

Design Guide: TIDA-060045

クラウド 3D ホールセンサを搭載した、高精度、低レイテンシでのリニア位置検出のリファレンス デザイン



概要

このリファレンス デザインでは、単一または複数の等距離に配置された 3D ホール エフェクト センサ **TMAG5170** と、10MHz の高速 SPI を使用した、N45 磁石ターゲットの高精度、低レイテンシ、リニア位置センシングについて解説します。Z 軸と X 軸の磁界強度と CRC データが単一の 32 ビット フレームで送信されるため、レイテンシを低く抑え、データ インテグリティを向上させることができます。3.3V I/O を備えたデジタル インターフェイスは、C2000™ マイコン LaunchPad との互換性があり、C2000™、Sitara、その他のマイコンで、テキサス・インスツルメンツの 3D ホール エフェクト センシング技術を評価できます。

参照情報

TIDA-060045	デザイン フォルダ
TMAG5170	プロダクト フォルダ
TMAG5170-CODE-EXAMPLE	ツール フォルダ
TI-MAGNETIC-SENSE-SIMULATOR	ツール フォルダ
LAUNCHXL-F280049C	ツール フォルダ



TI の TI E2E™ サポート・エキスパートにお問い合わせください。

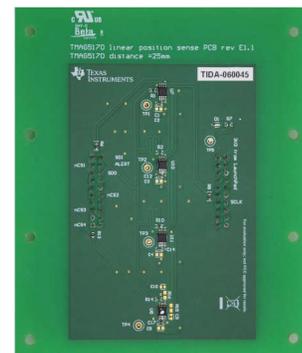
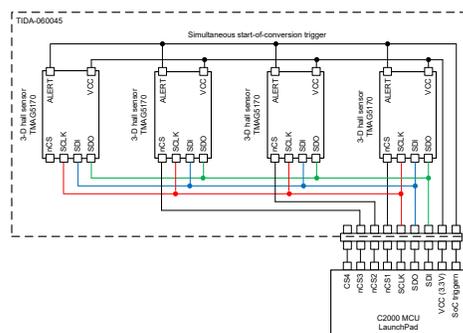
特長

- ADC と SPI インターフェイスを統合したシングルチップ 3D ホール エフェクト センサにより、BOM と PCB のサイズを低減しています。
- リニア位置の精度は通常、100mm の範囲にわたって $\pm 0.15\text{mm}$ であり、より高精度のリニア モーター搬送システムの実現に役立ちます。
- 測定範囲と精度の最適化に役立つ、構成可能な感度 $\pm 25\text{mT} \sim \pm 100\text{mT}$ と $\pm 75\text{mT} \sim \pm 300\text{mT}$ に対応する 3D ホール エフェクト センサ。
- 57.5us の低レイテンシで最大 8kHz のサンプルレートと、10MHz SPI により高速な位置制御が可能です。
- 専用の ALERT ピンにより、複数の 3D ホール エフェクト センサで X、Y、Z 軸の変換を同時に開始できます。
- 3D ホール エフェクト センサの診断機能は、システムレベルとデバイスレベルの両方の障害を検出および報告するのに役立ちます。

アプリケーション

- リニア モーター位置センサ
- サーボドライブ位置センサ
- 位置センサ
- 近接スイッチ

デザイン イメージ



1 システムの説明

ホール エフェクト センサを使用したリニア位置検出は、リニア サーボドライブ、ファクトリオートメーションの近接スイッチ、リニア モーター搬送システムなど、多くのアプリケーションで使用されています。アプリケーションに応じて、ホール エフェクト センサを搭載したセンサ ヘッドが複数の極を持つ静的な磁気ストライプの上を移動するか、または磁気ターゲットが静的なホール エフェクト センサ、あるいはホール エフェクト センサのアレイの上を移動します。

リニア モーター搬送システムを使用すると、1 次元または 2 次元で複数の磁気ムーバーを移動させることができ、速度は最大 10m/s、リニア位置の精度と再現性は最小 0.01mm が可能です。磁気センサの磁界の範囲は、ムーバーの検出磁石、およびムーバーの磁石と静止型マルチポジション センサのプリント基板 (PCB) との間の距離によって異なります。

図 1-1 に、等間隔に配置された高精度リニア 3D ホール エフェクト センサを使用したリニア位置検出の検出原理を示します。各 3D ホール エフェクト センサ間の距離は、システム固有であり、ムーバーの磁界強度と磁石の直径、エアギャップ、必要な位置精度によって決まります。通常、隣接する 3D ホール エフェクト センサ間の距離は、システム固有であり、その範囲は 10mm~50mm です。

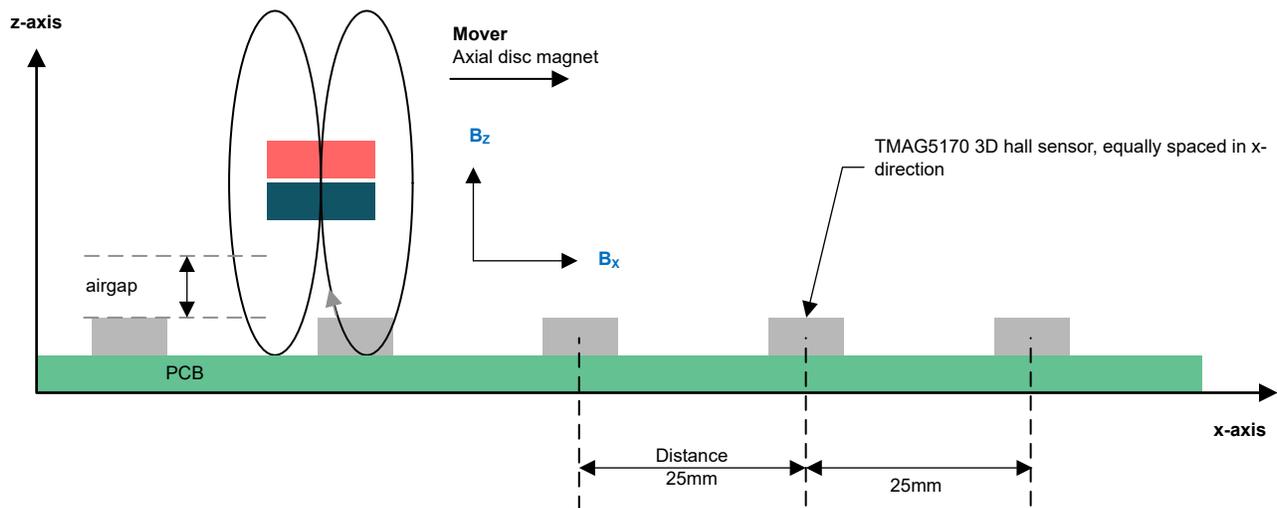


図 1-1. 複数の 3D ホール エフェクト センサを使用した PCB 断面図

このリファレンス デザインでは、変位 25mm の 4 つの 3D ホール エフェクト センサ **TMAG5170** を使用して、N45 磁石ターゲットの高精度で低レイテンシのリニア位置検出を実現する方法を紹介します。共通の変換開始信号により、4 つの 3D ホール エフェクト センサを同時に測定できます。**TMAG5170** で測定された Z 軸、X 軸、CRC データは、低レイテンシとデータ インテグリティの強化を目的として、10MHz SPI により単一の 32 ビット フレームで送信されます。データは SPI 経由で、対応する 3D ホール エフェクト センサのチップ セレクトを使用して連続的に読み出すか、MCU により 4 つのセンサすべてを並列に読み出すことができます。3.3V I/O を受け入れるデジタル インターフェイスは、C2000™ MCU LaunchPad との互換性があり、C2000™、Sitara、または他の MCU を使用してテキサス・インスツルメンツの 3D ホール エフェクト センシング技術を評価することができます。

1.1 主なシステム仕様

このリファレンス デザインの主な仕様を [表 1-1](#) に示します。このリファレンス デザインは、C2000 MCU LaunchPad に直接接続できます。

表 1-1. 主な設計仕様

パラメータ	値 (標準値)	備考
最大検出範囲	100mm	
位置精度	±0.15mm (±0.15%)	25°C で測定
3D ホール エフェクト センサ	TMAG5170A1	A1 は ±100mT (最大値)、ドロップイン バージョン A2 は ±300mT (最大値) をサポート
センサのフルスケール レンジ	±50mT (Z 軸)、±25mT (X 軸)	±25mT、±50mT、±100 mT をプログラム可能
センサ数	4	スケーラブル
センサの距離 (x 軸)	25mm	25mm 磁気部品用に選定
磁石とのセンサ距離 (y 軸)	1.52mm	可変
移動磁石	N45-1350	NdFeB 軸方向ディスク磁石: 1350mT、直径 25mm、高さ 3mm
センサのサンプル レート	4kHz	8kHz に対応
同時検出	あり	4 つの TMAG5170 をすべて同時にトリガ
ホスト MCU への SPI	最大 10MHz	
レイテンシ	57.5us	実効サンプリング ポイントから、SPI で読み出す準備ができた ADC 結果までの時間
ホスト MCU (1) へのインターフェイス	3.3V I/O	C2000 LaunchPad インターフェイスと互換。表 4-1 および 4-2 のピン割り当てを参照
電源電圧	3.3V	

2 システム概要

2.1 ブロック図

図 2-1 に、このリファレンス デザインのブロック図を示します。専用の変換開始ピン (ALERT) により、ホスト MCU からすべての 3D ホール効果センサの同時サンプリングが可能になり、電力段およびセグメント制御アルゴリズムについて、位置サンプリング時間を低ジッタで同期できます。

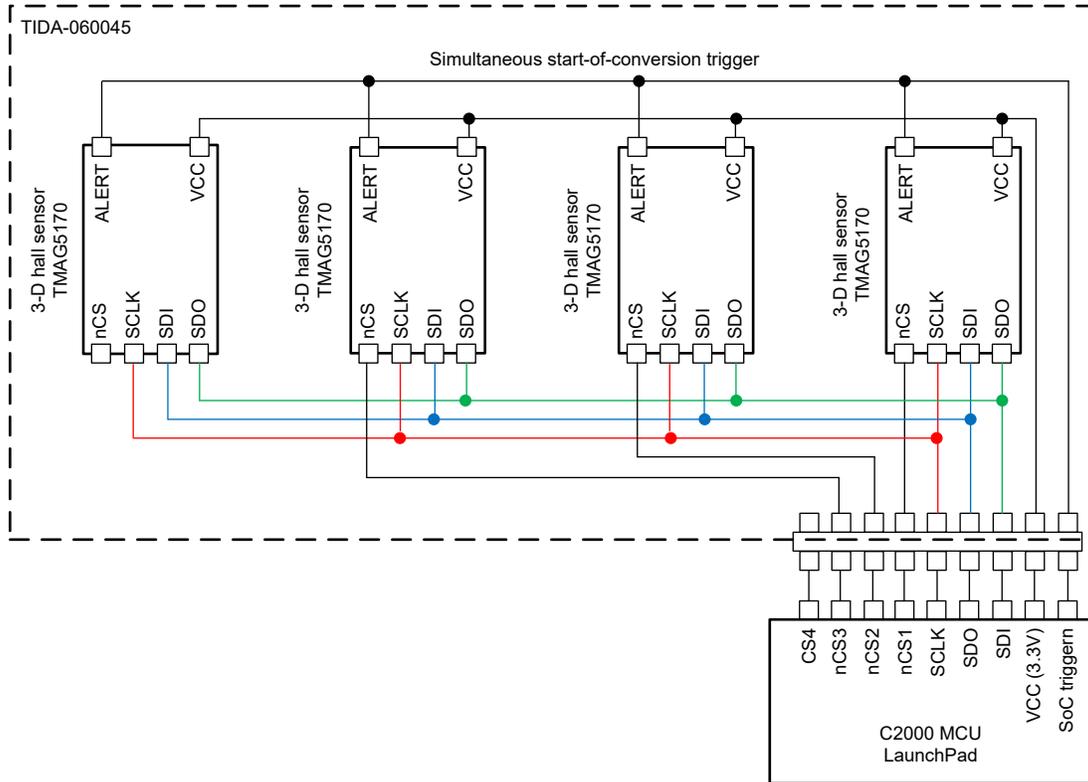


図 2-1. システム ブロック図

2.2 設計の考慮事項

リニア モーター搬送システムを採用すると、複数の磁気ムーバーが 1 次元または 2 次元を、最大 10m/s の速度、最小 0.01mm の線形位置精度と再現性で移動することが可能になります。磁気センサの磁界の範囲は、ムーバーの検出磁石、およびムーバーの磁石と静止型マルチポジション センサのプリント基板 (PCB) との間の距離によって異なります。通常、磁界の範囲は 50mT~300mT です。スペースの要件により、高集積の 3D ホール エフェクト センサシステム オンチップ (SoC) を搭載した小型パッケージが有利です。使用するセンサの動作周囲温度が 85°C を超えるような (たとえば 125°C)、過酷な条件下でも、正確なセンサ データを取得しながら高い電力密度を実現します。1 つのセグメント内で複数のムーバーの位置を同時に検出する必要があるため、同時サンプリングと低レイテンシの位置測定が重要です。低レイテンシのデジタル インターフェイスを備えた 3D ホール エフェクト センサは、アナログ出力の SoC よりもノイズに対する耐性が高いという利点があります。デジタル インターフェイスを備えた SoC の他の利点として、ダイの温度、ホール効果素子、電源電圧の診断などの SoC の診断および監視機能を統合して、システムの信頼性向上を実現できるということがあります。

Z 軸と X 軸の最大磁界強度は同一とは限らないので、各磁界軸について個別に範囲設定と最適化が可能な 3D ホール エフェクト センサを使用すれば、より高い位置分解能と精度の実現に役立ちます。表 2-1 に、リニア モーター搬送システムのシステム要件の例と 3D ホール エフェクト センサの仕様への影響を示します。

表 2-1. リニア モーター搬送システム用磁気センサの要件の例

パラメータ	数値の例	位置センサ SoC への影響
ムーバーの速度	最大 10m/s	センサのサンプリングレートに影響、閉ループ位置制御周波数は 4kHz 以上。
ムーバーの位置決め精度 / 繰り返し精度	最小 0.01mm	センサ分解能、精度、隣接するセンサ間の最小間隔に影響。
センサ テクノロジー	3D/2D ホール エフェクト センサ	3D ホール エフェクト センサにより 2 次元位置センシングが可能。
センサの磁界の範囲	50mT ... 300mT	線形入力範囲のフルスケール磁界強度
センサ分解能	通常 12 ビットの分解能	プログラマブルな磁界範囲調整機能を備えた SoC であれば、軸ごとに入力範囲を調整して分解能および精度の向上が可能。
センサ インターフェイス	アナログまたはシリアル デジタル	MCU へのインターフェイス
センサのレイテンシ	最小 100us	より高速な SPI、たとえば...10MHz SPI は、システムレイテンシの短縮に貢献します。
複数のムーバー位置の同時サンプリング	低ジッタの変換開始機能付きセンサ。	ハードウェア ピンまたは SPI コマンドによる変換開始信号入力を備えたセンサ。
センサ ソリューションの PCB 面積	できるだけ小さく。	デジタル インターフェイスを搭載した統合型 3D ホール エフェクト SoC によりシステムの小型化が可能。
動作温度範囲	小型フォーム ファクタと高い電力密度は、セグメント内の高温化につながります。	85°C を超える周囲温度範囲に対応する 3D ホール エフェクト SoC。
EMC 耐性	CRC 付き SPI インターフェイス	CRC 付きのデジタル インターフェイスにより、インパルス ノイズに対する耐性が向上。
システムの信頼性、予知保全、フォルト検出機能	3D ホール エフェクト センサ、電源電圧、ダイ温度の監視	たとえば、SPI を備え、診断機能を内蔵したセンサにより実現可能。

2.3 主な使用製品

TMAG5170 は、幅広い産業用およびパーソナル エレクトロニクス アプリケーション向けに設計された高精度 3D ホールエフェクト センサです。高いレベルの統合により、各種の位置センシング システムでフレキシビリティと精度を実現できます。このデバイスは X、Y、Z 軸に対して 3 つの独立したホール エフェクト センサを備えています。高精度シグナル チェーンと内蔵の 12 ビット ADC により、高精度で低ドリフトの磁界測定を実現すると同時に、最高 20ksps のサンプリングをサポートします。オンチップの温度センサのデータを利用して、システム レベルのドリフト補償を実施できます。沢山ある **TMAG5170** の特徴の一部を次に示します。

- X、Y、Z の磁気範囲を独立に選択可能:
 - TMAG5170A1: ± 25 、 ± 50 、 ± 100 mT
 - TMAG5170A2: ± 75 、 ± 150 、 ± 300 mT
- 専用の ALERT ピンにより、複数の 3D ホール エフェクト センサで X、Y、Z 軸の変換を同時に開始できます。
- 疑似同時サンプリング モード
- 10MHz のシリアル ペリフェラル インターフェイス (SPI)、巡回冗長性検査 (CRC) 機能付き
- 電源電圧範囲: 2.3V~5.5V
- 動作温度範囲: -40°C ~ $+150^{\circ}\text{C}$
- オーバーサンプリングにより、2、4、8、16、または 32 回の変換を平均化して出力ノイズを低減

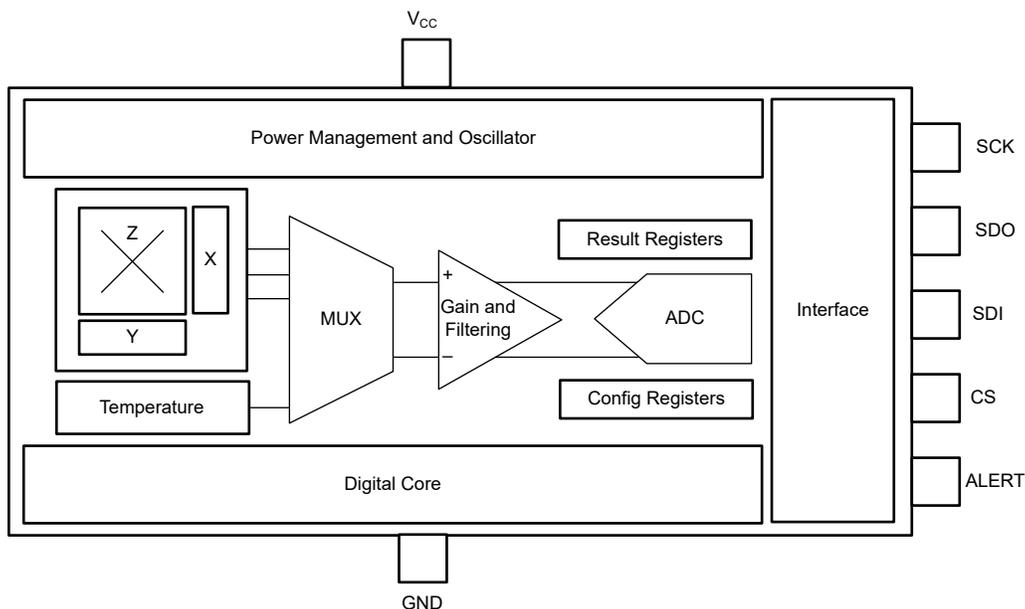


図 2-2. TMAG5170 の機能ブロック図

の直列ライン終端抵抗オプションがあります。SPI 信号整合性テストでは、GND テスト ポイント TP1~TP4 を追加しました。

SPI 信号レイアウトのガイドラインについては、第 5 章を参照してください。

TMAG5170 の磁界測定に影響を与えないように、最終的な PCB 上にテスト ポイント TP1 から TP5 を組み立てていません。緑の LED D1 を追加し、3.3V 電源が供給されていることを示します。

コネクタ J2-1 の 3.3V 入力電源 (許容誤差 +10%) は、4 つの **TMAG5170** すべてに配線されています。追加のテストおよび検証オプションのために、0Ω の抵抗 R4 を追加します。必要に応じて、RF ノイズ除去性能を高めるために R4 をフェライトビーズに交換するか、R4 を取り外して C2000 MCU Launch から 3.3V 電源を切断し、テスト ポイント TP5 経由でベンチ電源からの独立した 3.3V 電源を使用します。このリファレンス デザインは、C2000 MCU LaunchPad からの 3.3V 電源を使用しました。

3.2 ソフトウェア設計

このリファレンス デザインを検証するために、**TMAG5170** ヘッダー ファイル、**TMAG5170-CODE-EXAMPLE**、および C2000 MCU 用 C2000WARE ソフトウェア開発キットを使用し、TMS320F280049C LaunchPad でテキサス・インスツルメンツの社内テストソフトウェアを開発しました。

3.2.1 TMAG5170 SPI フレーム

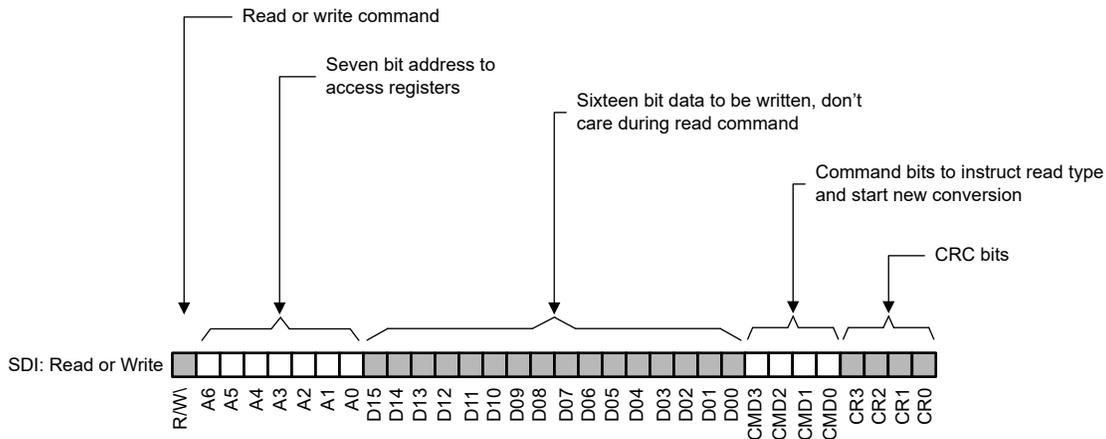
TMAG5170 は 4 線式 SPI をサポートしています。デバイスと外部マイコン間の主な通信は、全二重通信の SPI バスを經由します。外部マイコンは SPI コントローラとして動作し、コマンド リクエストを SDI ピンに送信し、デバイス応答を SDO ピンで受信します。**TMAG5170** デバイスは SPI のペリフェラル デバイスとして動作し、コマンド リクエストを受信して、SDO ラインを介して応答 (ステータスや測定値など) を外部マイコンに送信します。**TMAG5170** は、コントローラ デバイスとの通信のために、32 ビット固定のフレーム サイズをサポートしています。32 ビット フレームは、DATA_TYPE レジスタ ビットにより設定でき、通常のシングル レジスタ読み取り / 書き込みデータ パケット、または 2 チャンネルのデータを同時に読み取る特殊なパケットをサポートします。

シリアル クロック SCLK は、ホスト コントローラのクロック信号を表します。このクロックによってデータ転送速度が決まり、すべての送受信がこのクロックと同期して行われます。SDO ピンの出力データは SCK の立ち下がりエッジで遷移し、SDI ピンの入力データは SCLK の立ち上がりエッジでラッチされます。

nCS は SPI をアクティブにします。nCS 信号が High である限り、**TMAG5170** は SCLK 信号もシリアル データ入力 (SDI) も受け付けず、シリアル データ出力 (SDO) は高インピーダンスになります。適切な通信を維持するには、nCS をトグルせずに通信フレームの間 Low に保持する必要があります。SPI は、nCS が Low から High になるたびにディセーブルになります。

3.2.1.1 32 ビット フレームのシリアル データ

シリアル データ入力 (SDI) ラインは、**TMAG5170** レジスタの構成、新しい変換の開始、または読み取りコマンドの送信のためにホスト コントローラが使用します。nCS ピンが Low のとき、SDI ビットは SCLK の各立ち上がりエッジでラッチされます。SDI フレームについて [図 3-2](#) で説明しています。SDI ラインには 4 つのコマンド ビットがあり、次のフレームのステータス ビットを選択したり、新しい変換を開始したりできます。



CMD0	CMD0 = 0	No conversion start through command bits
	CMD0 = 1	Start of conversion at the CS going high
CMD1	CMD1 = 0	Display SET_COUNT [2:0] in STAT [2:0] bits at SDO next frame
	CMD1 = 1	Display DATA_TYPE [2:0] in STAT [2:0] bits at SDO next frame

- * CMD2 & CMD3 are reserved bits
- ** SET_COUNT register bits indicate the rolling count of the conversion data set. The counter is reset after 111b.
- *** DATA_TYPE register bits indicate the type of data being read through the SDO line

図 3-2. TMAG5170 32 ビット SDO フレーム

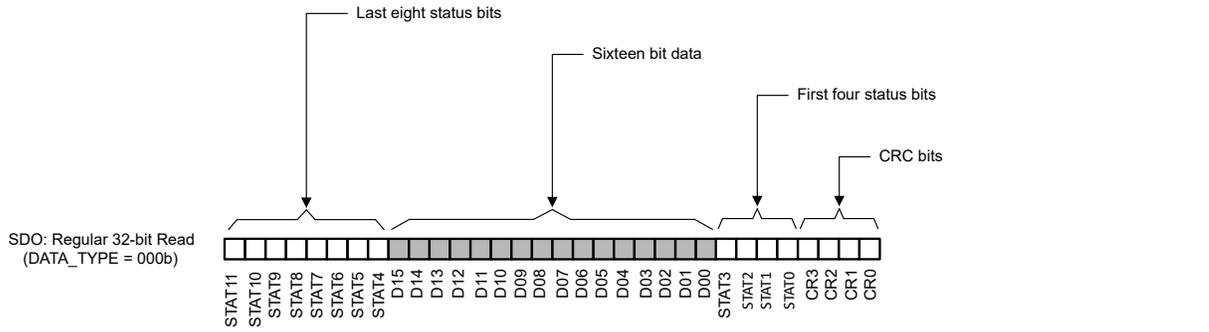
3.2.1.2 シリアル データ出力 32 ビット フレーム

シリアル データ出力 (SDO) ラインは、コントローラが **TMAG5170** からデータを読み取るために使用します。**TMAG5170** は、CS ピンが LOW のとき、SCK の立ち上がりエッジごとに、コマンド応答と ADC 変換データをシリアルにシフトアウトします。CS が HIGH のとき、このピンは高インピーダンス状態になります。DATA_TYPE ビットの設定に基づき、**TMAG5170** は次の 2 つの異なる SDO フレームをサポートします。

- 通常の 32 ビット SDO 読み取りフレーム
- 特別な 32 ビット SDO 読み取り

このリファレンス デザインでは、**TMAG5170** 構成に通常の 32 ビット SDO 読み取りフレームを使用します。この設計では、特別な 32 ビット SDO 読み取りフレームを使用して Z 軸と X 軸の磁界強度を 1 つのフレームで読み取り、最短のレイテンシを実現します。

DATA_TYPE = 000b の場合、図 3-3 に示すように、**TMAG5170** は 32 ビット SDO フレーム中に通常の 16 ビットレジスタの読み取りをサポートします。この読み取りモードでは、12 ビットのステータスビットが表示されます。ERROR_STAT ビットを除くすべてのステータスビットは、ステータスレジスタから直接、読み取られます。ERROR_STAT ビットは、デバイスにエラー ビットが設定されているかどうかを示します。

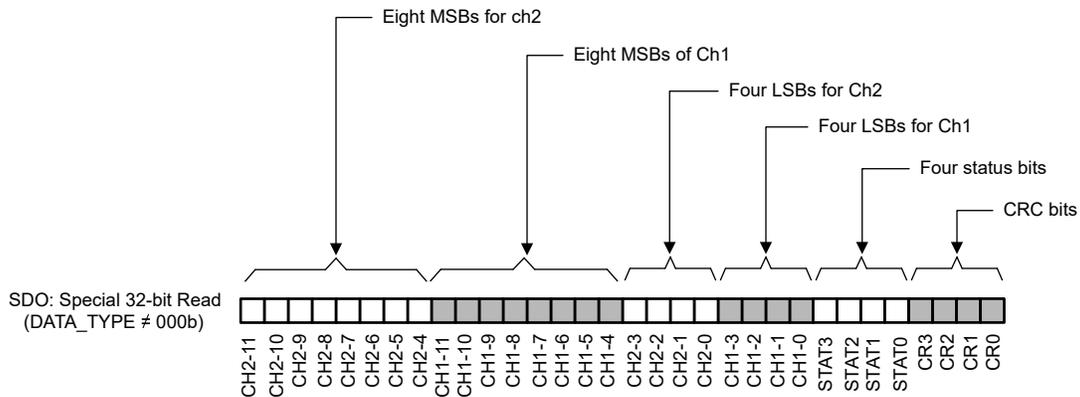


STAT11	STAT10	STAT9	STAT8	STAT7	STAT6	STAT5	STAT4	STAT3	STAT2	STAT1	STAT0
PREV_CRC_STAT	CFG_RESET	ALRT_STATUS1	ALRT_STATUS0	X	Y	Z	T	ERROR_STAT	Follows CMD1 instruction from previous frame		

- * PREV_CRC_STAT indicates if there is any CRC error in the immediate past frame
- ** ERROR_STAT indicates if there is any error bit flipped in the part
- *** STAT10 to STAT4 indicate select status bits from the CONV_STATUS and AFE_STATUS registers

図 3-3. TMAG5170 の通常の 32 ビット SDO フレーム

DATA_TYPE > 000b の場合、TMAG5170 は 2 チャンネルの同時データ読み取りに特別な 32 ビット SDO フレームをサポートします。各チャンネルのデータは 12 ビットに制限されています。この機能は、多軸測定を実行すると同時に、より高速なデータスループットを必要とするシステムに有用です。図 3-4 では、特別な 32 ビット SDO フレームの詳細な構造について説明します。デバイスが特別な 32 ビット読み取りに設定されている場合、このデバイスは連続する読み取りまたは書き込みサイクル中に、SDO ラインを介して 2 チャンネルのデータセットを配信し続けます。通常の読み取りサイクルに戻すには、DATA_TYPE ビットをリセットする必要があります。このモードでは、4 つのステータスビットのみが送信されます。ERROR_STAT ビットを除くすべてのステータスビットは、ステータスレジスタから直接、読み取られます。ERROR_STAT ビットは、デバイスにエラービットが設定されているかどうかを示します。ステータスビット STAT[2:0] は、前のフレームの CMD1 値に基づいて変更できます。



STAT3	STAT2	STAT1	STAT0
ERROR_STAT	Follows CMD1 instruction from previous fram		

- * ERROR_STAT indicates if there is any error bit set in the device

図 3-4. TMAG5170 の特別な 32 ビット SDO フレーム

CRC など、TMAG5170 SPI の詳細については、TMAG5170 データシートをご覧ください。

3.2.2 TMAG5170 のレジスタ構成

TMS320F280049C MCU の SPI は、10MHz SPI クロックと、32 ビットフレームをサポートするための連続する 2 つの 16 ビット SPI データ転送を備えたホストとして設定されています。シリアル クロックは、SPI 転送の前後で Low レベルに

設定されています。SPI 受信データ (MISO) は SPI クロックの立ち上がりエッジ (SCLK) でラッチされ、送信データ (MOSI) はクロックの立ち下がりエッジで送信されます。

スタートアップ後に、TMAG5170 レジスタは通常の 32 ビット SDO 読み取りフレームを使用して設定されました。このリファレンス デザインで使用する N45 磁石を使用したデフォルト構成を、表 3-1 に示します。

表 3-1. TMAG5170 のレジスタ構成

レジスタ オフセット [HEX]	値 [HEX]	備考
0h	0130h	平均化なし、検出磁気温度係数 0.12%/deg C (NdBFe)、アクティブトリガ モード
1h	0345h	XZX チャンネル イネーブル (疑似同時サンプリング)、Z 範囲 ±50mT、X 範囲 ±50mT
2h	0400h	nALERT パルス (立ち下がりエッジ) で変換開始
3h	0000h	デフォルト
4h	7D83h	デフォルト
5h	7D83h	デフォルト
6h	7D83h	デフォルト
7h	6732h	デフォルト
8h	0040h	読み取り専用
9h	0058h	読み取り専用
Ah	0000h	読み取り専用
Bh	7FD0h	読み取り専用
Ch	4500h	読み取り専用
Dh	0000h	読み取り専用
Eh	0300h	読み取り専用
Fh	0040h	SPI 通信で CRC がイネーブル (デフォルト)
10h	0000h	Reset OSC カウンタ (デフォルト)
11h	0000h	デフォルト
12h	0000h	デフォルト
13h	0000h	読み取り専用
14h	0000h	読み取り専用

TMAG5170 レジスタの構成が完了した後、各 TMAG5170 に対する書き込みコマンドで、特別な 32 ビット SDO フレームを設定します。このモードでは、Z 軸と X 軸の磁界強度、および CRC が単一の 32 ビット フレームで送信されるため、全体のレイテンシが短縮されます。

表 3-2. 特別な 32 ビット SDO フレームのための TMAG5170 レジスタ設定

レジスタ オフセット [HEX]	値 [HEX]	備考
2h	0480h	nALERT パルス (立ち下がりエッジ) で変換開始。特別な 32 ビット SDO フレームをイネーブル (ビット 8 を設定)

CORDIC を使用した絶対角度測定では、正確な角度を計算するために Z 軸と X 軸のセンサ データが必要です。単一の AD コンバータで、同じ信号 チェーンを使用して異なる時間に収集された磁界データは、角度計算に誤差を生じさせます。TMAG5170 は、疑似同時サンプリング データ収集モードを備えているため、この誤差を除去できます。図 3-5 に、XZX データを収集し、デュアル X サンプルから X データの平均を計算するための XZX チャンネル モード (疑似同時サンプリング モード) の例を示します。この場合、X 軸の信号周波数が ADC サンプル レートよりも大幅に低いと仮定し、X および Z センサの平均データのタイムスタンプは同じになります。

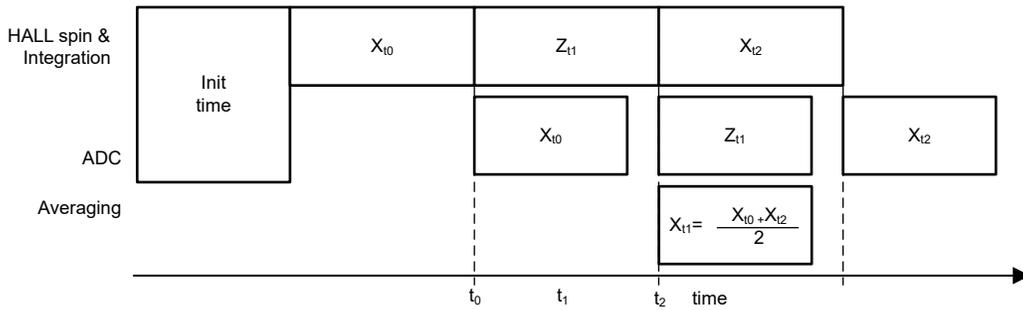


図 3-5. TMAG5170 疑似同時サンプル モード

3.2.3 SPI と変換開始タイミング

Z 軸と X 軸の同時変換をトリガし、4kHz のサンプルレートで 4 つすべての 3D ホール エフェクト センサのデータを読み取るための SPI および nALERT 信号のタイミングを、図 3-6 に示します。

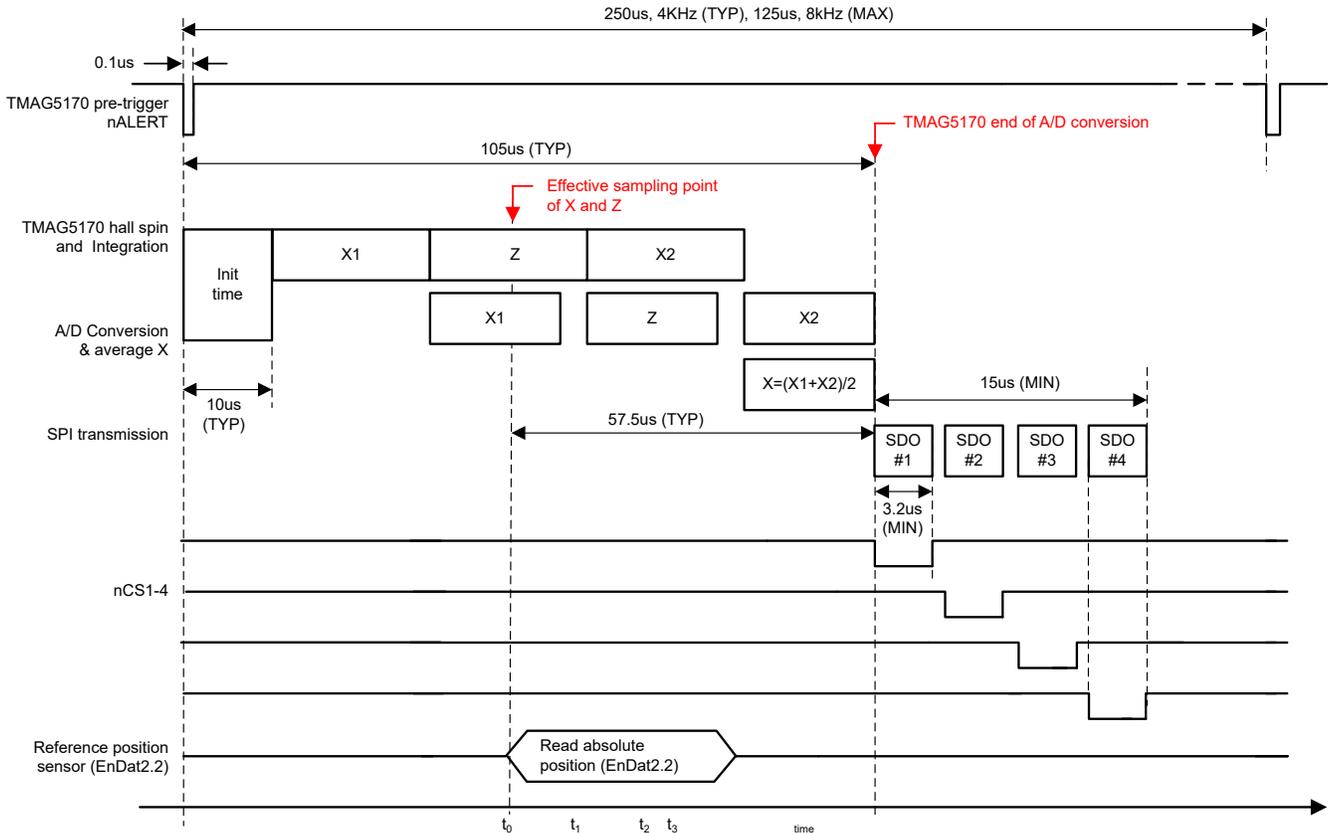


図 3-6. TMAG5170 の同時サンプリングと SPI タイミング

C2000 MCU などのホスト MCU は、4kHz のサンプルレートで 100ns 幅のアクティブ Low nAlert トリガ パルスを生成します。4 個の TMAG5170 はそれぞれ、ホール エフェクト センサの回転と統合を開始します。TMAG5170 は、シーケンス XZX をサンプリングおよび変換し、X 値の平均を計算します。A/D 変換が完了すると、C2000 MCU は個別のアクティブ Low チップ セレクト信号を使用して、4 つの TMAG5170 を順に読み出します。平均 X 軸および Z 軸データの実効サンプリングは、アクティブ Low のアラートトリガ パルスのほぼ 47.5μs 後に行われます。実効サンプルポイントから SPI 転送が開始されるまでのレイテンシは、57.5μs 程度であり、4 チャンルのシーケンシャル SPI 転送は 15μs 後に完了します。したがって、SPI 転送を含む合計信号レイテンシは 72.5μs 程度となります。

リファレンスとして、10um の分解能を持つ Heidenhain LC415 EnDat2.2 リニア位置エンコーダを使用しました。C2000 MCU は、4 個の TMAG5170 の Z 軸と X 軸をサンプリングすると同時に、LC415 EnDat2.2 エンコーダの位置を読み取ります。

3.2.4 線形位置の計算

等間隔で配置された 4 個の TMAG5170 の線形位置は、下に示す 図 3-7 のフローチャートに従い、4kHz レートのサンプルレートで各割り込みサービス ルーチンにより計算されます。

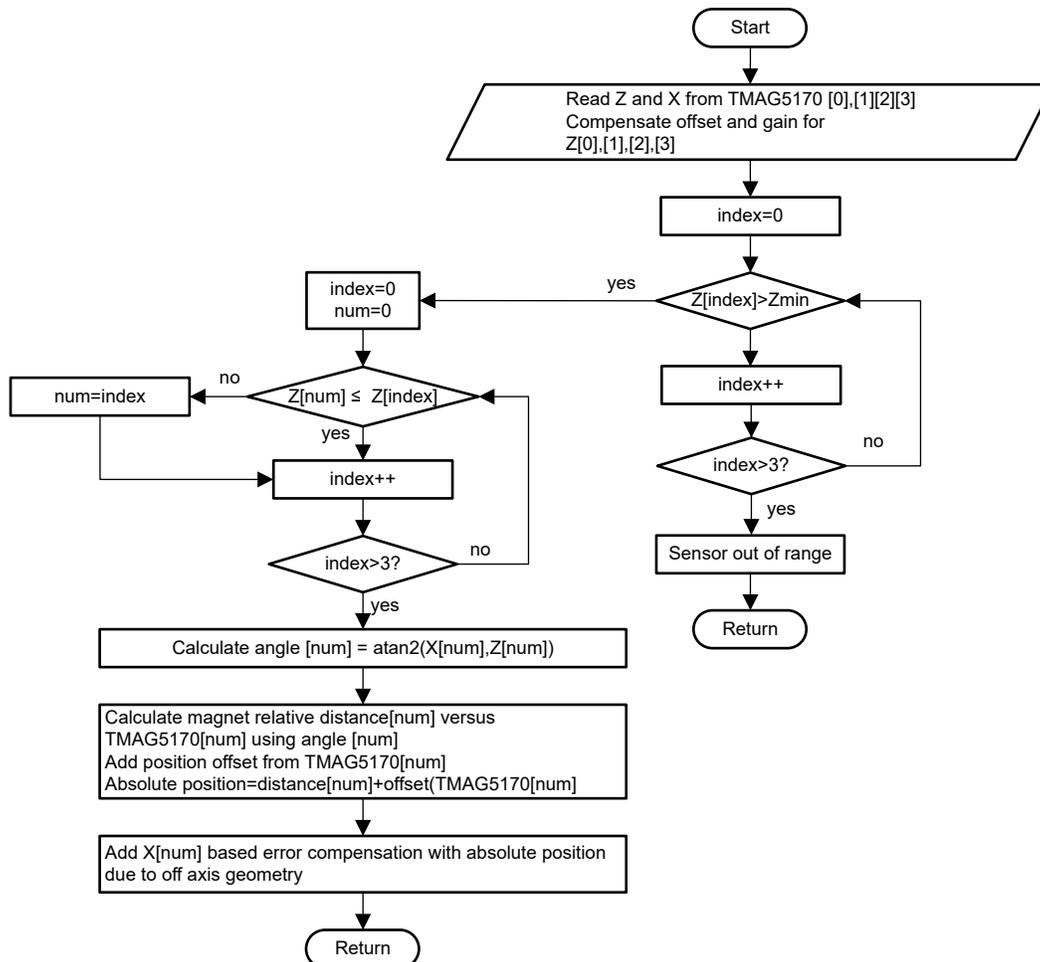


図 3-7. 簡単な位置計算のフローチャート

4 個の TMAG5170 の Z 軸と X 軸のデータが読み取られます。Z 軸方向の大きさがどれも最小磁界強度を超えない場合、ムービング磁石は範囲外です。そうでない場合は、Z 軸で振幅が最大の TMAG5170 を特定します。ヒステリシスを使用して、隣接する 2 つの TMAG5170 の間の切り替えを回避できます。これは、検出磁石の位置が 2 つの隣接する TMAG5170 の間の中央にあるため、両方の TMAG5170 で同程度の Z 軸の磁界強度が測定される場合に発生します。

角度の計算は、Z 軸の磁界強度が最大の TMAG5170 についてのみ続行されます。

最初のステップでは、システム較正中に識別されたように、Z 軸のオフセットとゲインを補正します。次に、式 1 に従って、較正済みの Z 軸および X 軸の atan2 関数を使用して、対応する TMAG5170 のホール効果素子の X 位置に対する角度を計算します。

$$Angle_{deg}[num] = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot atan(Z[num], X[num]) \quad (1)$$

2 番目のステップでは、線形位置は式 2 に従って計算されます。TMAG5170 の番号に応じて、対応するリニア位置オフセットも追加されます。

$$LinPos_{cm}[num] = \frac{Angle_{deg}[num]}{90^\circ} \cdot 1.25cm + num \cdot 2.5cm + RefOffset_{cm} \quad (2)$$

3 番目のステップでは、システム キャリブレーション中に **式 3** に従って特定された補償係数により、X 軸の絶対振幅を使用して軸外測定による誤差を補償します。

$$LinPos_{cm}[num] = LinPos_{cm}[num] + abs(X[num] \cdot CompFactor) \cdot \frac{cm}{mT} \quad (3)$$

リファレンス デザインで線形位置を計算するために使用したソース コードを以下に示します。

```
//-----
// Angle calculation
//-----
// z_max_num
// 0: Out of range (Z-field too small)
// 3: TMAG5170[0] has highest Z-field
// 5: TMAG5170[1] has highest Z-field
// 7: TMAG5170[2] has highest Z-field
// 9: TMAG5170[3] has highest Z-field
//-----
void calcLinPos(int16_t zmax_num_index)
{
    float      tnom;
    float      tdenom;

    PositionRead.LinPosRef_cm = LC415LinPos_cm;           // Absolute linear position reference
    if (zmax_num_index==0)                               // Magnet is out of range
    {
        PositionRead.LinPos_cm = 0;                       // Measured absolute linear position
        PositionRead.LinPosError_cm = 0;                  // Measured position error
    }
    else
    {
        // Gain and offset compensated Z-axis
        tnom = TMAGS_ARRAY[(zmax_num_index-3)/2].Z_mT-
PositionCalc.OffsetZ_mT[(zmax_num_index-3)/2];
        tnom =
tnom*PositionCalc.GainComp[(zmax_num_index-3)/2];

        tdenom = TMAGS_ARRAY[(zmax_num_index-3)/2].X_mT; // X-axis
        PositionRead.Angle_deg = (180/3.1415)*atan2f(tdenom,tnom);
        PositionRead.LinPos_cm = PositionRead.Angle_deg/90*PositionCalc.DistanceTMAG5170_cm/2;
        PositionRead.LinPos_cm += PositionCalc.DistanceTMAG5170_cm * ((zmax_num_index-3)/2);
        PositionRead.LinPos_cm += -PositionCalc.RefOffset_cm;

        // Nonlinear position error compensation using X-field
        PositionRead.LinPos_cm += PositionCalc.PosXfieldComp * abs(TMAGS_ARRAY[(zmax_num_index-3)/
2].X_mT);
        // calculate position error versus reference
        PositionRead.LinPosError_cm = PositionRead.LinPos_cm - PositionRead.LinPosRef_cm;
    }
}
}
```

角度および線形位置計算のアルゴリズムの詳細については、アプリケーション レポート「[最大のシステム角度検出精度を達成する](#)」と「[線形位置アプリケーション用磁石の選択 \(Rev. A\)](#)」を参照してください。

4 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

4.1 ハードウェア

4.1.1 PCB の概要

PCB の上面図と底面図を以下に示します。

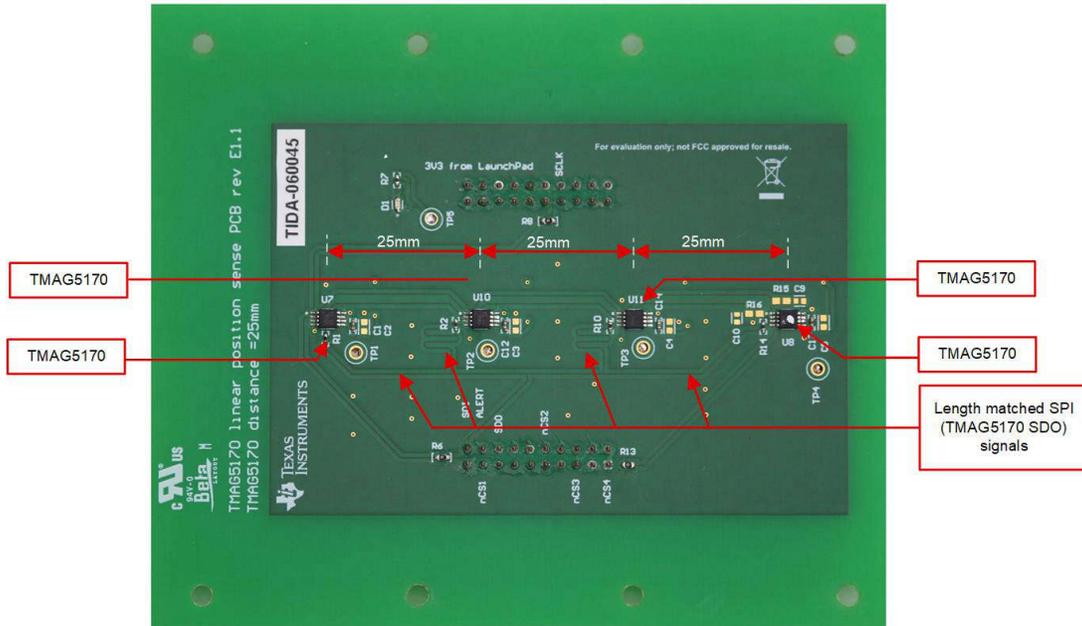


図 4-1. PCB の上面図

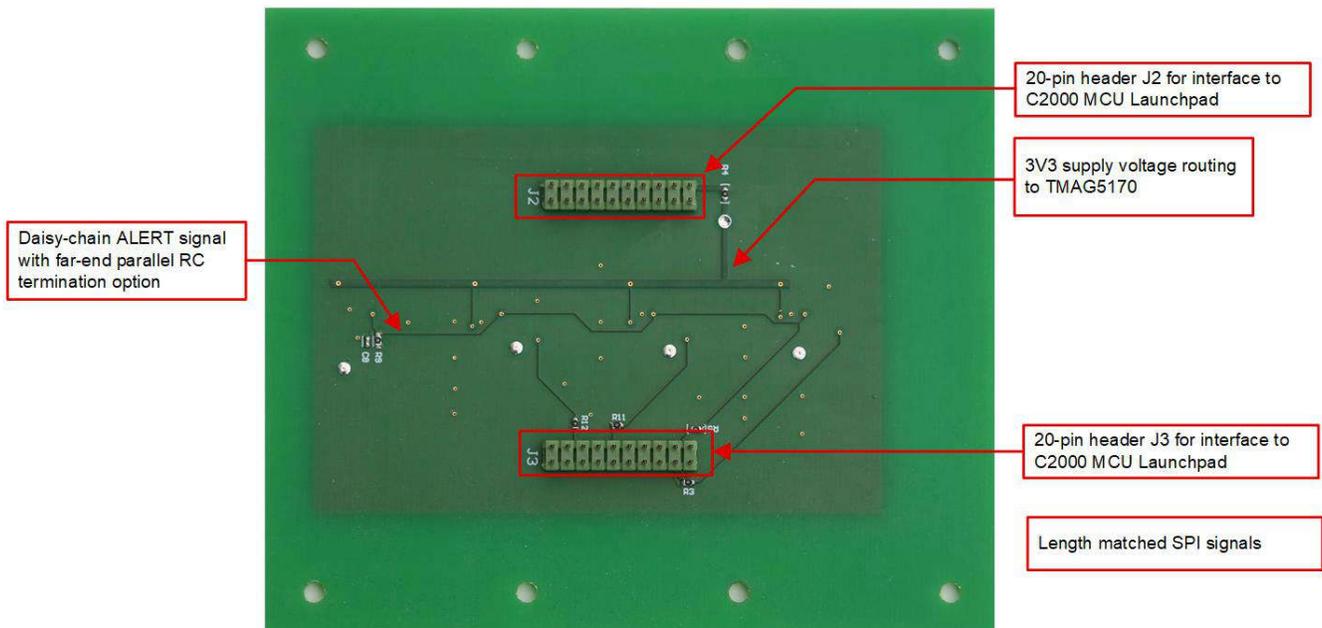


図 4-2. PCB の底面図

4.1.2 MCU インターフェイス コネクタ

TIDA-060045 のインターフェイス仕様は、テキサス・インスツルメンツのブースタパック プラグイン モジュール規格に準拠しています。ピンの割り当てを [表 4-1](#) と [表 4-2](#) に示します。

表 4-1. ヘッダ J2 のピンの割り当て

ピン	信号	I/O	ピン	信号	I/O
J2-1	3.3V 電源	入力	J2-2	NC	
J2-3	NC		J2-4	GND	GND
J2-5	NC		J2-6	NC	
J2-7	NC		J2-8	NC	
J2-9	NC		J2-10	NC	
J2-11	NC		J2-12	NC	
J2-13	SCLK	入力	J2-14	NC	
J2-15	NC		J2-16	NC	
J2-17	NC		J2-18	NC	
J2-19	NC		J2-20	NC	

表 4-2. ヘッダ J3 のピンの割り当て

ピン	信号	I/O	ピン	信号	I/O
J3-1	nCS4	入力	J3-2	NC	
J3-3	NC		J3-4	NC	
J3-5	nCS3	入力	J3-6	NC	
J3-7	NC		J3-8	NC	
J3-9	NC		J3-10	nCS2	入力
J3-11	NC		J3-12	NC	
J3-13	NC		J3-14	NC	
J3-15	NC		J3-16	SDO (MOSI)	入力
J3-17	nCS1	入力	J3-18	nALERT	入力
J3-19	GND	GND	J3-20	SDI (MISO)	出力

4.2 テスト構成

このリファレンス デザインを評価するために、以下のハードウェア機器を使用しました。

表 4-3. 前提条件

装置	備考
TIDA-060045	このリファレンス デザインの構成は次のとおりです。
LAUNCHXL-F280049C	C2000™ Piccolo™ マイコン向けの F280049C LaunchPad™ 開発キット
N45-1350	円柱型ディスク磁石、1350mT、直径 25mm、高さ 3mm
LAUNCHXL-F28379D	F28379D C2000™ Delfino™ リアルタイム マイコン向け LaunchPad™ 開発キット
TIDA-010026	EnDat2.2 アブソリュート エンコーダ向け、堅牢なインターフェイスのリファレンス デザイン
Heidenhain LC 415	EnDat2.2 アブソリュートリニア位置エンコーダ、高精度グレード ±5µm、分解能 0.010µm

[図 4-3](#) と [図 4-4](#) にテスト構成を示します。

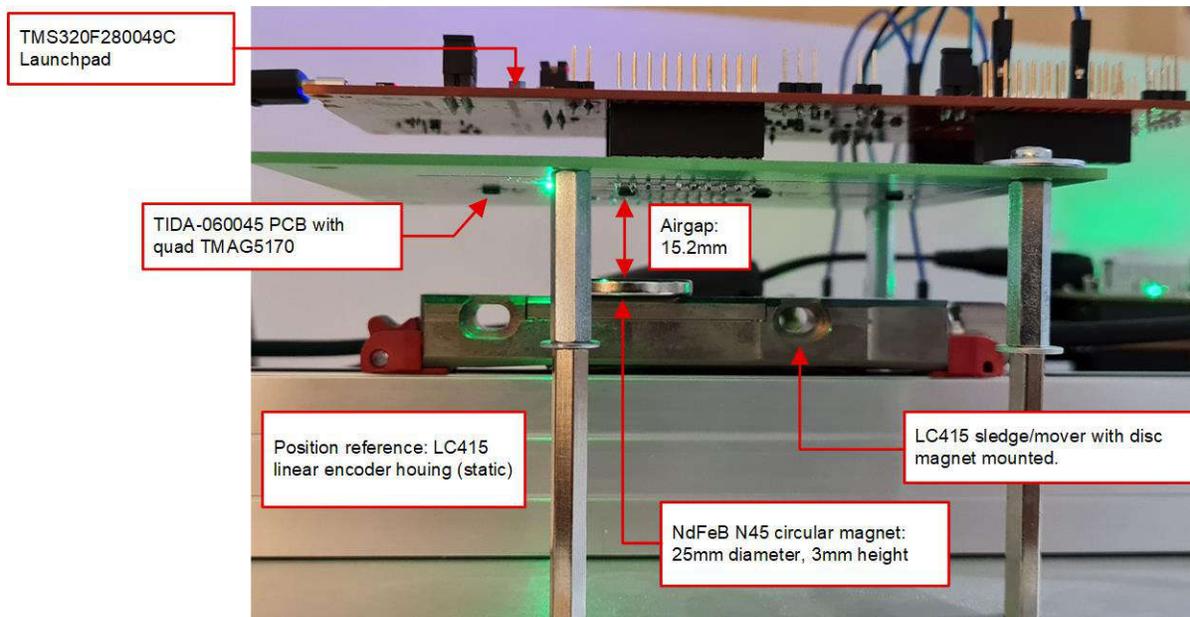


図 4-3. テスト構成の側面図

上の 図 4-3 はテスト構成の側面図です。EnDat2.2 を持った 320mm 長の HEIDENHAIN アブソリュートリニア エンコーダを位置参照用として、固定プレートに取り付けます。円形検出磁石を、LC415 リニアエンコーダの移動スレージの上に取り付けます。スレージは EnDat2.2 インターフェイス ケーブルに接続され、ケーブルを引っ張ることで磁石の位置を移動できます。4 個の TMAG5170 3D ホール エフェクト センサを下向きにして、TIDA-060045 PCB を LC415 リニア エンコーダの上面にある固定プレートに取り付けます。TMAG5170 (y 軸) 内の各 3D ホール エフェクト センサの中心を、移動する磁石の中心に合わせます。磁石の上面と TMAG5170 内のホール エフェクト センサの間のエアギャップ (z 軸) は 15.2mm です。TMS320F280049C LaunchPad は、ヘッダ J1、J3 と J2、J4 経由で TIDA-060045 PCB に接続します。このテスト構成では、TMS320F280049C LaunchPad は TIDA-060045 にも 3.3V 電源を供給します。

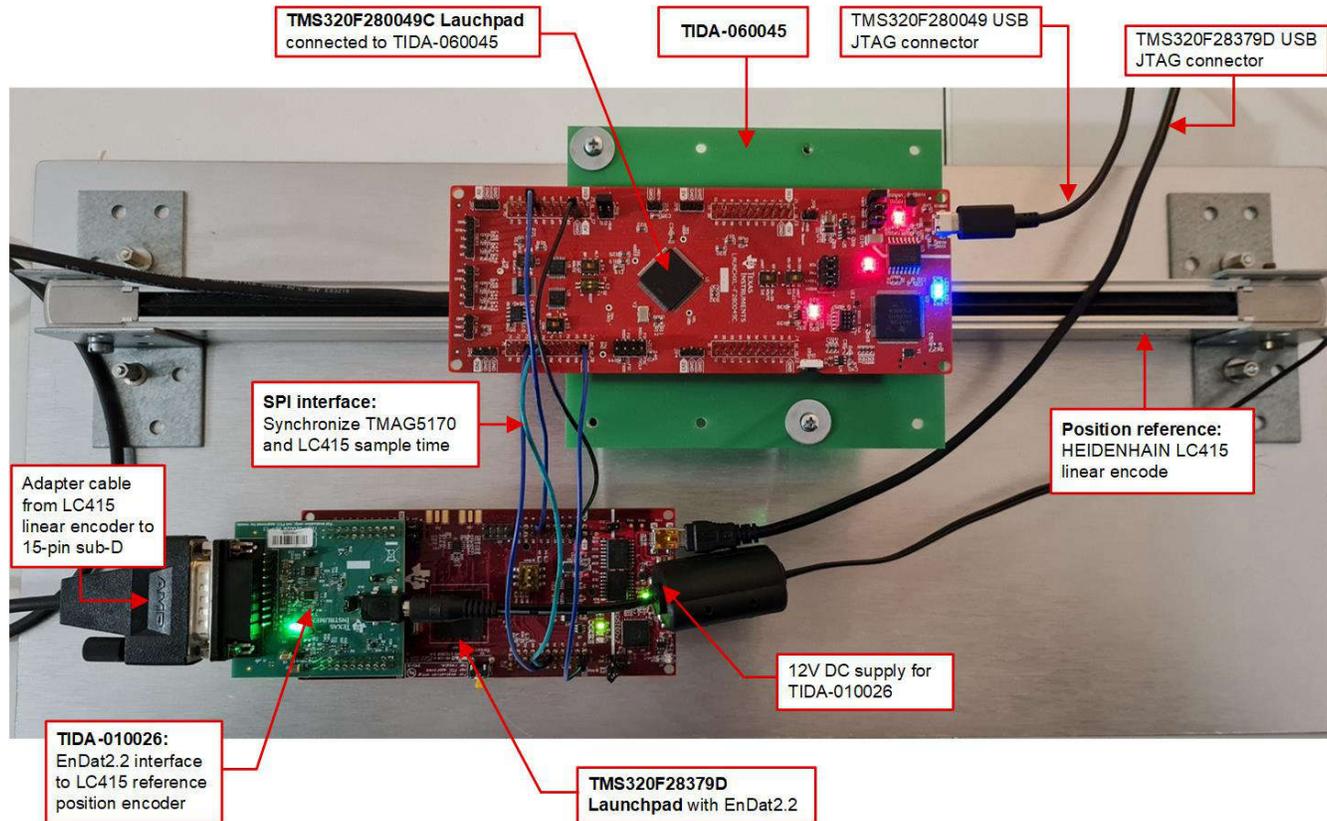


図 4-4. テスト構成の上面図

図 4-4 に、前述のように LC415 リニア位置参照用エンコーダの上面に TIDA-060045 および TMS320F280049C LaunchPad を取り付けたテスト構成の上面図を示します。LC415 リニア エンコーダは、TIDA-010026 EnDat2.2 リファレンス デザインに接続します。TIDA-010026 は 12V 電源で動作し、EnDat2.2 ソフトウェアを稼働する TMS320F28379D LaunchPad に接続します。両方の LaunchPad を SPI 経由で接続し、4 個の TMAG5170 と LC415 リニア エンコーダのサンプリング時間を同期し、最大 4kHz のサンプルレートで、対応する LC415 の参照位置を TMS320F280049C LaunchPad に送信します。

このリファレンス デザインを検証するために、TMAG5170 ヘッダー ファイル TMAG5170-CODE-EXAMPLE と C2000 MCU 用の C2000WARE ソフトウェア開発キットを使用して、TMS320F280049C LaunchPad でテキサス・インスツルメンツの社内テストソフトウェアを開発しました。C2000WARE の質問については、C2000 マイコンフォーラムの E2E™ 設計サポートを参照してください。TMAG5170-CODE-EXAMPLE についての質問は、センサフォーラムを参照してください。

TMS320F280049C で実行されるテキサス・インスツルメンツの社内テストソフトウェアには、2 つの動作モードがあります。リアルタイム モードでは、LC415 スレッジに取り付けられた磁石の絶対直線位置 (x 軸) を 4kHz のレートで連続的に測定し、対応する位置誤差を計算します。LC415 リファレンス エンコーダから読み取った事前定義された絶対開始位置に磁石が到達すると、トリガ モードは連続した 200 カ所の位置のサンプリングを開始します。詳細については、「テスト結果」セクションを参照してください。この絶対開始位置は絶対値で 12cm であり、クワッド TMAG5170 の 10cm の測定範囲は絶対参照位置 13.2cm~23.2cm で始まります。これは動的な精度測定に使用され、センサ磁石と LC415 シャトルがそれに応じて移動し、すべてのデータがメモリに保存されます。データは Code Composer Studio を介して読み出され、Excel や MATLAB® などのツールを使用して検証されます。

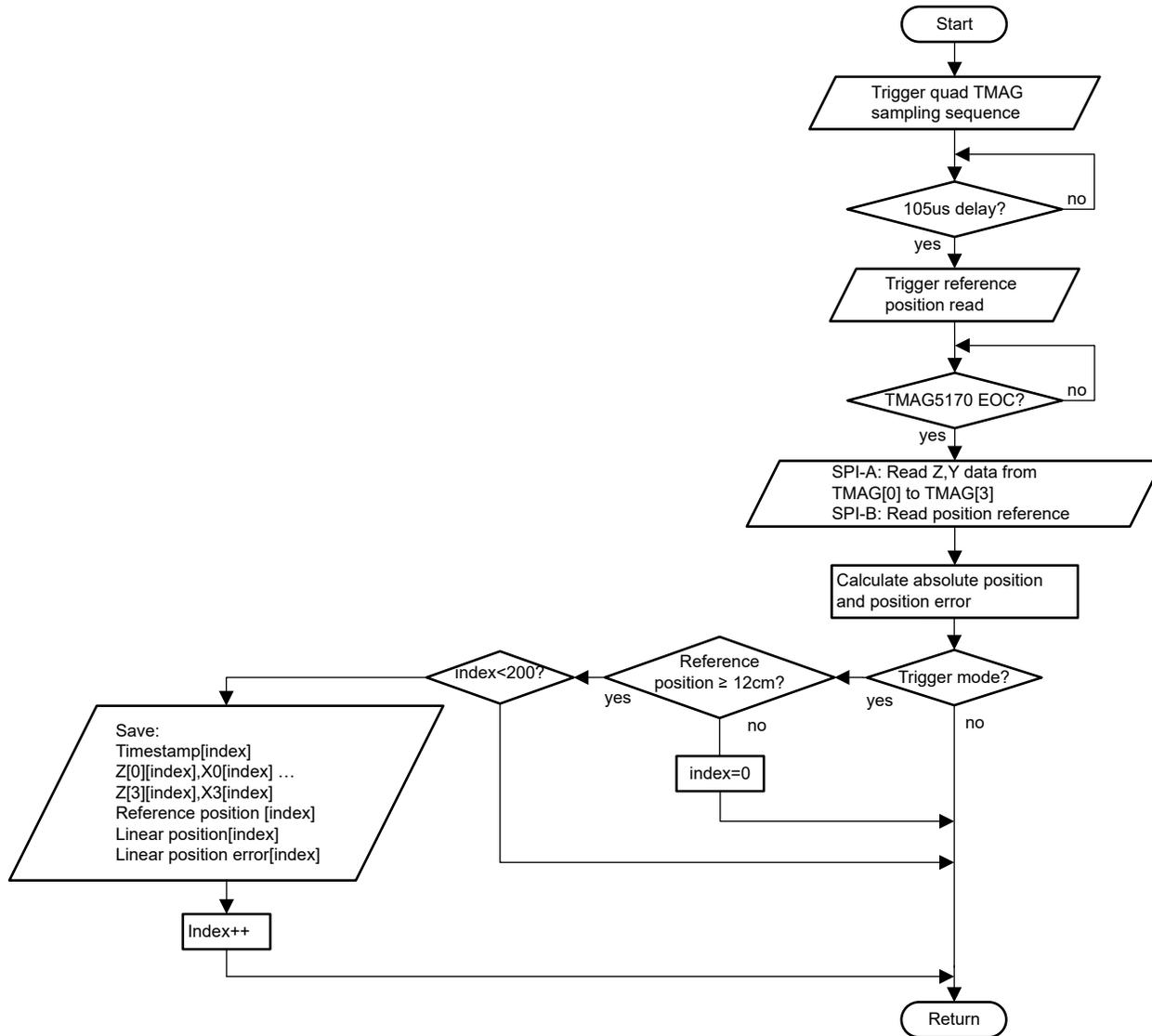


図 4-5. フローチャート リニア位置テスト ソフトウェア

4.3 テスト結果

4.3.1 磁界の Z 軸および X 軸成分の測定

トリガ モードを有効にして 200 回連続サンプルをダンプし、4kHz のサンプルレートで x および z 方向の 2 次元磁界強度を測定しました。図 4-6 に、基準位置エンコーダで測定された絶対直線位置での X 軸および Z 軸データの測定値を示します。

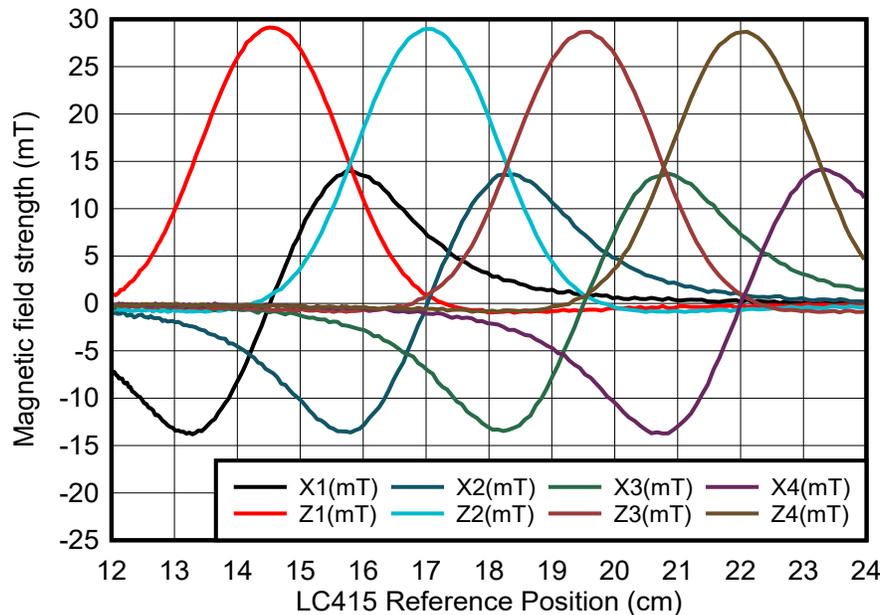


図 4-6. 4 個の TMAG5170 の Z および X 磁界と基準位置との関係

キャプチャしたデータを分析すると、各 TMAG5170 センサで観測された X 成分と Z 成分のデータが重なっていることがわかります。z 軸はユニポーラ範囲を持ち、振幅と等しいオフセットを持つコサイン信号に対して ± 90 度以内で近似できます。x 軸はバイポーラ振幅で、正弦信号に対して ± 90 度以内で近似できます。そのため、各 TMAG5170 のフルスケールの磁界範囲は、Z 軸で $\pm 50\text{mT}$ 、x 軸で $\pm 25\text{mT}$ に設定されています。

最初の TMAG5170 から最後の TMAG5170 に向かって Z 磁界の振幅が減少するのは、TIDA-060045 PCB が取り付けられたプレートに対して正確に平行に取り付けられておらず、エアギャップが最初の TMAG5170 から最後の TMAG5170 に向かってわずかに増加したためです。この機械的な較正は行われていません。

図 4-7 と 図 4-8 に、4kHz のサンプルレートで測定した最初の TMAG5170 の X 磁界と Z 磁界の 1000 回連続サンプルの時間ドメインプロットを示します。このテストでは、検出磁石の絶対位置は 14.19cm でした。

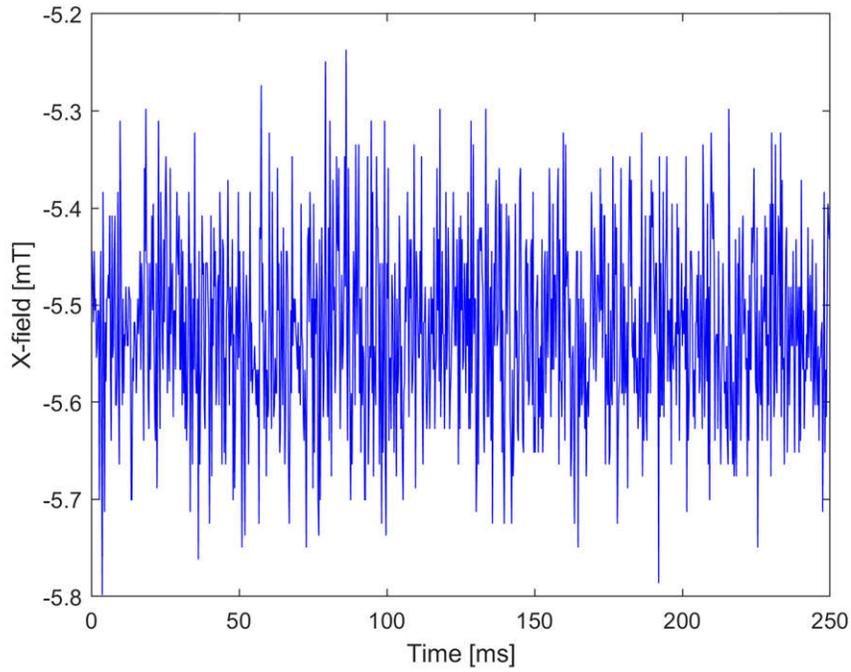


図 4-7. 磁石位置 14.19cm での最初の TMAG5170 の X 磁界

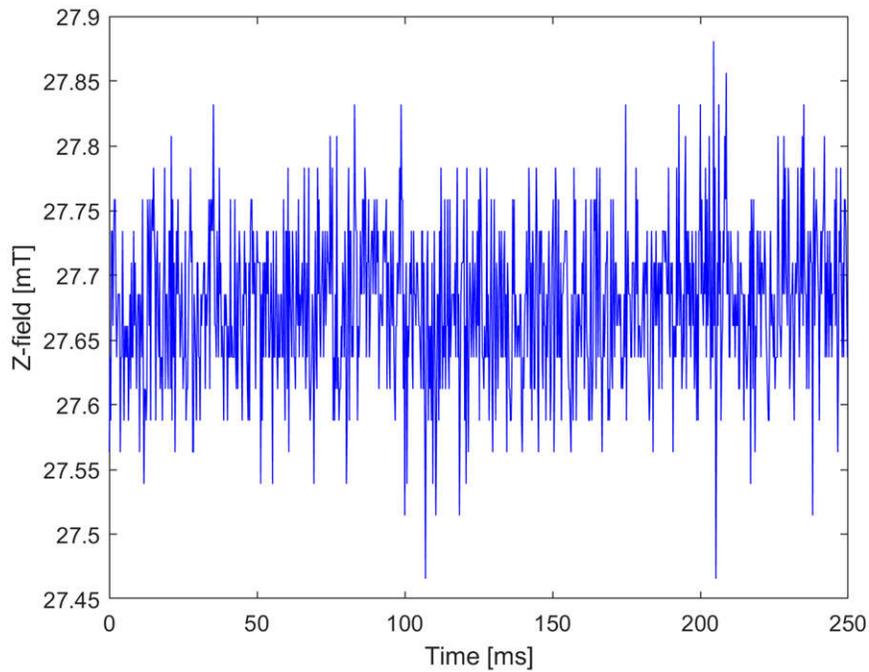


図 4-8. 磁石位置 14.19cm での最初の TMAG5170 の Z 磁界

図 4-9 と 図 4-10 に、X 磁界と Z 磁界のデータの対応するヒストグラムを示します。

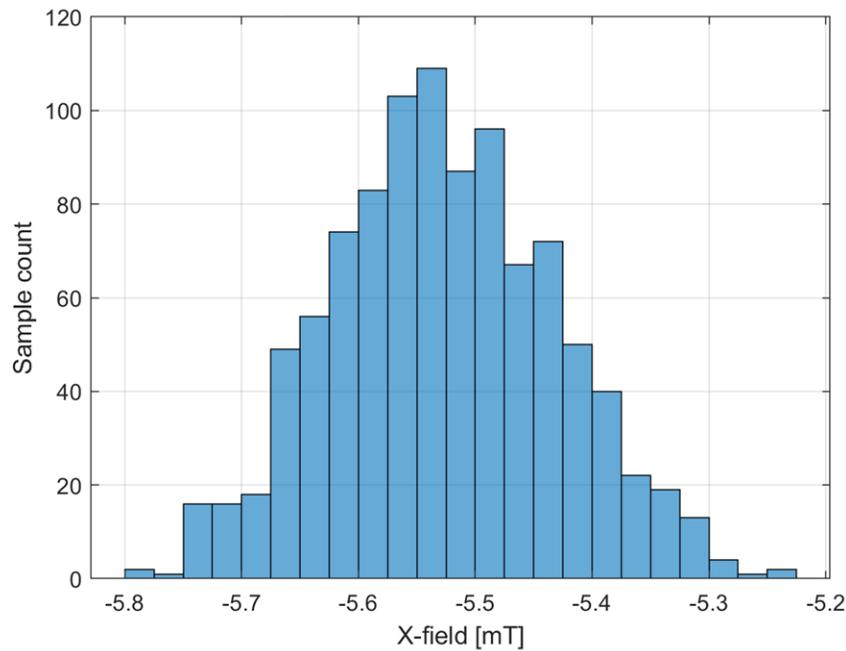


図 4-9. 磁石位置 14.19cm での最初の TMAG5170 の X 磁界のヒストグラム

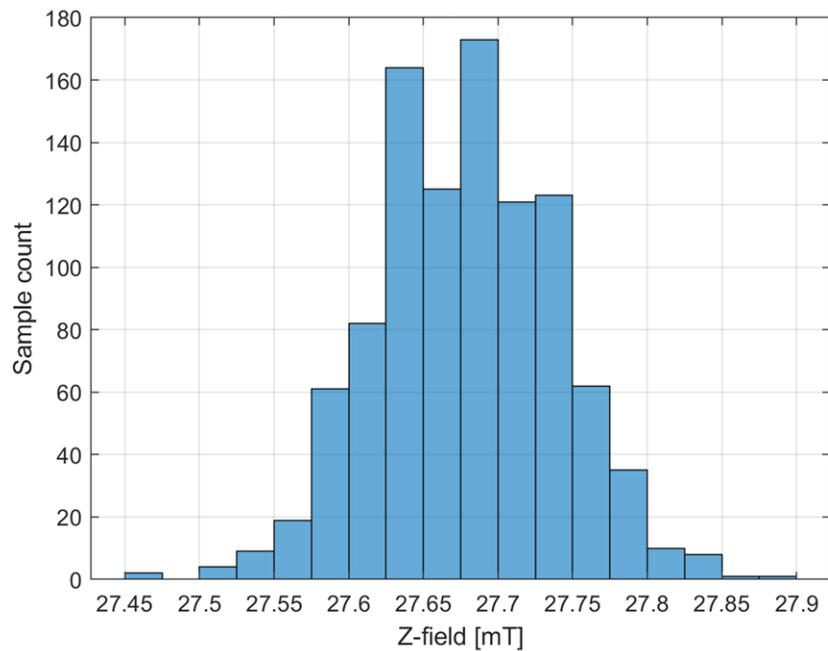


図 4-10. 磁石位置 14.19cm での最初の TMAG5170 の Z 磁界のヒストグラム

表 4-4 に、フルスケールレンジでの標準偏差、信号対雑音比 (SNR)、有効ビット数 (ENOB) を示します。TMAG5170 の X 軸ではゲイン設定が高くなるため、X 軸のノイズが支配的になります。

表 4-4. TMAG5170 のフルスケール レンジでの標準偏差、SNR、ENOB

TMAG5170	Z 軸	x 軸	備考
標準偏差 [mTrms]	0.059	0.094	rms
フルスケール レンジ ± [mT]	50	25	peak
SNR [dB]	55.55	45.48	dB
ENOB [bit]	8.94	7.26	ビット

4.3.2 リニア位置測定

セクション 3.2.4 で説明するように、移動する磁石の位置は、Z および X 磁界成分を使用して、最大の Z 磁界振幅を持つセンサから計算されます。軸外測定を調整するために、測定された Z 磁界のゲインとオフセットが較正されています。さらに、X 磁界の絶対振幅を乗算した補償係数を使用して、位置計算の非直線性を補償しました。さらに、PCB 上の各 TMAG5170 間の変位を補正しました。単純化のため、各 TMAG5170 間の距離として同じ値を使用しました。

表 4-5. キャリブレーション係数

TMAG5170	1	2	3	4
Z オフセット	14.6mT	14.3mT	14mT	13.8mT
Z ゲイン	0.94	0.93	0.94	0.94
変位	24.97mm	24.97mm	24.97mm	24.97mm
X 軸の補償係数	0.001538	0.001538	0.001538	0.001538

この位置は、室温 (22°C) で約 0.4m/s の線形速度で測定されました。データ キャプチャのどちらかの端で観測されるピークは、磁石がクワッド センサ PCB のセンシング範囲を離れるときの信号です。

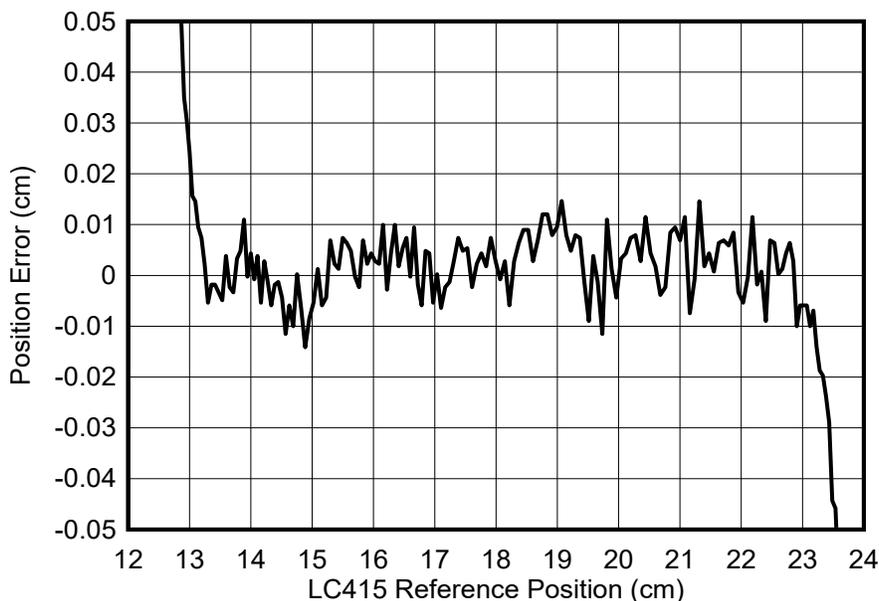


図 4-11. 室温でのクワッド TMAG5170 に対する線形位置誤差

Z 磁界と X 磁界ノイズフロアの影響を測定するため、図 4-11 に示すように、4kHz で 1000 を超えるサンプルに対する 14.19cm での静的位置誤差を測定しました。対応するヒストグラムを 図 4-12 に示します。測定は室温 22°C で行います。

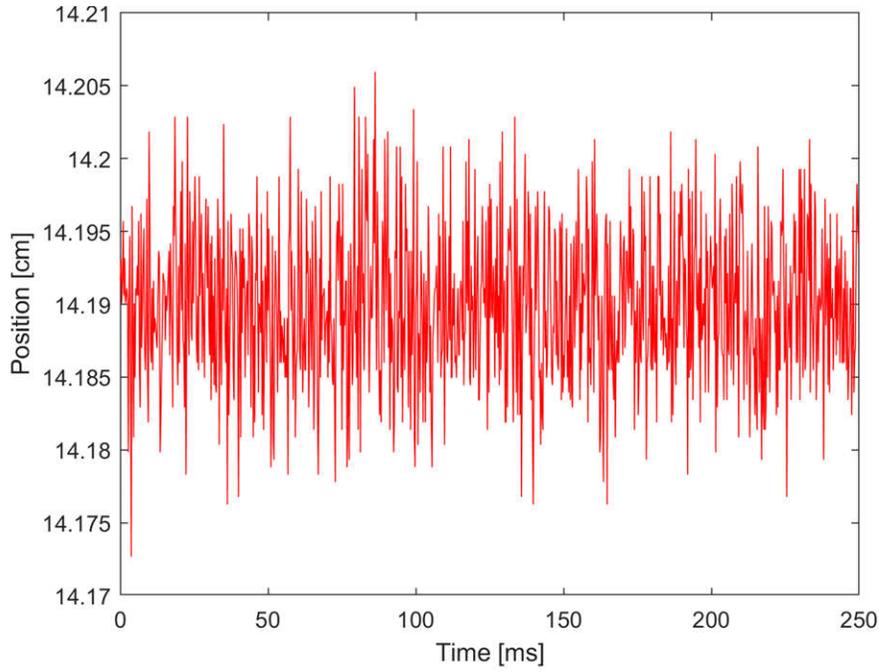


図 4-12. 4kHz のサンプルレートで 1000 を超える静的な位置をサンプリング

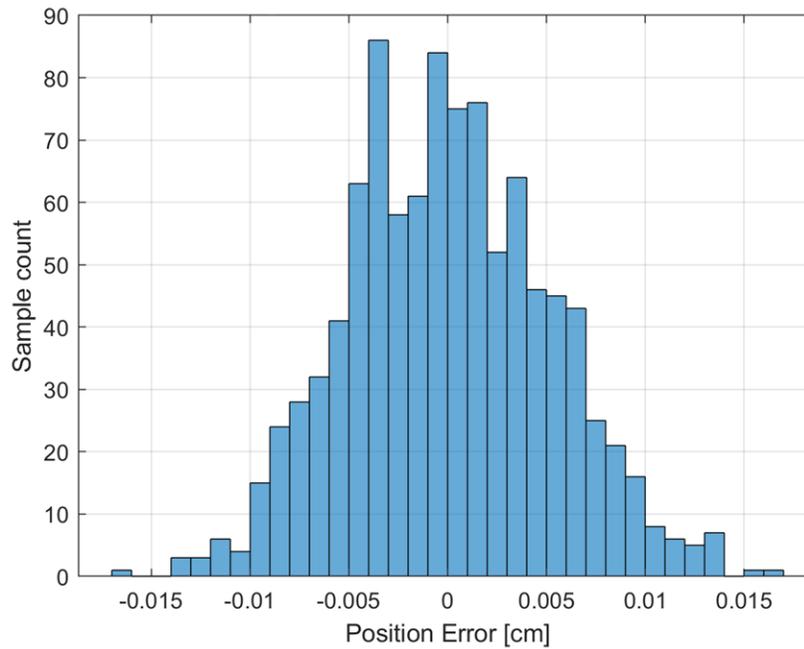


図 4-13. 磁石位置 14.19cm での位置誤差のヒストグラム

表 4-6 に、フルスケール位置測定範囲と、対応する標準偏差および ENOB を示します。

表 4-6. クワッド TMAG5170 の静的位置 14.19cm での標準偏差、SNR、ENOB

QUAD TMAG5170	位置エラー	備考
標準偏差 [cm]	0.0053	
フルスケールレンジ [cm]	10	クワッド 3D センサ
ENOB [ビット]	10.6	

それぞれの **TMAG5170** は、2.5cm の測定範囲にわたって 8.6 ビットの ENOB を提供します。範囲が 10cm のクワッド **TMAG5170** アレイでは、全体の ENOB が上の表に示すように 10.6 ビットと 2 ビット増加します。

このテストの後、0.4m/s 前後の線形速度で位置測定を 5 回繰り返し、Z 磁界と X 磁界ノイズが絶対精度に及ぼす影響を概観しました。図 4-14 にテスト結果を示します。

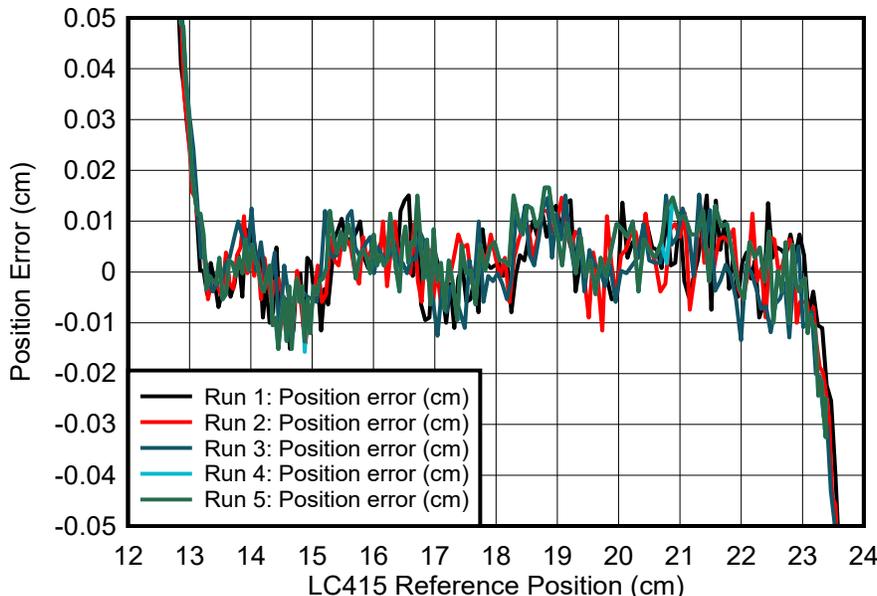


図 4-14. 5 回のテスト実行での線形位置誤差

より高度な補償アルゴリズムにより、さらに最適化が可能です。リニア位置アプリケーション用の磁石の選択 (Rev. A) (<https://www.ti.com/lit/an/slya059b/slya059b.pdf>) も参照してください。磁界強度が高い磁石を使用すると、磁界強度の Z 軸成分で 100mT、X 軸成分で 50mT に増やすことができ、信号対比をそれぞれ 2 倍に増やすことができます。『リニア位置アプリケーション用磁石の選択 (Rev. A)』を参照してください。

TIDA-060045 のデモンストレーションビデオは、「3D ホール効果センサを使用した設計:リニア位置エンコード」で見ることができます。磁気システムのシミュレーションに役立つように、TI Magnetic Sense Simulator (TIMSS) ツールを使用すると、磁気システムの設計と評価を迅速化できます。

4.3.3 SPI 信号測定

図 4-14 に、デイジーチェーン内の最初の **TMAG5170** (U7) で測定された nCS1 のある 32 ビットの SPI タイミングフレームを示します。赤い信号は SDI 書き込みフレーム (読み取りコマンド) と、対応する特別な 32 ビット SDO 読み取りフレームであり、2 つの 12 ビット X および Z 磁界データ、ステータスビット、CRC が含まれています。転送には 3.4μs かかります。

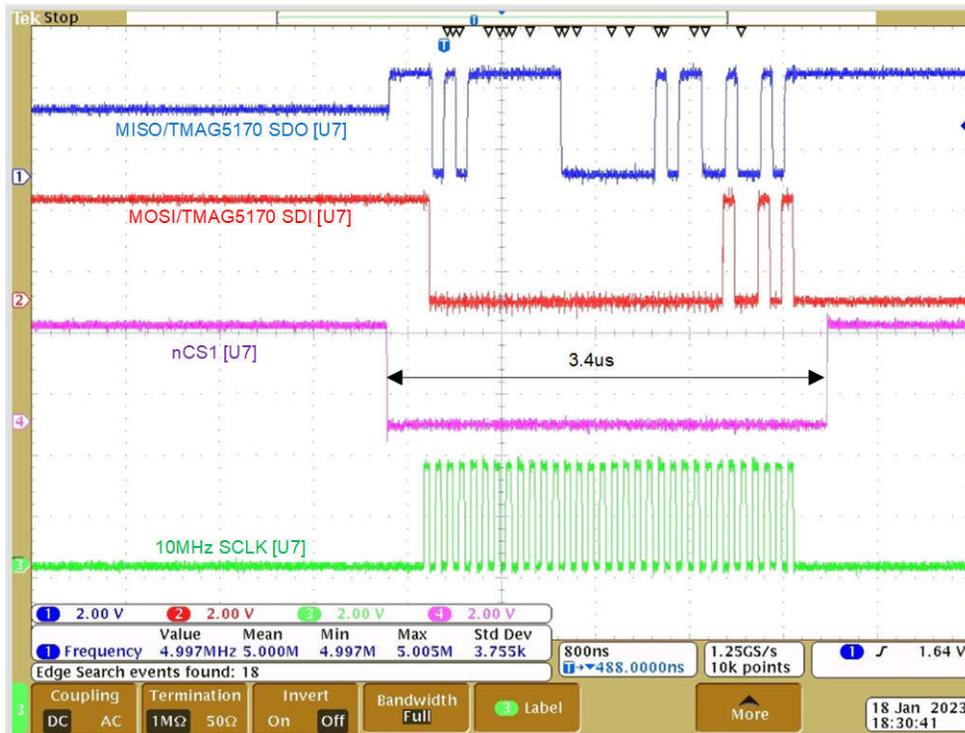


図 4-15. SPI 32 ビットフレーム タイミング

図 4-15 に、TMAG5170 (U7) SDO 出力と SPI クロック SCLK 入力のタイミングを示します。SDO 信号の立ち下がりクロック エッジに対する遅延時間は 20ns です。SDO の立ち上がり時間は 7ns、立ち下がり時間は 3ns です。

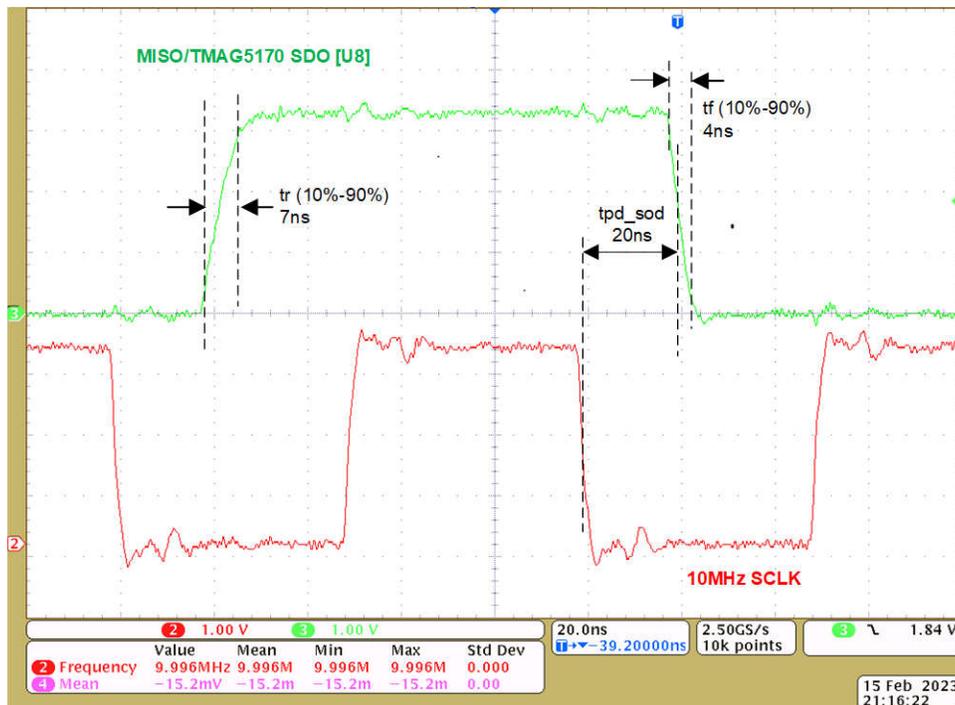


図 4-16. TMAG5170 U8 SDO (MISO) と SCLK

図 4-16 に、TIDA-060045 MCU のヘッダ J3-20 および J2-13 における SDO 出力と SPI クロック SCLK 入力のタイミングを示します。セットアップ時間 t_{su} は 22ns、ホールド時間 t_h は立ち上がりクロック エッジに対して 66ns です。



図 4-17. MCU ヘッダ J2 および J3 の MISO および SCLK

図 4-17 に、TMAG5170 SDI 入力 (MOSI) と 10MHz SPI クロック (SCLK) のタイミングを示します。セットアップ時間 ($t_{su_si}=47ns$) とホールド時間 ($t_{h_si}=48ns$) の両方が、TMAG5170 の要件 (25ns (MIN)) を満たしています。

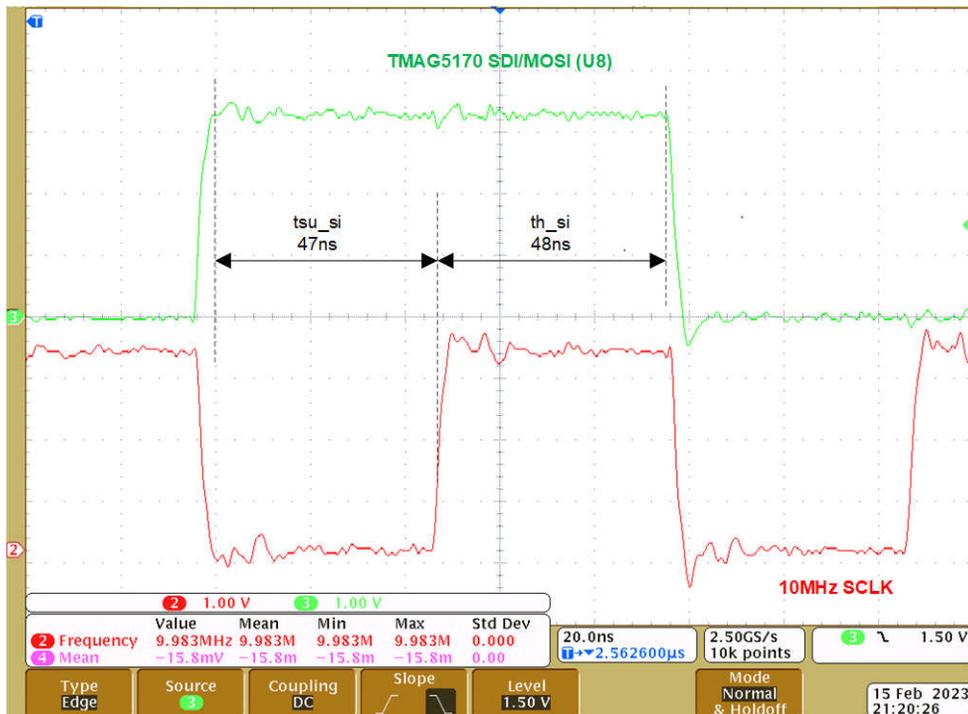


図 4-18. TMAG5170 U8 SDI (MOSI) および SCLK

以下の図は、SCLK デイジー チェーン内の最初の TMAG5170 MCU (U7) と最後の TMAG5170 (U8) で測定された SPI クロック (SCLK) 信号 (AC 並列終端ありとなし) の比較を示しています。



図 4-19. U7 での SCLK、U8 での AC 並列終端あり

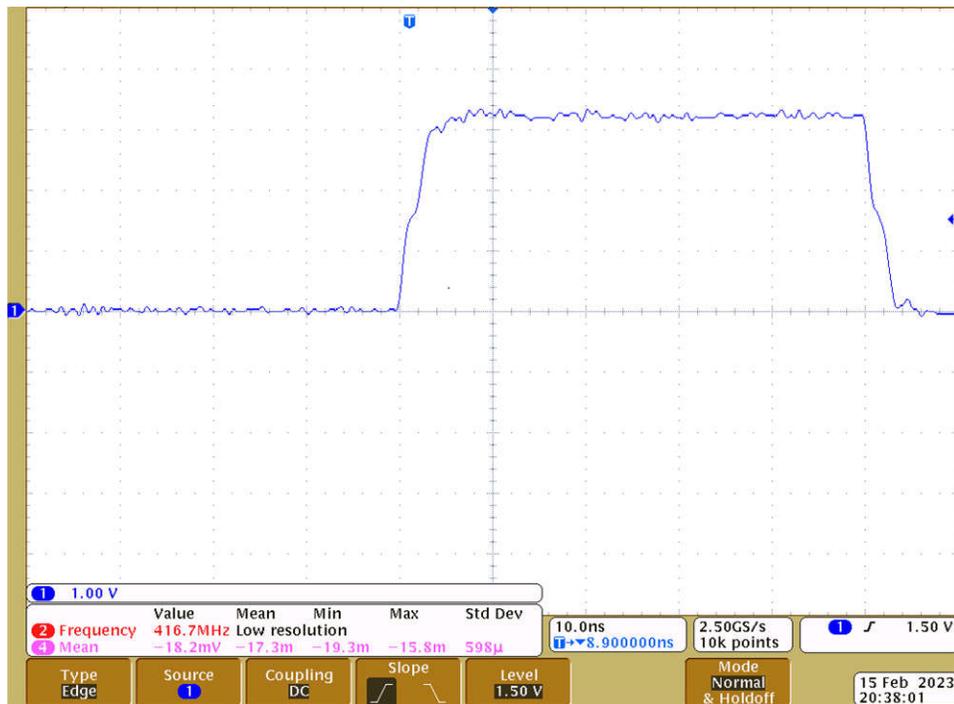


図 4-20. U7 での SCLK、U8 での AC 並列終端なし

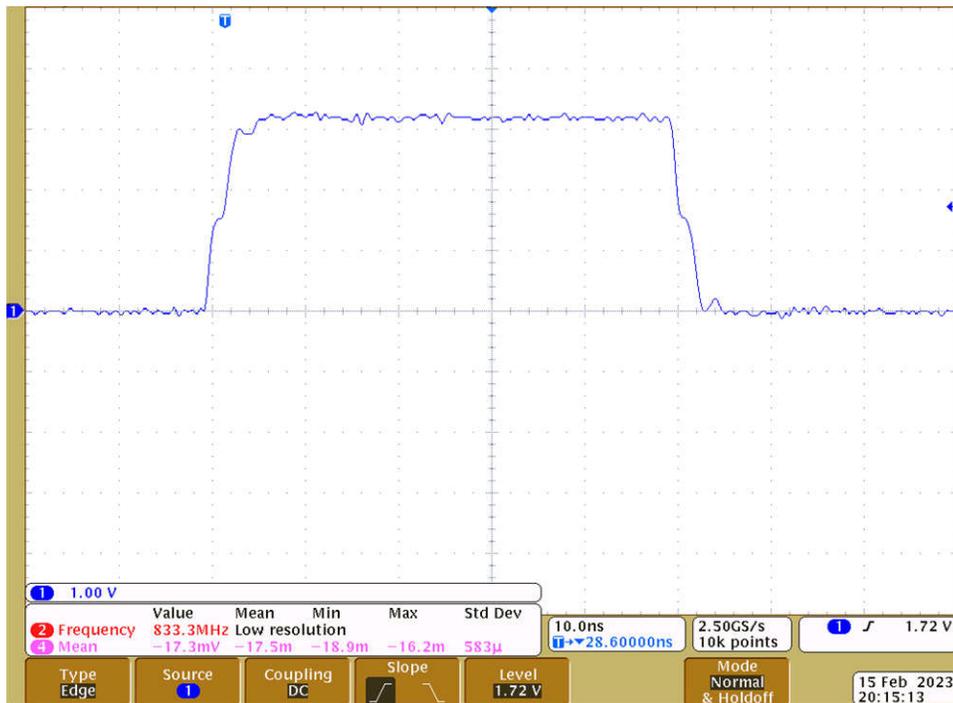


図 4-21. U8 での SCLK、U8 での AC 並列終端あり

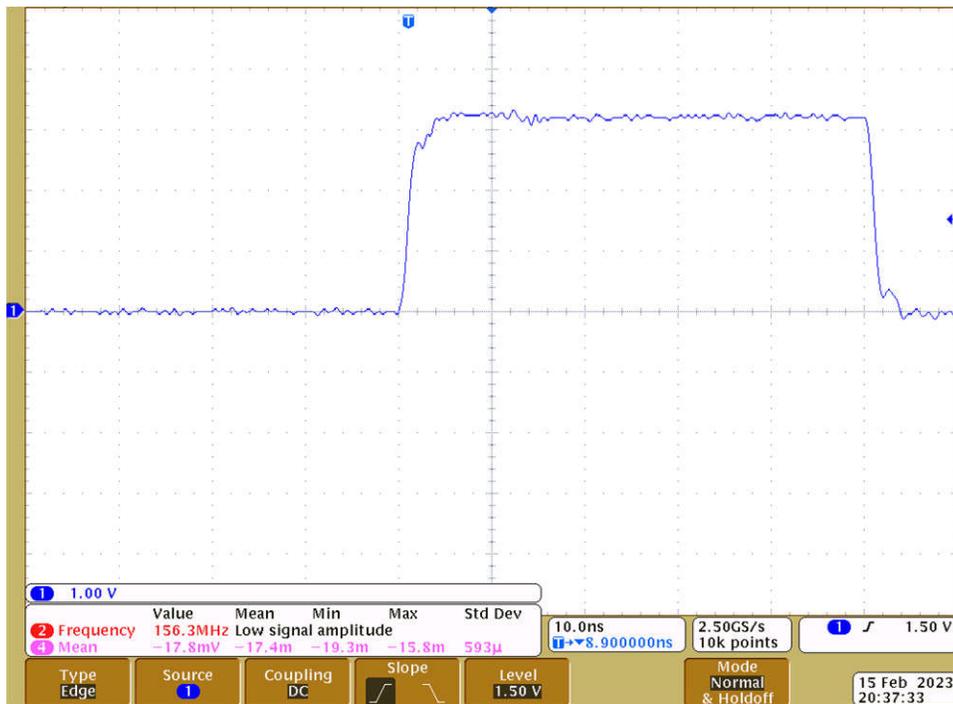


図 4-22. U8 での SCLK、U8 での AC 並列終端なし

MCU 出力信号 nALERT、MOSI、SCLK、および nCS1～nCS4 に対する直列ライン終端抵抗は、MCH ヘッダの近くに 0Ω の直列ライン終端抵抗を備えています。これらの抵抗がデフォルトで 0Ω である理由は、TMS320F280049C LaunchPad 上の対応するパターンが TIDA-060045 と同等の長さであるためです。

TIDA-060045 の SPI パターンは 20cm (8 インチ) 未満です。対応する伝搬遅延は約 1.3ns で、立ち上がり時間や立ち下がり時間に比べてかなり短くなります。F280049C LaunchPad を接続した場合、AC 並列終端による大きな影響はありませんでした。

カスタム設計の場合、直列ライン終端抵抗は MCU の出力に直接配置する必要がありますが、TMS320F280049C LaunchPad を使用する場合はこれは不可能でした。SPI パターンの長さに応じて、AC 並列終端を考慮するかどうかが決まります。

5 設計とドキュメントのサポート

5.1 デザイン ファイル

5.1.1 回路図

回路図をダウンロードするには、[TIDA-060045](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.2 BOM (部品表)

部品表 (BOM) をダウンロードするには、[TIDA-060045](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.3 PCB レイアウト

5.1.3.1 レイアウト プリント

レイアウト プリントをダウンロードするには、[TIDA-060045](#) のデザイン ファイルを参照してください。

5.1.3.2 レイアウトのガイドライン

SPI クロック信号 SCLK のレイアウトを [図 5-1](#) に示します。SCLK は、デジタイズ チェーン接続の最上層で、最初の [TMAG5170 \(U7\)](#) から最後の [TMAG5170 \(U8\)](#) まで、シリアルライン終端抵抗とオプションの遠端 AC 並列終端付きで配線されます。nALERT 信号と MOSI ([TMAG5170 SDI](#)) 信号は、同じ方法で配線されます。真ん中の 1 層下にある連続した GND プレーンが、帰路の GND として機能します。

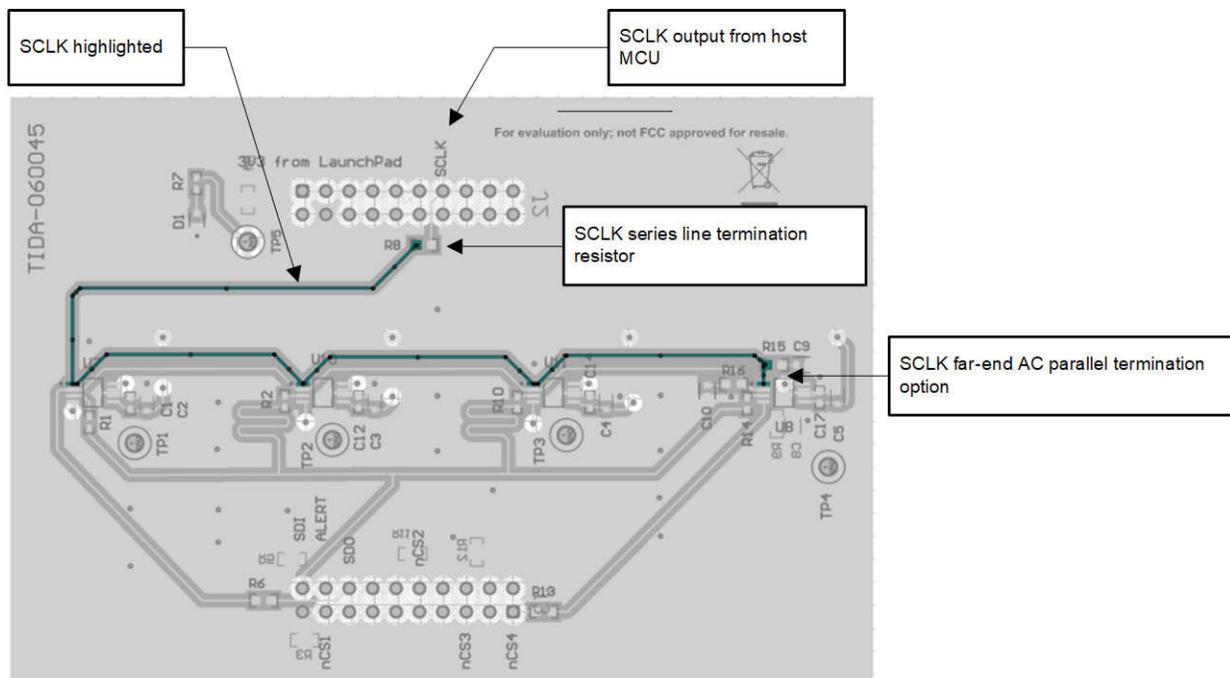


図 5-1. SPI クロック (SCLK) パターンの配線

各 **TMAG5170** の個別の SDO 出力 (SPI MISO) には、シリアルライン終端抵抗があります。各 **TMAG5170** からの 4 つの SDO パターンは、同様の長さでスター配線されてから、1 つのパターンにマージされてホストプロセッサの MISO 入力ピンに接続されます。

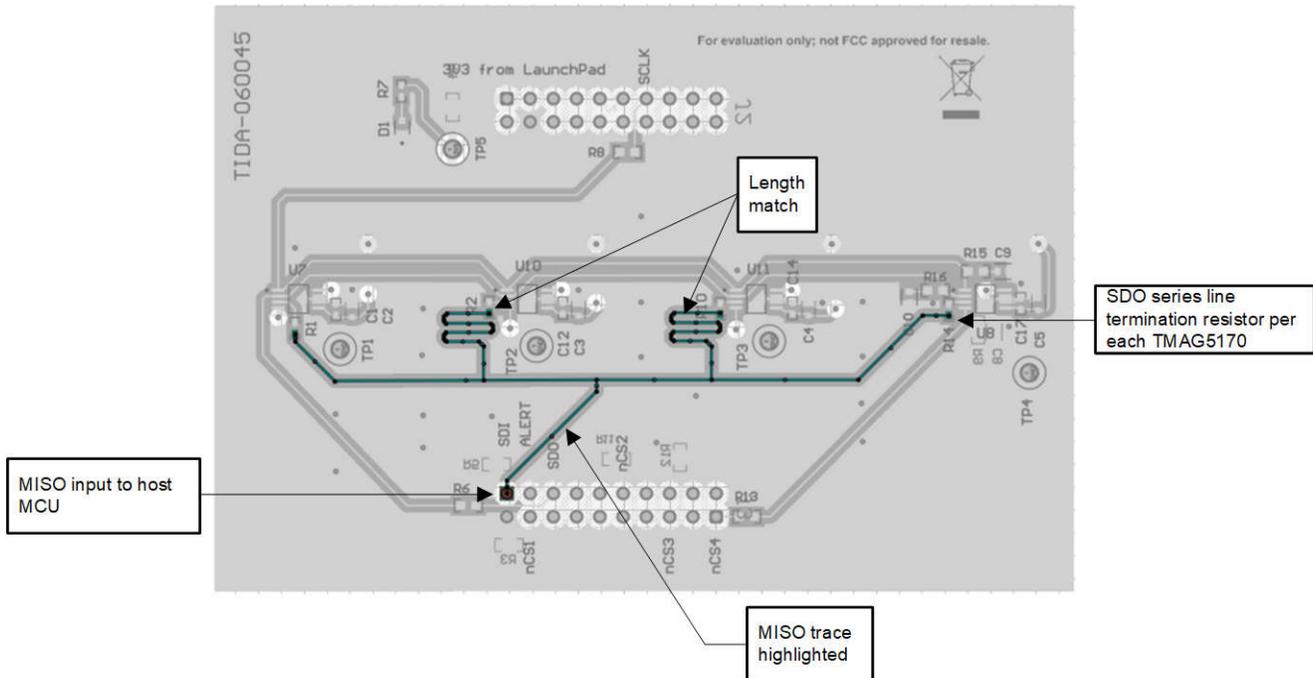


図 5-2. MISO の長さが一致したスタートポロジ

5.2 ツールとソフトウェア

ツール

TI-MAGNETIC-SENSE-SIMULATOR

機械式運動とセンサ出力への対応機能搭載、磁気シミュレーションソフトウェア。

LAUNCHXL-F280049C

F280049C LaunchPad™ 開発キット、C2000™ Piccolo™ MCU。

ソフトウェア

TMAG5170-CODE-EXAMPLE

TMAG5170 および TMAG5170-Q1 向け、C のサンプルコード。

C2000WARE

C2000Ware は開発期間を大幅に短縮するソフトウェアと資料を包括的に提供します。特定デバイス向けドライバ、ライブラリ、ペリフェラル サンプルを収録しています。

5.3 ドキュメントのサポート

1. テキサス・インスツルメンツ、『リニア モータ搬送システムによるマルチムーバ位置検出』、アプリケーション ブリーフ
2. テキサス・インスツルメンツ、『3D ホール効果センサを使用した設計:リニア位置エンコード』、ビデオ
3. テキサス・インスツルメンツ、『リニア位置アプリケーション用の磁石選択 (Rev. A)』、アプリケーション レポート
4. テキサス・インスツルメンツ、『最高のシステム角度センシング精度を達成する方法』、アプリケーション レポート
5. テキサス・インスツルメンツ、『テキサス・インスツルメンツ磁気検出シミュレータの機能入門』、アプリケーション ブリーフ
6. テキサス・インスツルメンツ、『EnDat2.2 アブソリュート エンコーダ向け、堅牢なインターフェイスのリファレンス デザイン』

5.4 サポート・リソース

テキサス・インスツルメンツ E2E™ サポート・フォーラムは、エンジニアが検証済みの回答と設計に関するヒントをエキスパートから迅速かつ直接得ることができる場所です。既存の回答を検索したり、独自の質問をしたりすることで、設計に必要な支援を迅速に得ることができます。

リンクされているコンテンツは、各寄稿者により「現状のまま」提供されるものです。これらはテキサス・インスツルメンツの仕様を構成するものではなく、必ずしもテキサス・インスツルメンツの見解を反映したものではありません。テキサス・インスツルメンツの[使用条件](#)を参照してください。

5.5 商標

TI E2E™, LaunchPad™, C2000™, Piccolo™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

6 著者について

MARTIN STAEBLER は、テキサス・インスツルメンツの産業システム / モータードライブ チームのシステム エンジニア 兼 シニア メンバー テクニカル スタッフ であり、産業用ドライブ 向けシステム ソリューションの仕様策定と開発を担当しています。

謝辞: 著者は、このリファレンス デザインの文書化、設計、テストにご協力を頂きました **SCOTT BRYSON**、**ESTER VICARIO**、**JACK BOLTON** に感謝の意を表します。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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 © 2024, Texas Instruments Incorporated

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](#) 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated