

Application Note

3D リニアホール効果センサを使用したジョイスティックボタンの押下



Yishan Chen

概要

このアプリケーションノートでは、3D リニアホール効果センサを使用した Z 軸による 2 レベルの磁束変化とラッチ検出を行う方式を提案し、ジョイスティックのボタン押下動作中に可能な X または Y オフセットを低減する方法をご紹介します。ハードウェア割り込みおよびソフトウェアスルーレートまたは絶対値検出方式を使用することで、Z 軸押下動作に対する高速応答が実現できます。同時に、この方法では、最後の X, Y 変換値をラッチすることにより、X と Y のオフセットを大幅に低減することができます。これにより、機械的誤差の影響を最も受ける軸の平均誤差は、265% から 8.8% に低減できます。

目次

1 はじめに.....	2
2 3D リニアホールセンサにおける Z 軸押下オフセットの問題.....	4
2.1 Z-軸押下動作における X, Y オフセットの根本原因.....	4
3 Z 軸押下軸検出方法.....	5
3.1 提案した方法の概要.....	5
3.2 ソフトウェアによるスルーレート検出機能.....	5
3.3 ハードウェアによるしきい値検出および割り込み.....	6
3.4 ラッチ方式.....	6
3.5 テスト結果.....	8
4 まとめ.....	10
5 参考資料.....	11

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

ゲームコントローラ、リモートコントローラ、ジンバルカメラなどのジョイステイックアプリケーションでは、ジョイステイックの動きを検出するためにセンサコンポーネントまたはデバイスが必要です。このセンサは元の機械的変位信号を電気信号に変換し、ホストマイコンとの通信を行って、センシングした電気信号を更新します。マイコンはセンサからの情報を使用して、より大きなシステムのユーザー制御を実現します。

5Dスイッチまたはカーボンフィルム抵抗ジョイステイックの両方が、ジョイステイック用途で直接的な機械的接触検出方法として使用されてきました。

5Dスイッチでは、ジョイステイックの周囲に5つの機械的トリガを設定します。ジョイステイックの動きによって機械的構造が押されるか作動すると、スイッチから連続的な高レベル信号が出力され、動きの方向が示されます。この方法で出力できるのは、High信号またはLow信号のみで、チルト角度や移動速度を検出できないため、より正確な検出ができません。

カーボンフィルム抵抗ジョイステイックは、ジョイステイックの動きに応じて各軸の抵抗を変化させます。カーボンフィルムは良好な線形応答を持っていますが、これはより大きな機械的パッケージを必要としますが、そのまま使うと抵抗の変化を引き起こす場合があり、ジョイステイックのドリフト問題を引き起こして、製品寿命が制限されます。



図 1-1. カーボンフィルム抵抗ジョイステイックと 5D スイッチジョイステイク

近年、機械的接触ベースの設計から、非接触型の位置センシングを実現するホール効果ベースの設計への関心が高まっています。こうした設計を採用することで、製品寿命の全期間を通じて発生するドリフト問題の解決に役立てようとしています。ジョイステイックの設計に応じて、標準の1D(1軸感度)と3D(x, y, z感度)の両方をこの目的に使用できます。

3Dホール効果センサは、3つのホール素子を1つのチップに統合し、単一のプラスチックパッケージで封止することで、超小型サイズと低コストを実現すると同時に、優れた性能設計を確保しています。TIの最新世代の3Dリニアホールセンサである [TMAG3001](#) は、0.83mm x 1.32mm のパッケージサイズが実現可能です。

ホール効果センサを使用したジョイステイックの構成については、『ホール効果センサによるジョイステイクとレバーの設計』アプリケーションノートを参照してください。

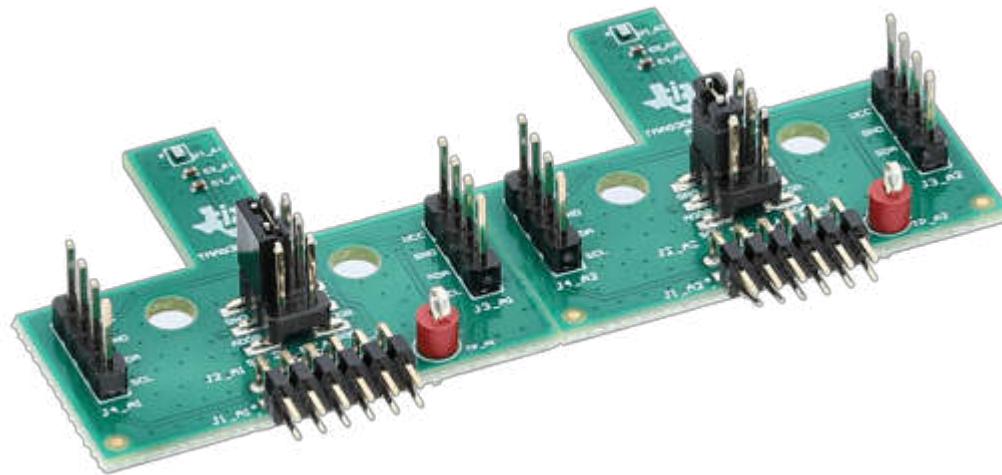


図 1-2. TI TMAG3001 EVM

単一の 3D リニアホール効果センサは、ジョイステイックアプリケーションにおけるカーボンフィルムや 5D メカニカルスイッチの代替として使用可能です。ホール効果素子は互いに直交するように配置されているため、[3D ホール効果センサの概要](#)に説明されているように、磁場を全体的に検知することができます。TMAG3001 に内蔵されている CORDIC エンジンによる角度計算出力を使用することで、ホストマイコンはジョイステイックの位置を迅速に判定できます。XY 角度入力を追跡する機能に加えて、3D ホール効果センサを使用すれば、磁界ベクトルの大きさに一致する操作を捉えることで、ボタンの押下検出が可能になります。

2 3D リニアホールセンサにおける Z 軸押下オフセットの問題

ジョイステイックアプリケーションでは、ユーザーがジョイステイックを Z 軸方向に押してボタンの押下操作を実行することがよくあります。このボタンを押すことで、ユーザーは 1 回の操作を示すことができます。たとえば、ジンバルカメラでは、このアクションにより、コマンドが録画開始または写真撮影を実行することができ、ゲームコントローラでは、このアクションを確認見なすこともできます。押下操作中に X 軸と Y 軸の一部のオフセット生成がされてマイコンに送信されると、この誤った情報が原因で、ジンバルカメラの画面の中心点が移動したり、誤ったメニュー命令が表示されたりするなど、予期しない動作が発生する場合があります。

2.1 Z-軸押下動作における X、Y オフセットの根本原因

図 2-1 に、Z 軸の押下動作中の挙動に関する設計を示します。

- 3D リニアホールセンサの中心点とジョイステイックの間に機械的な誤差がありません。
- 押下動作は常に垂直方向の角度を維持します

3D リニアホール効果センサの内部にあるホール素子は、TMAG3001 の中間点ではないことに注意してください。これには、デバイスを適切位置に合わせるために、パッケージの中心からわずかにオフセットする必要があります。

TI の磁界検出シミュレータ (TIMSS) を使用すれば、予測される磁界をモデル化して計算することができます。磁石が下方向に移動すると、X 方向と Y 方向のどちらかの磁束は変化せず、Z 軸の磁束は指數関数的に増加することがあります。その後、TMAG3001EVM と GUI を使用してこのモデルを再現しました。磁気的变化が r^2 に反比例することを直接観察できます。

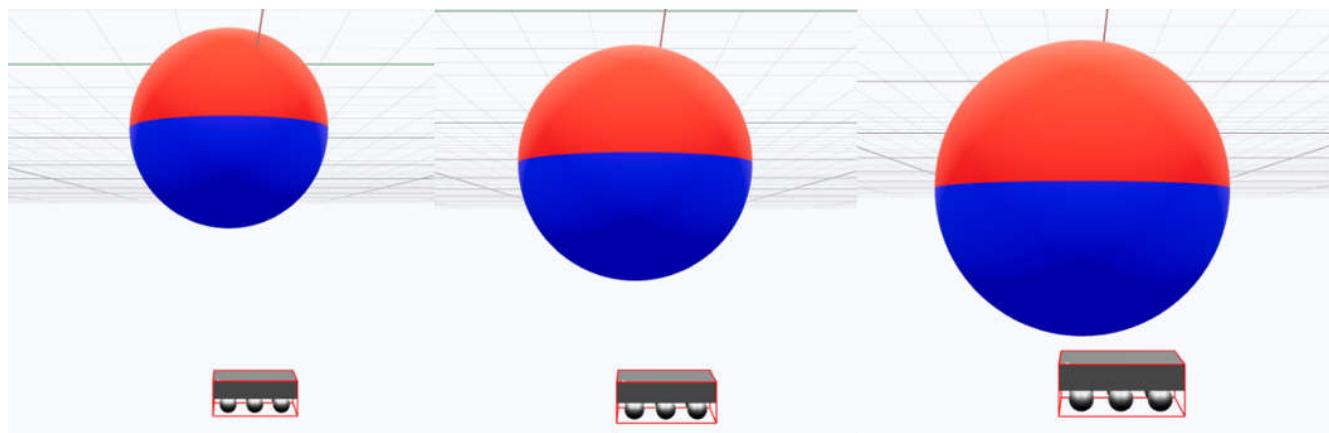


図 2-1. TIMSS シミュレーションモデル

表 2-1. Z 軸で磁石を移動したときのシミュレーション結果

Z_軸変位 (mm)	Bx(mT)	By(mT)	Bz(mT)
0	0	0	25.12599
0.25	0	0	29.55061
0.5	0	0	35.07820
0.75	0	0	42.07500
1	0	0	51.06340

理想的でない状況では、センサから X または Y のオフセットが観測される場合、その主な理由は 2 つあります

- ジョイステイックと 3D リニアホールセンサとの間の機械的誤差
- 手動で押下する場合、センサが完全に垂直になることはありません

機械的誤差は、図 2-2 に示すように、3D リニアホールセンサは、基準値と比較して一定レベルの偏差を持つことがあります。これは、センシング素子の中心を対象とするように設計されていますが、はんだ付けや製品の組み立て時の製造許容誤差が原因で、設計誤差が生じる場合があるためです。

さらに重要なことは、ジョイスティックは不完全なユーザー制御に起因して押下操作中に多少傾く場合があることです。この機械的誤差により、Z 軸内に完全に封じ込められているセンサでは磁界ベクトルが存在しなくなるため、X 軸または Y 軸のいずれかで一部の成分が観察されます。その結果、X 軸または Y 軸のオフセットにわずかな偏差が生じることは珍しくありません。

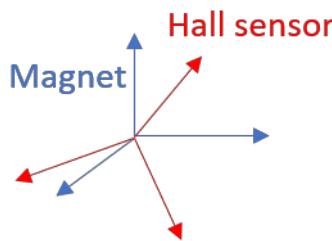


図 2-2. マグネットとホールセンサと間の機械的誤差

3 Z 軸押下軸検出方法

セクション 2 で説明したように、3D リニアホールセンサとジョイスティックとの間の機械的誤差により、Z 軸押下プロセスで X 軸と Y 軸で望ましくない結果が引き起こされます。たとえば、設定を選択する直前に、次のメニュー選択への手順が生成される可能性があります。これにより、マイコの不要な挙動が引き起こされる場合があり、ユーザーの操作環境に悪影響を及ぼす可能性があります。

機能の目標は、マイコンがボタンの垂直押下のみを検出することであり、X 軸と Y 軸に対する操作を検出することではありません。このアプリケーションノートでは、X 軸と Y 軸への影響を最小限に抑えながら、Z 軸の高速押下検出法を実現するアルゴリズムについて解説します。

3.1 提案した方法の概要

一般に、この検出方法では、ハードウェアのしきい値割り込みとソフトウェアのスルーレートまたは絶対値検出を使用して、X および Y 軸における Z 軸の押下動作によって生じる影響を低減します。図 3-1 は、Z 軸方向の押下プロセス中の Z 軸の磁束の変化を示しています。Z 軸に沿った磁束の変化は指数関数に似ています。この方法では、押下動作ができるだけ早く検出するために、2 つのレベルの磁場検出を適用します。

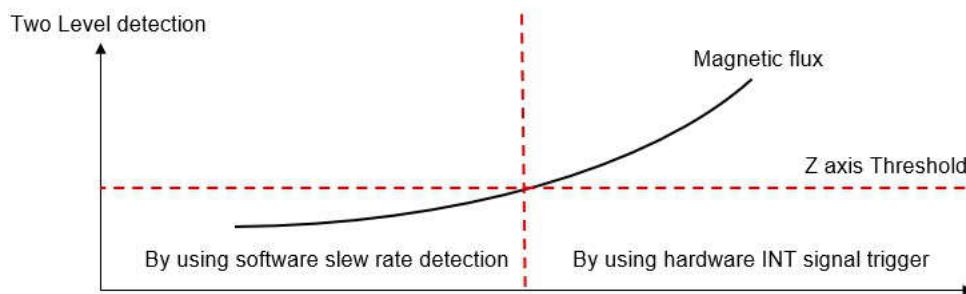
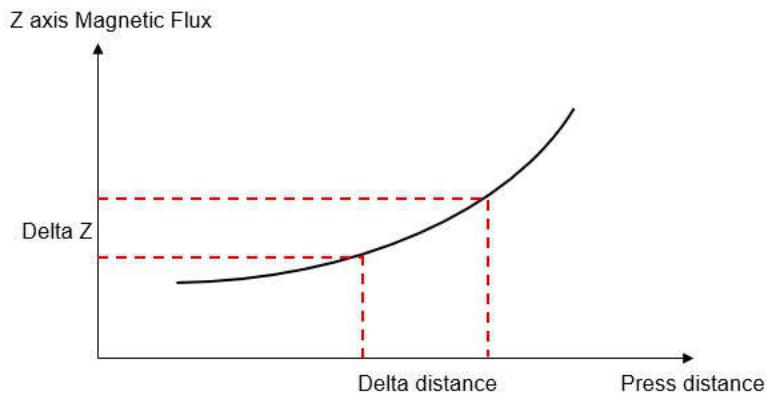


図 3-1. Z 軸押下動作における磁束の変化

3.2 ソフトウェアによるスルーレート検出機能

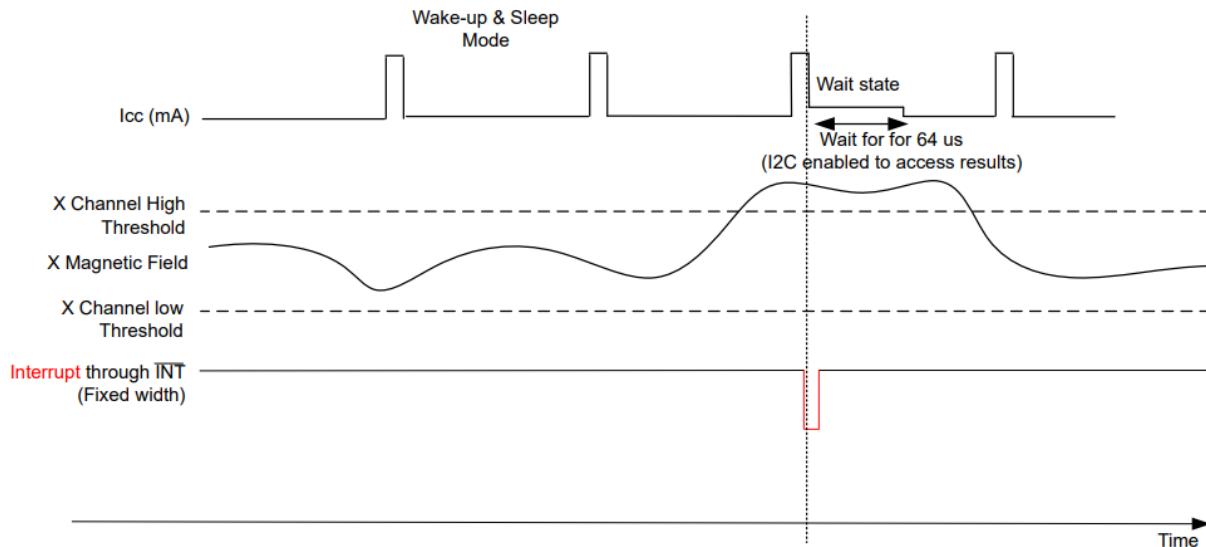
押下動作が始まると、ホール効果センサは継続的に磁界を監視し、それをマイコンに送信します。マイコンが、2 つまたは複数のサンプル間の磁束の差が設定値よりも大きいことを検出すると、マイコンは Z 軸がすでに押されていることを示すフラグを設定します。この第 1 段階の押下検出は、ソフトウェアによって実現されます。

ソフトウェアのしきい値は、ユーザーが各種のシステムに合わせて手動で調整できます。たとえば、ジョイスティック内のマグネットが異なる場合や、ジョイスティックと 3D ホールセンサ間の距離が異なる場合、3D リニアホールセンサで振幅応答が異なる可能性があります。設定値は、シミュレーションや実験結果によって定義できます。図 3-2 に、ソフトウェア検出機能の概要を示します。


図 3-2. ソフトウェア検出方式

3.3 ハードウェアによるしきい値検出および割り込み

ユーザーがゆっくり押下した場合、2つまたは複数の変換結果間の振幅差がソフトウェアのしきい値を超えない場合があります。この場合、押下操作を迅速に検出するようにするために、第2レベルのハードウェアによる検出が必要です。Z軸の磁束振幅がハードウェアのしきい値を超えた時に、TMAG3001 レジスタに磁束スレッショルドを設定します。ホール効果センサは、INT ピンを使用して割り込み信号を生成し、この信号がマイコンの GPIO に取り込まれます。要望があれば、このスレッショルド交差を I2C 通信経由で送信して、磁気のしきい値を超えたことを示すことも可能です。図 3-3 に、ハードウェアによる割り込み機能の概要を示します。


図 3-3. ハードウェア検出方式

3.4 ラッチ方式

ソフトウェアまたはハードウェアによるしきい値がトリガされると、TMAG3001 はインジケータとして出力フラグを生成します。実際の用途では、ジョイスティックをいったん押すと、Z 軸押下が維持されている限り、システムは X 軸および Y 軸の情報を必要としません。ボタン押下が開放されるまで、ホール効果センサからの新しい X 軸または Y 軸出力データはすべて無視して、Z 軸の変換結果のみに注目します。

この例では、TI のホールセンサレジスタの MAG_CH_EN 機能を使用して、押下動作中の Z 軸のみの変換値を有効化しています。これにより、3D リニアホールセンサでマイコンに対する Z 軸情報のみを更新できます。各軸の変換値を追加するごとに、センサの合計会話時間が加算されるため、この間に Z 軸でのみサンプリングを行うことで、X 軸および Y 軸のトラッキングを復元するためのシステム応答時間を改善することができます。

ボタンの押下前に、X 軸と Y 軸の位置を確実に追跡するため、アレイを使用してバッファを作成し、プログラムが割り込み機能を開始するすぐに X 軸と Y 軸の情報を保存します。バッファ内の数値は、オフセット値をさらに減らすため、X 軸および Y 軸の変換値として使用されます。

3.4.1.2 レベル検出方式の実装

2 レベル検出方式の実装については、TMAG3001 を例として、以下に詳述します。

1. ジョイスティックを押下して Z 軸の磁束の変化を取得します
この手順は、ハードウェアによる検出のための正しいしきい値の設定のほか、ソフトウェア検出のための設計手順としても使用されます。
2. TMAG3001 の THR_Config_3 ジスタまたは TMAG5173 の Z_THR_Config を使用して、Z 軸に対応するしきい値を設定します。
しきい値を大きくすると、Z 軸の押下距離が長くなり、X 軸と Y 軸のオフセットも大きくなります。しきい値を小さくすれば、Z 軸の押下距離は短くなりますが、Low に設定することで誤ったトリガが生じる可能性があります。
3. INT_CONFIG_1 4-2 ビットに 1h を書き込むことで、INT ピンの割り込み信号を設定します。
INT ピンは、マイコンに信号を送信し、磁束がすでしきい値にを超えていることを示します。
4. 通常の動作中、3D リニアホール効果センサは、ユーザーの設定に基づいて、連続サンプルモードまたはトリガサンプルモードで動作します。マイコンは、換算数値に基づいてスルーレートまたは絶対変化値を計算し、しきい値を超えたかどうかを判定します。
5. ハードウェアのしきい値またはスルーレートが設定値を超えると、デバイスは割り込みモードまたはラッチモードに移行します。これまでの X 軸と Y 軸が直ちに配列に記録され、MAG_CH_EN ~4h は 4H に設定されます (Z 軸磁束のみを変換)。割り込みがクリアされた後、メイン関数は通常動作モードに戻り、MAG_CH_EN を 7h に設定します (3 軸変換をすべて有効化)。

図 3-4 に、提案する検出方法の詳しい実装フローチャートを示します。

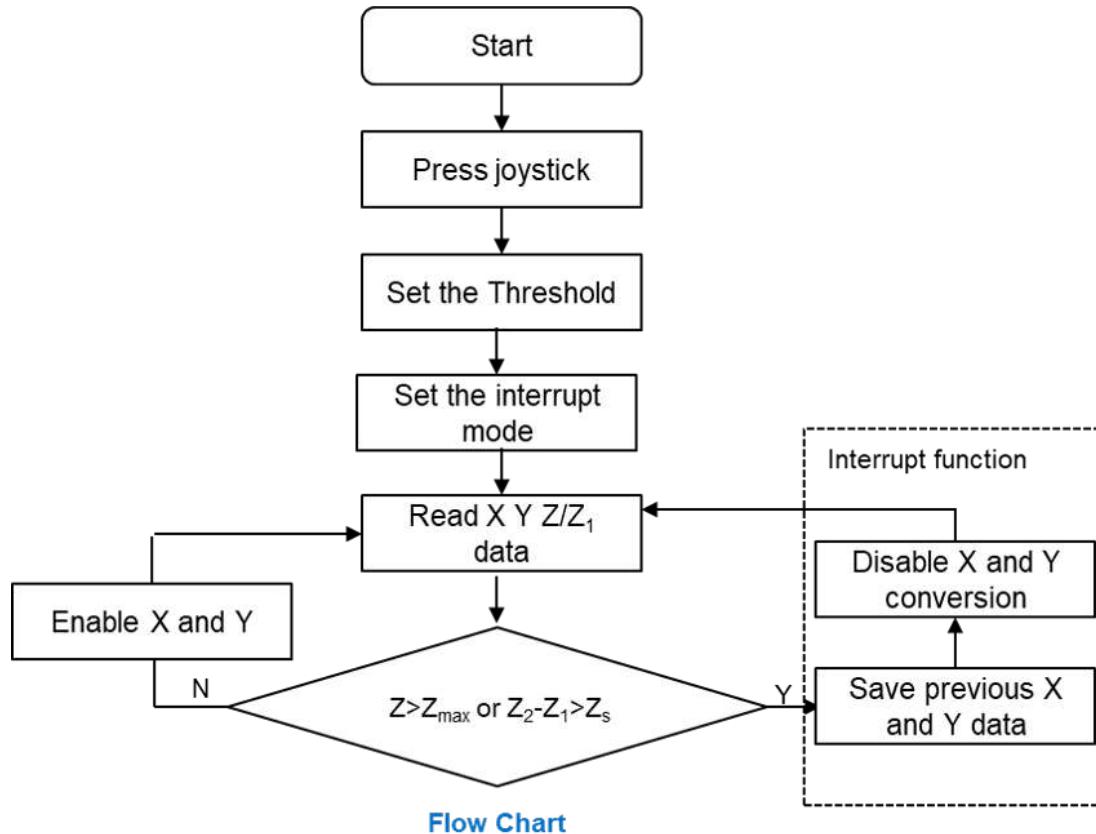


図 3-4. 提案手法のフローチャート

3.5 テスト結果

提案する手法の性能をテストするために、お客様用の最終製品とカスタマイズされたジョイスティックを基本プラットフォームとして使用したテスト環境を実装しました。TMAG3001EVM は、ジョイスティックと TI-SCB ボードに直接接続されています。ホストコンピュータと通信するために、TI-SCB ボードを XDS110 に接続しました。このソフトウェア環境では、TI CCS を使用しています。お客様の情報を保護するため、ここではお客様情報の写真は表示されません。

コードですが、このアプリケーションノートは最初に [TMAG3001 サンプルコード](#) を使用し、その後、提案する方法を実現できるように変更済の関連コードをコードに追加します。

提案するアルゴリズムの目的は、ユーザーがジョイスティックを押下したときに X と Y のオフセットを減らすことです。アルゴリズムのパフォーマンスを検証するために、押下動作後のオフセット値をアルゴリズムありとアルゴリズムなしで比較します

1. ジョイスティックを押下せずに傾けて、X 軸と Y 軸の最大値と最小値を記録します
2. 押下でジョイスティックを傾け、X 軸と Y 軸の最大値と最小値を記録します。
3. 提案する 2 レベルの検出方法をコードに追加します
4. 押下でジョイスティックを傾け、X 軸と Y 軸の最大値と最小値を記録します。
5. ラッチャレイ内バッファデータを読み取ります

手順 1 と手順 2 を使用して、機械的誤差を証明します。手順 2 と手順 5 を比較することで、提案する手法の性能を検証することができます。

[図 3-5](#) および [図 3-6](#) に手順 1 と手順 2 の結果をそれぞれ示します。これらの図に示すように、サムスティックを押下した後の最小値は -0.4mT から -4.5mT に減少しました。これは、ジョイスティックと TMAG3001 との間に重大な機械的誤差があることを示しています。さらに、これはデバイスが X 軸に沿って回転することを意味しています。

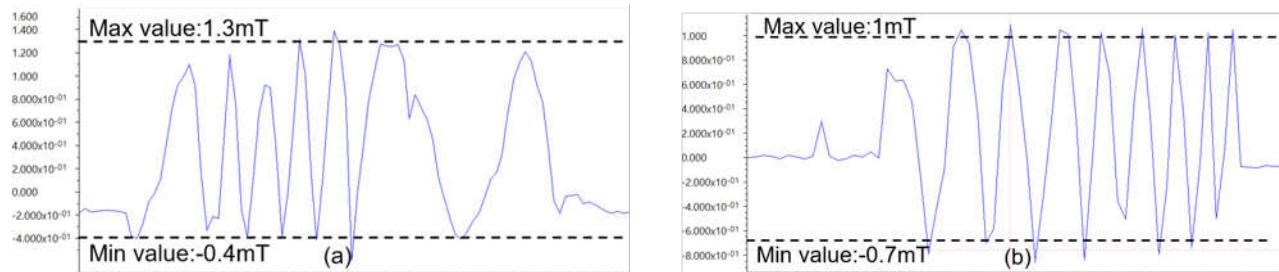


図 3-5. Y 軸と X 軸のパフォーマンス(押下しない場合)

押下動作によって引き起こされるオフセットの観点から、-4.5mT は操作しない場合の最大のオフセットと見なすことができます。

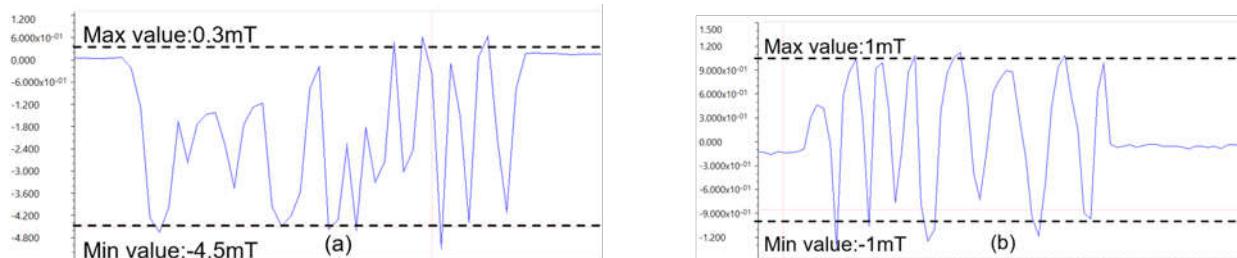


図 3-6. Y 軸と X 軸のパフォーマンス(押下した場合)

手順 3、手順 4、手順 5 では、CCS のデュアルタイム機能のリフレッシュ速度が比較的遅いため、[図 3-7](#) に示すように、バッファアレイで変換数値を読み取ります。この図の値は、トリガー前の最後の Y 軸変換値を参照しています。

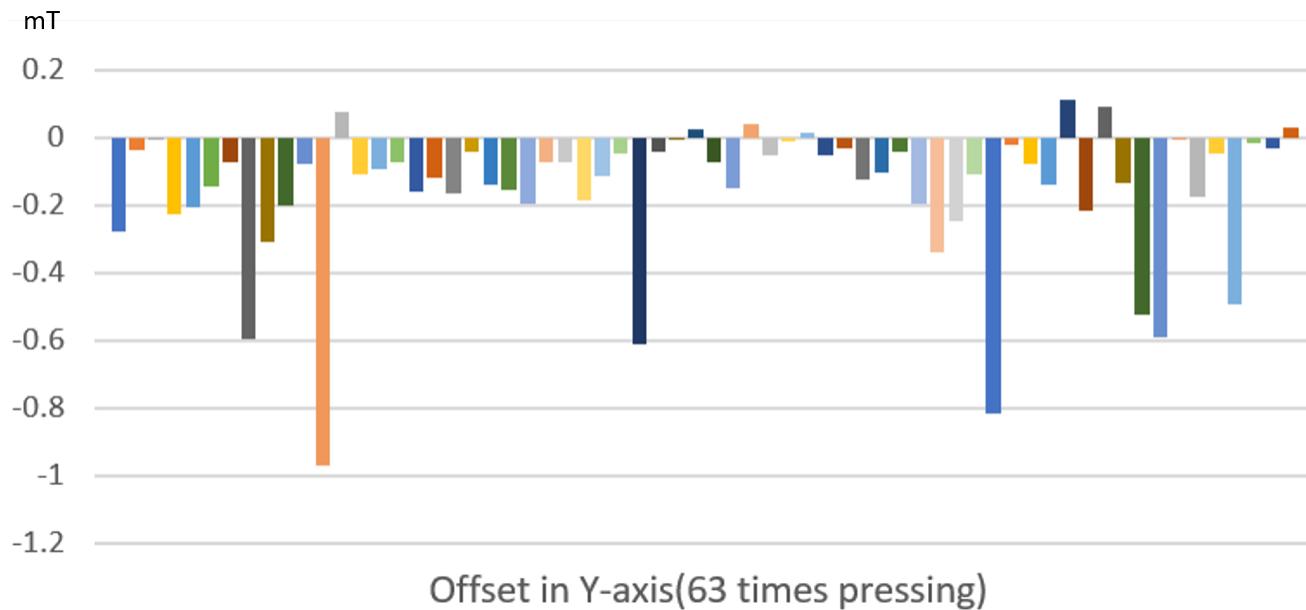


図 3-7. Y 軸におけるオフセット結果

検出範囲を基準値として使用し、アルゴリズムありとアルゴリズムなしの平均誤差を計算すると、次の計算結果が得られました。Y 軸は機械的誤差の影響が最も大きく、オフセットも最も大きいので、計算時の基準値として使用しました。アルゴリズムなしの Y 軸の平均誤差は $4.5/1.7\text{mT}$ 、265% でした。アルゴリズムを実装した後、アレイの平均誤差は -0.158mT でした。したがって、平均誤差は $0.158/1.7\text{mT}$ で、8.8% となります。

この 2 レベルの検出方式を通じて、平均誤差が 265% から 8.8% に減少することがわかりました。このことから、TI の 3D リニアホールセンサをより的確に活用するための効果的で実装しやすいアルゴリズムが提供されることになります。

4 まとめ

3D リニアホール効果センサのボタン押下イベントを検出するために 2 レベルの磁束変化検出アルゴリズムを実装しているため、意図しないユーザー入力に起因した X 軸と Y 軸による検出の可能性が低減されます。実験では、このアプローチにより、合計誤差の割合を 265 % から 8.8% に減らすことができました。この改善により、ジョイステイックの位置の追跡が安定し、エンドユーザーの操作品質が向上します。

TI には、成熟した製品シリーズだけでなく、3D リニアホール効果センサも取り揃えています。性能やパッケージ情報の詳細については、[表 4-1](#) を参照してください。

表 4-1. TI 3D ホール エフェクト センサ

デバイス	概要
TMAG5170	商用グレードの 3D リニアホール効果センサ、SPI 搭載、CORDIC 内蔵、1/4 度単位の分解能。
TMAG5170-Q1	1/4 度単位の分解能を実現する SPI 搭載、CORDIC 内蔵、車載グレードの 3D リニアホール効果センサ
TMAG5170D-Q1	SPI 搭載、CORDIC 内蔵、1/4 度単位の分解能を実現、車載グレードのデュアルダイ 3D リニアホール効果センサ
TMAG5173-Q1	1/16 度単位の分解能を実現、I2C 搭載、CORDIC 内蔵、車載グレードの 3D リニアホール効果センサ
TMAG5273	商用グレードの 3D リニアホール効果センサ、I2C インターフェース搭載、CORDIC 内蔵、1/4 度単位の分解能
TMAG3001	商用グレードの 3D リニアホール効果センサ、1/16 度単位の分解能、ウェークアップ検出機能、I2C インターフェース搭載、CORDIC 内蔵

5 参考資料

- ・テキサス インスツルメンツ、『[TMAG5173-Q1 I2C インターフェイス搭載、低消費電力、リニア 3D ホール効果センサ](#)』データシート
- ・テキサス インスツルメンツ、『[ホール効果センサによるジョイスティックおよびレバー設計](#)』、ユーザーガイド
- ・テキサス インスツルメンツ、『[ホール効果センサによる回転運動用の絶対角度測定](#)』アプリケーション ブリーフ
- ・テキサス インスツルメンツ、[TMAG3001 低消費電力、3D リニアおよび角度ホール効果センサ、I2C インターフェイスおよびウェイクアップ検出機能搭載、WCSP パッケージ](#)データシート

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默示保証、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、明示的または默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](#) 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated

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默示保証、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、明示的または默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 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated