

Technical White Paper

リニア 3D ホール・エフェクト位置センサでシステム性能を向上



Manny Soltero, Gloria Kim

概要

インダストリー 4.0 は成長と進化を続けており、従来の製造機器や産業用機器は、より高度なオートメーションへの市場の要求が高まっています。システム・レベルの精度と信頼性を保証するために、これらのアプリケーションの多くは絶対位置測定を必要とします。

特定のアプリケーションに適した位置測定テクノロジーを選択する際には、さまざまな要因を考慮する必要があります。特に、測定の精度、物体の速度、電力の要件、較正の必要性、さまざまな設定をサポートするフレキシビリティ、そして信頼性です。このホワイト・ペーパーは、このようなシステム・レベルの設計上の課題と検討事項を取り上げ、それらをリニア 3D ホール・エフェクト位置センサの高い性能によって解決する方法を説明します。

目次

1 高速での高精度位置検出を実現.....	2
2 消費電力の最適化.....	4
3 フレキシビリティの向上を実現.....	5
4 信頼性の向上.....	7
5 まとめ.....	9
6 その他の資料.....	9

図の一覧

図 1-1. 2 つのリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用したリニア・ムーバーの概念実装.....	2
図 1-2. 擬似同時サンプリングの XZX パターン例.....	2
図 2-1. 従来のドアヒンジ・アプリケーションにおける角度検出の例.....	4
図 3-1. ハンドヘルド・ジンバル・モーターで 3D リニアを使用した軸外角度測定.....	5
図 3-2. ノブまたはダイヤル・アプリケーションでリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用した同一平面外角度測定の例.....	6
図 3-3. ゲインおよびオフセット補正の XY 例.....	7
図 4-1. TMAG5170 を使用したロボット・アームの例.....	7
図 4-2. TMAG5170 デジタル・インターフェイス.....	8

表の一覧

表 2-1. TMAG5170 電力モード.....	4
表 4-1. TMAG5170 連続的診断およびユーザー起動診断.....	8

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 高速での高精度位置検出を実現

できるだけ高い精度を達成するには、多くの場合、システムを低速で動作させる必要があります。その結果、システムの性能が低下します。高速、リアルタイム制御を必要とするアプリケーション、すなわち高速で高精度の測定を必要とするアプリケーションの場合、システム性能の低下は許容できません。これらの要件を持つアプリケーションの 1 つは、リニア・ムーバーとも呼ばれるモータ搬送システムです。リニア・ムーバーは、各ムーバーを個別に位置決めできるようにする組み込みマイクロコントローラ (MCU) を備えたスマート・トラック・システムで構成されます。このシステム構成には、高い搬送速度、正確な位置決め、ライン上での製品の前後移動による製造効率向上など、オートメーション制御において多くのメリットがあります。

リニア・ムーバーは、センサ・アレイを使用して、ムーバーに取り付けられた磁石の絶対位置を追跡します。図 1-1 に示すように、センサは X 軸方向に一定間隔に配置されています。隣接するリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用して、磁界の X 成分および Z 成分から角度を計算することにより、ムーバーの絶対位置が決定されます。

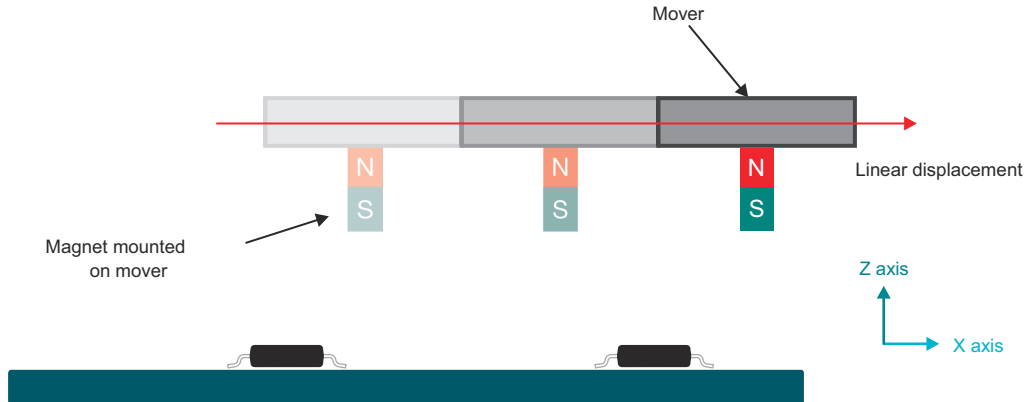


図 1-1. 2 つのリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用したリニア・ムーバーの概念実装

精度と高速性が求められるリニア・ムーバー・システムでは、高性能のリニア 3D ホール・エフェクト位置センサにより誤差を低減できます。内部要因としてのこれらの誤差の発生源は、感度、オフセット、直線性、温度変化によるノイズ、各軸に結合する入力換算磁気ノイズなどです。外部から発生する誤差には、多くの要因があります。機械的振動、磁石とセンサの間の意図しない空間的変動および公差、高速に変化する磁界、他軸角度測定などです。

高性能のリニア 3D ホール・エフェクト位置センサの重要な要素は、オンボードの角度 CORDIC (座標回転デジタル・コンピュータ) 計算機能で、2 次元空間で反復的な三角法近似を実行して角度と振幅の両方を計算し、0.25 度の分解能を実現します。この計算をデバイス上で実行すると、磁気情報を後処理する必要がなくなります。

単軸測定、ゲイン調整、フィルタリング、データ変換など、個別の内部信号パスを持たないリニア 3D ホール・エフェクト位置センサでは、高速に変化する磁界が問題となります。誤差を低減するために、3D ホール・エフェクト位置センサは、単一のデータ・コンバータと擬似同時サンプリングと呼ばれる機能を使って、最適なソリューションを実現します。

図 1-2 は、Z と X_1' のサンプリングが同時に行われる理想的な状況を示しています。しかし、磁界が変化していること、および測定を行う信号パスが単一であることにより、これは不可能です。擬似同時サンプリングでは、 X_1' の直前と直後の X 成分 (それぞれ X_1 と X_2 と表示) の平均値を、Z に対応する X 軸の値として使用します。磁界の変化が比較的短い期間に対して線形であると仮定すれば、この結果は、X 軸と Z 軸を同時にサンプリングした値に近似しています。

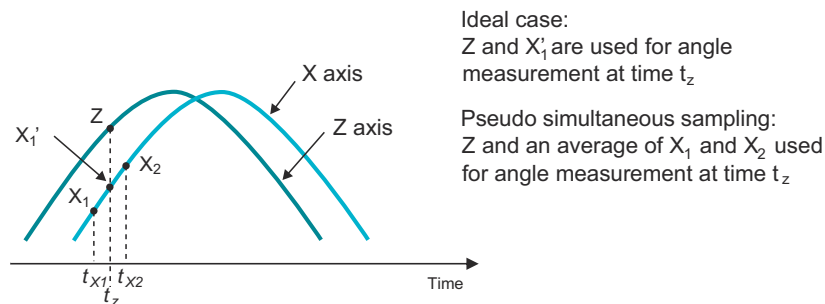


図 1-2. 擬似同時サンプリングの XZX パターン例

リニア 3D ホール・エフェクト位置センサは、通常、パッケージと同一面内および垂直方向の磁界を検出できるセンサ・テクノロジーを搭載しています。これらは 2 つの別のセンサであるため、それぞれの磁気ノイズは異なります。したがって、各軸のサンプルの平均をとってノイズフロアを均等化すれば好都合です。最大 32 個のサンプルを平均できるリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用すると、ノイズ・フロアを大幅に低減できます。

TMAG5170 のような高速で高精度の測定を実施できる高精度 3D ホール・エフェクト位置センサは、このアプリケーションで非常に役に立ちます。TMAG5170 は、最大フルスケール感度誤差 $\pm 2.6\%$ であり、(軸ごとの) 感度ミスマッチ誤差が小さく、温度ドリフト係数も小さいので、非常に高い精度を実現しています。このように精度が高いため、システム・レベルの較正が不要になり、総システム・コストを低減できます。さらに、TMAG5170 は最大 20kSPS のサンプル・レートを実現しており、多くのリニア動作アプリケーションに十分な高い速度になっています。サンプル・レートの影響の詳細については、『[Angle Measurement with Multi-Axis Hall-Effect Sensors](#)』(英語) アプリケーション・レポートを参照してください。

2 消費電力の最適化

十分な測定精度と速度を保ちながら、消費電力をできる限り抑えることは、移動や位置を監視するシステムには重要です。これは、磁気センサの消費電力がシステムの合計電力の大部分を占める可能性のある、バッテリー駆動または低消費電力のシステムにとって不可欠です。この例の 1 つは、4 ~ 20mA ループを通じて、プログラマブル・ロジック・コントローラと通信する、工場の現場向けリモート・モニタです。

その他のバッテリー駆動または低消費電力アプリケーションの例として、ビル・セキュリティ・システムやホーム・セキュリティ・システムで使用されているドア・センサや窓センサがあります。角度検出機能を搭載したドア・センサは、開閉イベントを検出し、ドアがどれだけ開いたかを測定することができます。この機能は、リング磁石と、従来のドアヒンジに組み込まれたリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用して実装できます (図 2-1 を参照)。低消費電力アプリケーションの場合、リニア 3D ホール・エフェクト位置センサは、5Hz 以下の低い周波数で動作する低消費電力のデューティ・サイクル・モードで使用する必要があります。

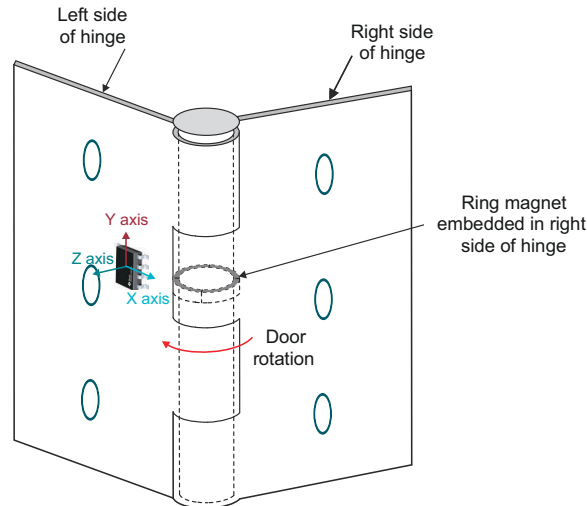


図 2-1. 従来のドアヒンジ・アプリケーションにおける角度検出の例

このアプリケーションでリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用する利点の 1 つは、2 軸だけの感度で角度を監視し、3 番目の軸を使用して、悪意をもってセンサを騙そうとする磁界を検出できることです。たとえば、センサに磁石を置き、システムをだましてドアがまだ閉まっていると錯覚させるなどです。

TMAG5170 は、システムの消費電力を最適化するためのさまざまな電力オプション (表 2-1 を参照) を備えています。アプリケーションの要求に応じて、センサをフル・アクティブ変換、スタンバイ、デューティ・サイクル、スリープ、またはディープ・スリープに設定できます。

表 2-1. TMAG5170 電力モード

電力モード	動作
アクティブ変換	継続的なデータ・ストリームを生成します。磁界のフル分析または処理に使用します。消費電流の代表値は、数 mA 程度 (低い 1 桁の範囲) です。
スタンバイ	デバイスは低消費電力状態であり、MCU から指示があれば測定を開始します。消費電流: 1mA 未満
デューティ・サイクル	デバイスはスリープ・モードに移行し、指定された間隔でウェークアップして測定を行います。消費電流は 1Hz で 1.3µA です。
スリープ	デューティ・サイクル・モードと同様ですが、デバイスは自動的に測定を開始するのではなく、MCU からの指示を待って測定を行います。
ディープ・スリープ	デバイスは実質的にパワーダウンしており、消費電流は 5nA です。

3 フレキシビリティの向上を実現

ホール・エフェクト・センサを使用した設計で最も重要な唯一の設計上の検討事項は、磁石に対するセンサの配置です。センサの配置にフレキシビリティがないと、最終製品のフォーム・ファクタが望ましくないものになる可能性があります。新規設計のさまざまな機械的側面は、多くの場合、設計プロセスの初期段階では十分に定義されていません。したがって、リニア 3D ホール・エフェクト位置センサは、選択可能な磁気感度範囲、ゲインおよびオフセットの補正、可変な更新レート、温度補償など、設定を変更できる機能を備えている必要があります。TMAG5170 はこのような機能を提供します。このデバイスは汎用性が高いため、あらゆる設計フェーズで構成変更が可能で、さまざまなアプリケーションに適しています。

一般に、温度が上昇すると、磁石の残留磁気すなわち磁束密度を示す値は減少します。さまざまな種類の磁石（ネオジム鉄ボロンやフェライト磁石など）を使用したシステムの性能を向上させるために、温度補償機能を備えたリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用すると、より高いフレキシビリティが得られます。TMAG5170 は、オンボードで設定可能な温度補償機能を搭載しており、磁石のみ、またはセンサのみが温度変化にさらされる場合はオフにすることもできます。

ジンバル・モーターは、特定の感度範囲やその他のパラメータに合わせた構成変更を必要とするアプリケーションの例です。ジンバル・モーターは、MCU に角度測定情報を提供する、ハンドヘルド・カメラ・スタビライザやドローンで使用されています。これらのモーターは、動きが発生したときにモーターの位置を常に調整することで、映像を安定させます。正確かつ高精度に角度を測定できる、軸上または軸外に配置されたセンサ（図 3-1 を参照）を使用すると、磁石とセンサの配置の柔軟性を持たせることができます。

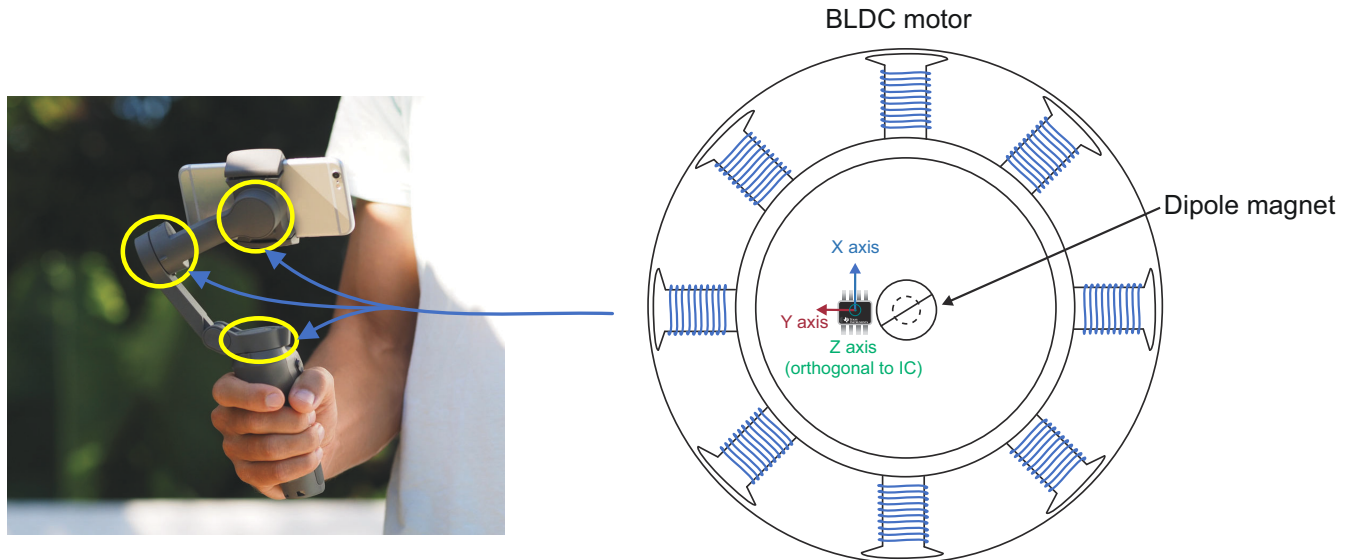


図 3-1. ハンドヘルド・ジンバル・モーターで 3D リニアを使用した軸外角度測定

家電製品、試験および測定機器、パーソナル・エレクトロニクス（図 3-2 を参照）のヒューマン・インターフェイスおよび制御では、ダイヤルが回るたびに磁界を高精度で測定できるリニア 3D ホール・エフェクト位置センサのメリットを活用できます。磁界情報を使って、いずれか 2 つの次元 (XY、YZ、または ZX) 間の角度位置を計算します。この図では TMAG5170 のセンサ同一平面外 (アウトオブプレーン) の構成でダイヤルが実装されていますが、図に示す 3 つの方法のどれでも実施可能であり、柔軟性がさらに高くなります。X および Y 成分の大きな変化を監視してプッシュ検出を実装できるほか、3D 感度を使って理想的な構成からのずれを検出することができます (3 番目の未使用 Z 軸を監視)。これにより、ダイヤルの磨耗や破損に対する予知保全のアラートを実現できます。

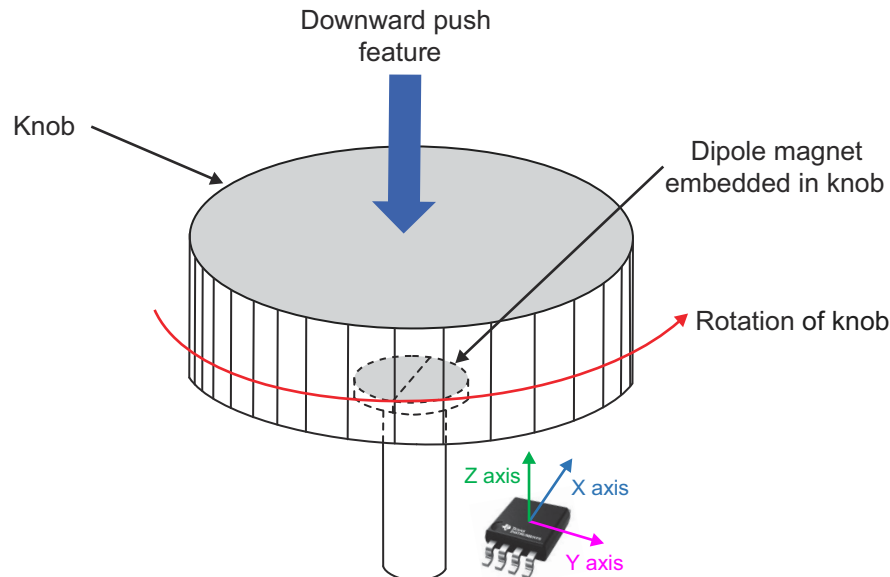
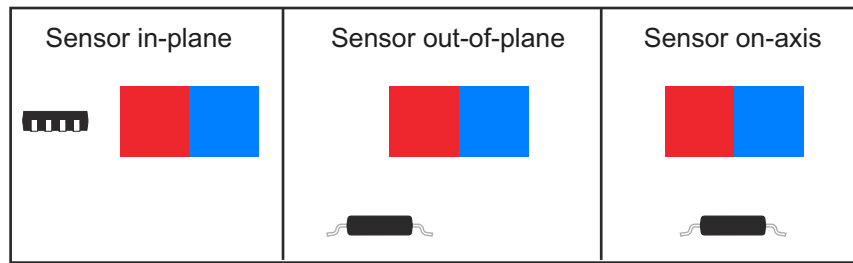


図 3-2. ノブまたはダイヤル・アプリケーションでリニア 3D ホール・エフェクト位置センサを使用した同一平面外角度測定
の例

回転シャフトの角度測定を計算する際に、軸上での測定 (センサが回転磁石の直下または直上にある) であれば、等価な大きさの磁界ベクトルが得られるので、最も正確な磁界測定が可能になります。しかし、図 3-2 に示すヒューマン・インターフェースとコントロール・ノブの場合、シャフトがセンサの配置を妨げているため、軸上の実装は不可能です。X および Y 成分を監視することで、磁界は正弦関数と余弦関数で表現され、アークタンジェント関数を使用すればそれらの間の角度を計算できます。

図 3-3 に、ダイヤルのように一定速度で回転する磁石により生成される磁界を示します。 B_x は X 方向の磁界、 B_y は Y 方向の磁界を表しています。これらの正弦波形および余弦波形 (B_x および B_y) は、軸上での測定結果を表します。同一平面外 (アウトオブプレーン) 実装 (先に 図 3-2 で示したものの) では、これとは異なる磁界強度が得られるため角度計算が複雑になります。この場合、1 つの磁界ベクトルの大きさが他の磁界より小さくなる可能性があります。図では、これを B_x に対して $B_{X(OFF-AXIS)}$ と示しています。2 つの適切な波形を得る代わりに、 $B_{X(OFF-AXIS)}$ 磁界では歪みが生じているので、角度計算誤差が発生します。

この他に、磁界測定で考慮する必要のあるもう 1 つの要素はオフセットです。測定値全体をオフセット (図 3-3 では 3 つの下向き矢印で表示) の分だけ減少させて、 $B_{X(OFF-AXIS)}$ の磁界ベクトルに一致する $B_{X(OFF-AXIS, OFFSET)}$ の磁界ベクトルを効果的に生成することにより、小さな磁界オフセットを補正し、正確な回転角度計算を行います。単純化のため、このオフセットは 1 つの測定軸のみにあるものとしています。実際には、すべての軸に固有のオフセットが存在し、補正が必要です。オフセットを除去した状態で、磁界ベクトルの 1 つを正規化して、他のベクトルと一致させる必要があります。この例では、 $B_{X(OFF-AXIS)}$ に合わせて B_y を正規化します ($B_{Y(NORMALIZED)}$ と表示)。この大きさは $B_{X(OFF-AXIS)}$ を B_y で割った値に等しくなります。このゲインおよびオフセット補正を行うように TMAG5170 を設定すると、最も正確な角度計算が保証されます。また、設計にとって最も便利な場所にセンサを配置できる柔軟性も備えています。

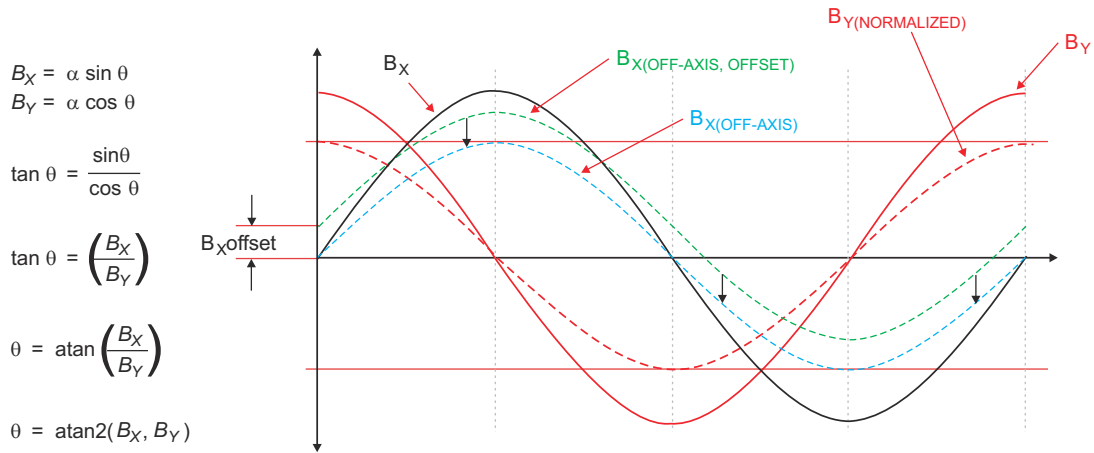


図 3-3. ゲインおよびオフセット補正の XY 例

4 信頼性の向上

ファクトリ・オートメーションは、常に、信頼性の高い製品を必要としています。Industry 4.0 の出現とともに、ゼロ・ダウンタイムを達成するために、あるいは、少なくともダウンタイムを可能な限り最小限に抑えるために、信頼性の高い診断スキームが不可欠になっています。ロボット・システムの大半では、多軸センサまたはロータリー・エンコーダがロボット・アーム内の各ジョイントの角度を決定 (図 4-1 参照) するか、または、自律型モバイル・ロボット内の各ホイールの角度を判定し、組み立てラインや工場現場で高精度の移動とナビゲーションを確保しています。ちりや湿気の影響を受けやすい光学エンコーディング・ソリューションと違って、磁気エンコーダの性能は過酷な環境の影響を受けません。

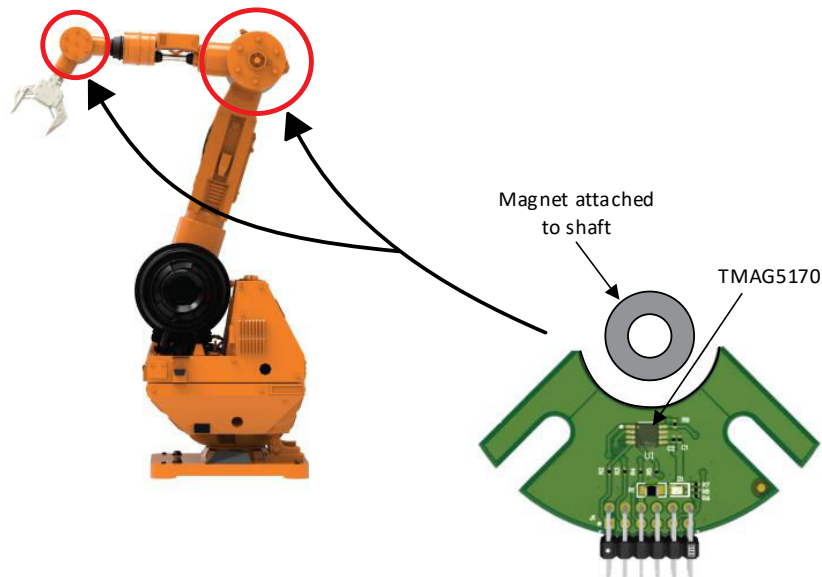


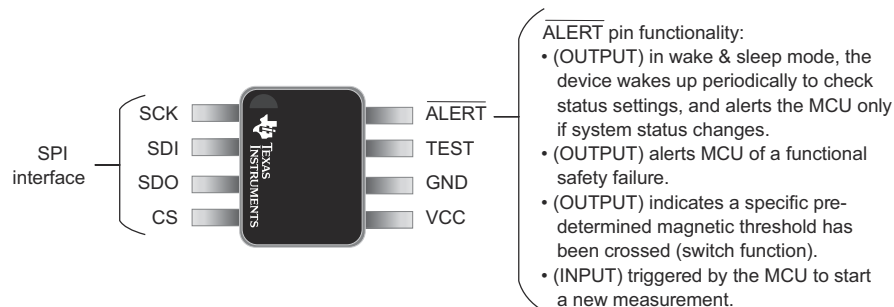
図 4-1. TMAG5170 を使用したロボット・アームの例

安全対策が組み込まれていて、動作中に発生する可能性のある問題をユーザーが診断できるようにするセンサは、ファクトリ・オートメーション・システムに不可欠なものです。表 4-1 に、TMAG5170 が提供するデバイス・レベルおよびシステム・レベルの診断機能を示します。

表 4-1. TMAG5170 連続的診断およびユーザー起動診断

デバイス・レベルの診断		
診断	機能	メリット
信頼性の高い通信チェック	巡回冗長性検査 (CRC) 通信: <ul style="list-style-type: none"> 受信した情報の CRC をチェック 予測される CRC フレーム情報をマイコンに組み込んでチェック 	ノイズ注入とデータ破損を低減するためのインターフェイス・フィルタが不要の通信ソリューションを提供
内部メモリおよびレジスタのチェック	<ul style="list-style-type: none"> 電源投入時、変換開始時、およびセンサ構成時の CRC MCU は構成レジスタの値を定期的に読み取って、精度を確認可能 	センサ信号パスをチェックして既知の正常な測定を確保
信号パス診断	信号パスの整合性をチェック	
軸ごとのホール・センサ診断	<ul style="list-style-type: none"> センサの精度と整合性をチェック オフセットと感度の検証により精度を確保 	
システム・レベルの診断		
診断	機能	メリット
ピンの導通	V _{CC} 、GND、シリアル・ペリフェラル・インターフェイス (SPI) バス・ピンなど各種ピン間の短絡をチェック	致命的な障害を引き起こす可能性のある危険を検出することにより、システム・レベルの長期的な信頼性を実現
磁界範囲外	設定時にスレッシュホールド値を設定して、磁界と比較	追加のホール・スイッチなしで、冗長磁界振幅チェックを実現
周囲温度範囲外	オンチップ温度センサでダイの温度を監視し、ユーザー指定のスレッシュホールドと比較	外部温度センサの追加コストを発生させずに、熱による障害イベントをシステムに警告
電源低電圧、過電圧、および内部 LDO (リニア・レギュレータ) 低電圧	電源電圧範囲外を MCU に警告	外付けのパワー・マネージメント・スーパーバイザ・デバイスが不要

SPI は TMAG5170 との信頼性の高い通信を提供します。このデバイスは、追加機能用のアラート入出力ピンを備えています (図 4-2 参照)。


図 4-2. TMAG5170 デジタル・インターフェイス

5 まとめ

このホワイト・ペーパーで説明したすべての機能は、1 つのセンサ **TMAG5170** で達成できます。このリニア 3D ホール・エフェクト位置センサは、高い精度と速度を備え、消費電力を最適化でき、場合によってはシステム・レベルのキャリブレーションを不要にし、さまざまなアプリケーションおよび要件に対応できる柔軟性を備えているほか、非常に条件の厳しい環境向けの診断機能も搭載しています。飽和、ヒステリシス、他軸感度が発生する他のセンシング技術と比較すると、高集積の **TMAG5170** は、さまざまな最終アプリケーションで電気機械システムの簡素化を可能にします。

6 その他の資料

- テキサス・インスツルメンツ、『[TTMAG5170 High-Precision 3D Linear Hall-Effect Sensor With SPI](#)』データシート (英語)
- テキサス・インスツルメンツ、『[TMAG5170 Evaluation Module](#)』(英語)
- テキサス・インスツルメンツ、『[TMAG5170 2D Angle Error Calculator](#)』(英語)
- テキサス・インスツルメンツ、『[What is a Hall-effect Sensor?](#)』(英語)
- TI プレジジョン・ラボ・ビデオ: (英語)
 - [Magnetic Sensors: Specifications of Three Dimensional \(3D\) Hall Effect Sensors](#) (英語)
 - [Magnetic Sensors: Angle Detection](#) (英語)

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated