イベントがきわめて重大とみなされる場合、一刻を争う最悪の機械的故障を防ぐために、問題の装置を自動的に無効にする権限をノードに与えることができます。

あるいは、トリガ信号を発生させて、セカンダリ・マシンのコンポーネント上にあるような、別のセンシング・ノードや計測ノードを有効にし、最初のイベントを基にデータの解釈を開始させることができます。これにより、エッジ・ノードから送られるサンプリング・データのデータ・セット全体が減少します。公称値から逸脱した振動異常を判断するには、検出に必要な性能を備えたフロント・エンド・ノードを設計する必要があります。センシング回路や計測回路のダイナミック・レンジ、サンプル・レート、入力帯域幅を、あらゆる逸脱イベントを識別するのに十分なものにします。

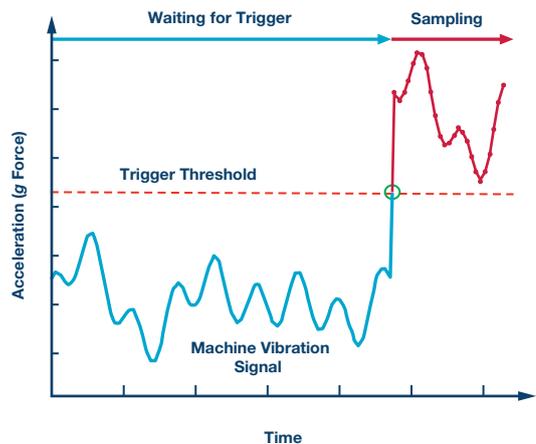


図 7. サンプリングされた機械振動データの時間領域表示。コンパレータの閾値によって、センシングおよび計測したデータがエッジを越えて伝達されたかどうかを判断できます。閾値を超えるイベントが発生してデータの重要性が高まるまで、情報の大部分がフィルタリングされるため、低消費電力状態を維持することができます。

スマート・シティ

インダストリアル IoT エッジ・ノードのアプリケーションには、他にビデオ解析機能を内蔵したスマート・シティ産業用カメラがあります。スマート・シティでは、都市の資産管理を可能にするために、無数の情報や通信ポイントを統合システムに集約するという、都市の目的を定義しています。一般的なアプリケーションとしては、駐車場での空きスペースの通知や占有状態の検知などがあります。試運転時に、各カメラで撮影する範囲が設定されます。境界エッジ検出を解析範囲内で定義して使用することにより、さまざまな対象物とその動きを識別することができます。対象物の過去の動きを解析できるだけでなく、対象物の軌跡に基づき、デジタル信号処理 (DSP) のアルゴリズムを用いてエッジで予測経路を計算することもできます。



図 8. エッジ・ノードでビデオ解析を用いると、対象物の種類の検出、軌跡、および境界の交差は、ビデオ・データの全帯域幅をクラウドに送信して解析しなくても、低電力システムで判断することができます。ブレッドクラム・オブジェクトの座標と種類を含むタイムスタンプを送信するだけで済みます。

周波数フィルタリングと同様に、通常、最終処理にはビデオ解析フレームの全帯域幅は必要ありません。多くの場合、セキュリティの目的で使用しない限り、完全なビデオ・フレームのごく一部があれば済みます。フレーム間のビジュアル・データの大部分は、固定マウントのカメラでは静止しています。この静止しているデータはフィルタリングできます。場合によっては、境界交差の数または対象物の移動座標のみを解析するだけで済むことがあります。縮小したサブセットは、シグナル・チェーン内の次のゲートウェイにブレッドクラム座標として送信することができます。

エッジ・ノードのビデオ解析によって、自動車、トラック、自転車、人間、動物などの対象物の種類を識別するための、フィルタを通したさまざまな解釈が得られます。フルフレーム・レート of ビデオ・データをダウンストリームに送信してクラウド・サーバで解析するよりも、このデシメーションによって、必要とされるデータ帯域幅と計算能力が少なくなります。

屋内カメラの用途では、出入口の境界を横切る人数を特定したり、部屋の照明や暖房、冷房を調整したりすることができます。屋外カメラにおいて、極端な照明条件や降雨時などの困難な照明下で視覚的に認識しやすくするためには、高ダイナミック・レンジのカメラを使用する必要があります。一般的なピクセルあたり8ビットまたは10ビットの撮像センサーでは、どのような検出状況の照明でも、十分な輝度ダイナミック・レンジが得られないことがあります。240Hzのリフレッシュ・レートで高速モーションのスポーツを視聴するのは対照的に、産業分析用カメラで動きを監視する場合は、より低速のフレーム・レートを使用できます。



図 9. エッジ・ノードで使用する、DSP 対象物検出アルゴリズムを用いた高ダイナミック・レンジのイメージャは、低照度条件でも動きや境界への侵入を判断できます。この例では、屋内の工場/オフィス（左）と屋外の駐車場（右）のエッジ検出を定義するのに視覚的なコントラストを使用しています。

プラットフォーム・レベルのソリューション

ADT7420は4mm×4mmのデジタル温度センサーで、16ビット ADC を内蔵して、0.0078℃までの分解能で消費電流がわずか210μAという画期的な性能を実現しています。ADXL362は超低消費電力の3軸MEMS加速度センサーで、モーション・トリガのウェークアップ・モードでは、100 Hz のサンプル・レートでわずか2μAしか消費しません。パワー・デューティ・サイクリングを使用せず、すべてのデータ・レートで全帯域幅アーキテクチャを採用しているため、入力信号のエリアシングを防ぐことができます。ADIS16229は、RF トランシーバーを内蔵した2軸18g デジタル MEMS 振動センサーです。このデバイスは、512ポイントのデジタルFFTを含むオンボードの周波数領域の信号処理機能も搭載しています。

DSP 対応の Blackfin 低電力イメージング・プラットフォーム (BLIP)¹¹ により、実証済みのデジタル信号処理ツールに基づいた工業ビジョン設計のラピッド・プロトタイピングが可能で、最適化されたソフトウェアのライブラリが提供されているため、機器メーカーはモーション・センシングや人数のカウント、あるいは車両検出のためのソリューションをすぐに利用できます。

参考資料

- 1 Colm Prendergast. "Smart Partitioning and Value Creation in a Connected World." Keynote IoT Address: IESA Vision Summit 2015.
- 2 Stephen Lawson. "IoT Keeps Pushing Analytics Closer to the Edge." PCWorld: IDG News Service, 2016.
- 3 Lisa Morgan. "Edge Analytics an Antidote to IoT Data Deluge." InformationWeek: UBM Electronics, 2016.
- 4 Daniel Kirsch. "The Value of Bringing Analytics to the Edge." Hurwitz & Associates Services, 2015.
- 5 Jason Stamper. Why IoT Is Driving Analytics to the Edge of the Network. 451 Research, 2015.
- 6 Steve Nelson. "Exploring the Internet of Things from End to End." Element14: UBM Electronics, 2014.
- 7 Umesh Jayamohan. "Understanding How Amplifier Noise Contributes to Total Noise in ADC Signal Chains." Analog Dialogue, February 2013.
- 8 Robert Randall. Vibration-Based Condition Monitoring. New South Wales, Australia: University of New South Wales, 2010.
- 9 Ed Spence. "Bring the Benefits of MEMS Accelerometers to Condition Monitoring." Electronic Design, Penton Publishing, 2016.
- 10 Jamie Smith. "Smart Edge Devices for the Industrial Internet of Things." ARC Industry Forum, 2015
- 11 Blackfin Low Power Imaging Platform (BLIP). Analog Devices, Inc., 2014.

著者について

Ian Beavers [Ian.Beavers@analog.com] は、アナログ・デバイセズ（ノースカロライナ州グリーンズボロ）のオートメーション/エネルギー/センサー・チームのプロダクト・エンジニアリング・マネージャです。1999年、アナログ・デバイセズ入社。半導体業界での経験は19年以上。ノースカロライナ州立大学で電気工学の学士号を、グリーンズボロのノースカロライナ大学でM.B.A.を取得。

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

*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 愛知県名古屋市西区牛島町6-1 名古屋ルーセントタワー40F

©2017 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。

www.analog.com/jp

TA15307-0-12/16



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™