

## Design Guide: TIDA-060039

誘導式タッチおよび磁気ダイヤル非接触ユーザー インターフェイス  
スのリファレンス デザイン

## 概要

このリファレンス デザインは、誘導性センシングとホール効果センシングの各技術を使用して、ヒューマン マシン インターフェイスを実現します。誘導性センシング デバイスは、シームレスな応答面に 8 個のタッチ ボタンを作成する目的で使用しています。一方、ホール効果センサは、回転可能な磁気ダイヤルの作成に使用しています。このダイヤルは、追加のボタンとして使用することもできます。誘導性センシング タッチ ボタンを使用すると、ボタンの押下の有無を判定するために押下の力を使用する高信頼性デザインを実現できます。これにより、手袋を着用したままタッチ ボタンを使用でき、ボタン表面の汚れや損傷などの環境要因も無視できます。ホール センサ ダイヤルは非接触方式で回転するため、ポテンショメータやロータリー エンコーダなど、従来の接触ベースの実装に比べて摩擦や損傷を改善できます。

## 参照情報

TIDA-060039	デザイン フォルダ
SCB	デザイン フォルダ
LDC3114-Q1、TMAG5273、DRV2605	プロダクト フォルダ
TLV755P、TCA9534、PCA9543A	プロダクト フォルダ

## 特長

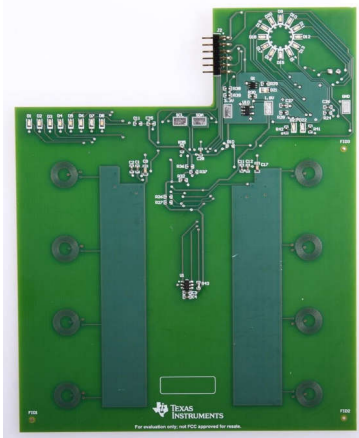
- シームレスなタッチ検出の応答面
- 複数の応力検出タッチ ボタン
- 磁気ダイヤル
- 1 つのデバイスで押下とダイヤル回転が可能
- CORDIC アルゴリズムを内蔵

## アプリケーション

- 車載用センター情報ディスプレイ
- 家電製品向けユーザー インターフェイスとコネクティブ モジュール
- 換気扇フード
- 食器洗い機
- オープン
- 侵入用途 HMI パネル
- ATM (現金自動預け払い機)



テキサス・インスツルメンツの™ E2E サポート エキスパートにお問い合わせください。



## 1 システムの説明

ヒューマン マシン インターフェイスは多くのアプリケーションに共通に見られるもので、通常はボタンやダイヤルを実装するための電気機械部品を必要とします。多くのプッシュ ボタンは機械式スイッチを使用しており、ボタンを押して接続する電氣的接点を持っています。この接点は、時間が経つと磨耗や破損により故障する恐れがあります。このようなスイッチを採用したボタンを実装すると、産業用や車載アプリケーションのような、より過酷な環境で動作する用途では、ボタン表面を密閉する必要も生じます。そうしないと、機械式ボタン内にほこりや泥が入り込む可能性があり、製品の寿命がさらに短くなる恐れがあるのです。

ダイヤルのような他の HMI 部品も、磨耗や破損に悩まされています。ダイヤルは従来、エンコーダまたはポテンシオメータを使用して、入力の回転変化を判定していました。これらの部品には機械的部品があり、プッシュ ボタンと同様に時間の経過とともに故障する恐れがあります。

このリファレンス デザインでは、誘導性センシングを使用してシームレスなタッチ ボタンを実装し、非接触実装を実現すると同時に、可変フォースタッチ機能も実現しています。さらに、ホール効果センシングを使用して非接触型ダイヤルを実装し、ポテンシオメータやロータリー エンコーダなどのデバイスで発生する磨耗や破損を低減します。このデザインには、ボタン表面や回転式のプッシュ ボタン ダイヤルを実現する 3D プリントのハウジングが含まれています。

ボタンやダイヤルは、多くのヒューマン マシン インターフェイスに共通する部品であるため、これらのテクノロジーはさまざまなアプリケーションで使用できます。車載アプリケーションの場合、誘導性タッチ ボタンを使用すると、手袋を着用した状態でも接触する力に応答するボタンを実現できます。さらに、さまざまな面にボタンを配置できるので、設計全体のフレキシビリティが向上します。これらのメリットは、産業用 HMI や家電製品などへの実装でも同じように当てはまります。

## 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。

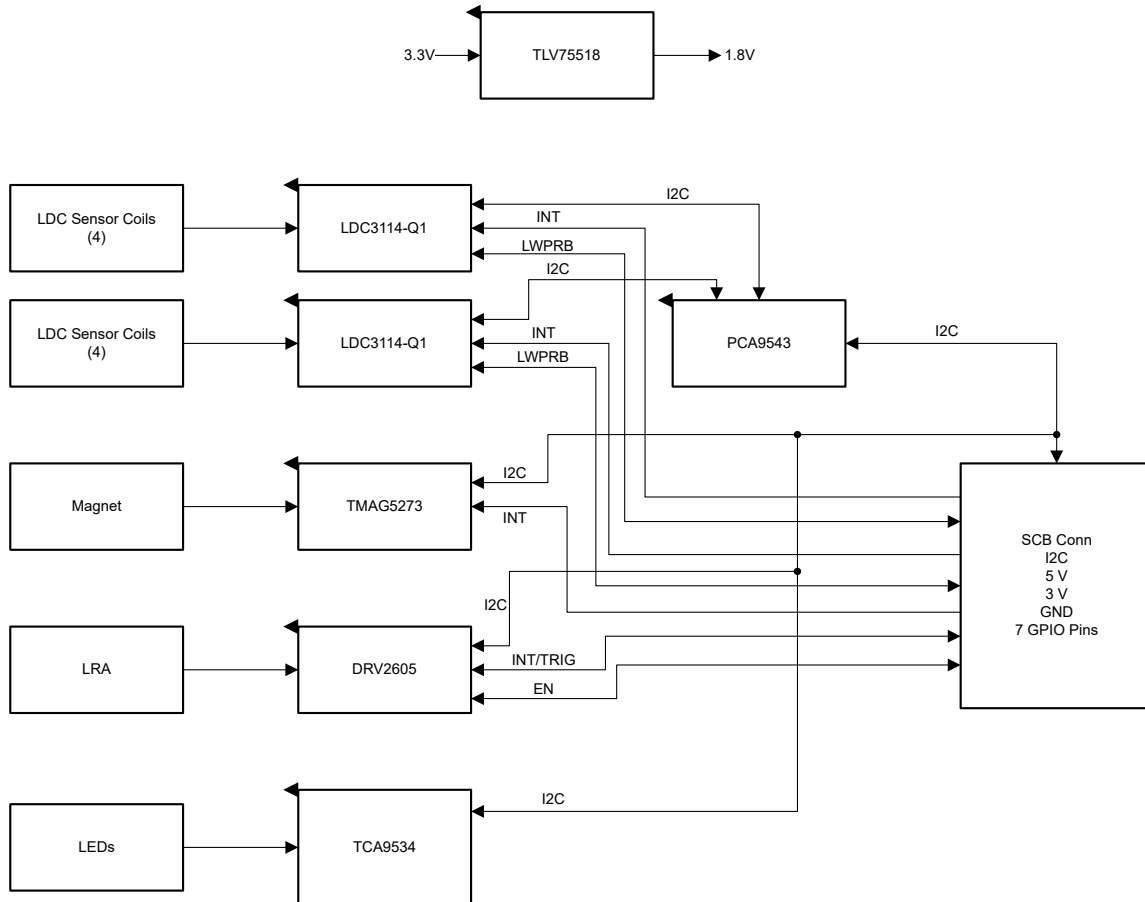


図 2-1. TIDA-060039 のブロック図

センサ制御ボード (SCB) は、このリファレンス デザインへの電力供給と制御を行います。SCB は USB ケーブルから電力を受け取り、リファレンス デザイン ボードに 5V と 3.3V を供給します。このリファレンス デザインのハウジングには、8 個の誘導性タッチ ボタンと 1 個の磁気式プッシュダイヤルがあります。タッチ ボタンには 3 つの異なる動作モードがあり、ダイヤルを押し込むことで変更できます。デフォルト モードでは、押されたボタンに対応する LED にデジタル出力を行います。2 番目のモードでは、特定のボタンがどれだけ強く押されたかを点灯する LED の数で表示します (強く押されるほどより多くの LED が点灯する)。3 番目のモードは PC に接続し、ボタンの半分から GUI にデータをストリーミングします。すべての動作モード中、磁気ダイヤルの角度を読み取って、LED の円形リングに表示します。

## 2.2 設計の考慮事項

### 2.2.1 誘導性タッチ ボタン

LDC3114-Q1 は、このリファレンス デザインのタッチ ボタンの実装に使用する誘導性センシング IC です。この基板にはこのデバイスが 2 個実装されており、それぞれが 4 個のボタンを駆動します。LDC3114-Q1 は、誘導性コイルを使用して金属ターゲットの変化を判定します。金属ターゲットにかかる力によってボタン ケースにたわみが生じ、この変形が IC によって測定され、ボタンの押下を判断します。さらに、LDC3114-Q1 にはベースライントラッキング アルゴリズムが搭載されており、ボタンの表面を監視して、温度の変化や表面の損傷などの環境要因に適応できます。このデバイスは、ボタンのデータが指定されたスレッシュホールドを超えたときにトリガされるデジタル出力も備えています。LDC3114-Q1 は変更可能な I2C アドレスを持っていないため、I2C スイッチ (PCA9543) を使用して両方のデバイスと通信します。これにより、各デバイスはボタン表面を監視するベースライン アルゴリズムを連続的に実行できます。

誘導性タッチ ボタンを実装するには、センサ コイルから一定の距離にある金属ターゲットが必要です。誘導性センサの一般的な設計理論以外にも、誘導性タッチ ボタンを設計するときに意識する必要のある設計上のいくつかの重要な検討事項があります。一部のボタン設計では、目的のタッチ面が金属ではありません。この場合、プラスチックなどの非導電性表面の裏側に、その設計で金属ターゲットとして機能する薄い金属プレーンを追加できます。センサ コイルと金属ターゲットの間の距離は、アプリケーションで要求されるボタン感度を得るための重要な要素です。このための一般的なガイドラインは、距離をコイル直径の 3%~20% の範囲内に維持することです。これにより、金属ターゲットが変形したときにセンサ コイルに触れないようにしながら、高い力感度を得られる位置に保持することができます。金属ターゲットがセンサ コイルから遠ざかると、ボタンの感度が低下し、適切なボタン出力を得るためにより多くの力が必要になる可能性があります。ターゲット距離は設計における重要な部分なので、コイル直径も設計の重要なパラメータになります。多くの場合このパラメータは、PCB 上に実装されるセンサ コイルのスペースに制約されます。この状態から、巻線数、パターン幅、パターン間隔、層数など、その他の要因がすべてコイル設計全体に影響します。パターンの幅と間隔は PCB 製造プロセスによって制限される可能性がありますが、インダクタ コイルの直列抵抗を変更したり、巻線数をより多くする場合にも役立ちます。内側の巻線は磁界にそれほど影響を与えないため、一般的には、巻数を調整して誘導性コイルの内径を 20~80% に設定することを推奨します。ただし、ボタン アプリケーションの場合、ターゲットの距離が十分近く、内側のコイルも役に立つため、巻き数を増やして内径を小さくすることを設計する際に検討することが可能です。ボタン設計の詳細については、『[HMI ボタン アプリケーション用の誘導性タッチ システム設計ガイド](#)』を参照してください。

このリファレンス デザインでは、ボタンの機械的構造を 3D プリントしたハウジング、PCB、金属テープで構成し、ターゲット表面を実現しています。この設計では、ボタン用の PCB のスペースは問題とならないため、コイル設計では直径を 8mm としました。残りのコイル パラメータの決定には、[LDC カリキュレータ ツール スプレッドシート](#)を使用しました。パターンの幅と間隔は 5 ミル、層ごとの巻き数は 8 としました。これにより、コイルの内径は 4mm よりわずかに小さくなります。これは、コイルの充填率 (内径を外径で割った値) で約 50% になります。ほとんどのボタン設計では、コイルの充填率を最小化することで感度を高めることができますが、有益な効果を得るには、ターゲットの表面をコイルのすぐ近くに配置する必要があります。それ以外の場合は、充填率を 20%~80% に維持して、設計の Q 値を最大化するのが最善です。これは 2 層基板なので、コイル設計の層数は 2 に設定されています。このセンサ設計の容量として 220 pF を選択し、周波数を 8.396MHz とします。

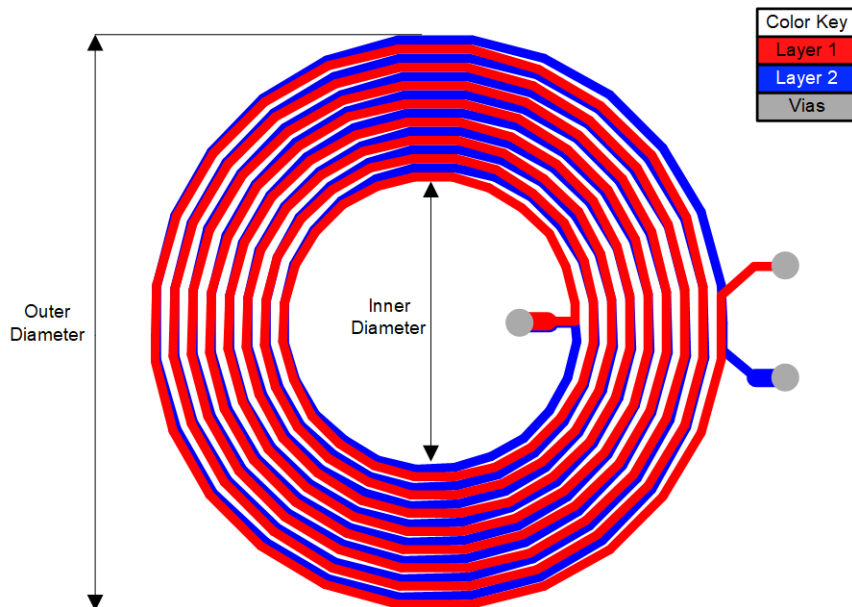


図 2-2. TIDA-060039 LDC センサ コイルのレイアウト

コイルの直径に基づき、ターゲットとコイルの距離を 0.8mm とします。これにより、ターゲットはコイル直径の 3%~20% の範囲内 (推奨) に十分に収まり、ボタン表面に力が加わったときに高い感度が得られます。カリキュレータのスプレッドシートでは、ターゲットの距離を入力して設計の選択肢を再確認できます。ターゲットが 0.8mm の場合、センサ周波数は 11.081MHz、Q 値 は 26 となります。スプレッドシートには、いずれかの最終パラメータがデバイスの範囲外である場合に警告が表示されますが、この場合、警告は表示されません。

表 2-1. LDC コイル カリキュレータの出力

説明	記号	値	単位
ターゲットなしの総インダクタンス	$L_{TOTAL}$	1.604	$\mu H$
センサ動作周波数、ターゲットなし	$f_{RES}$	8.396	MHz
ターゲットなしの $R_p$	$R_p$	3.19	k $\Omega$
Q 値	Q	37.00	
自己共振周波数 (推定値)	SRF	62.831	MHz
目標距離との関係	D	0.800	mm
ターゲット相互作用によるセンサ インダクタンス	$L'$	0.921	$\mu H$
センサ周波数とターゲットとの相互作用	$f_{RES}'$	11.081	MHz
ターゲットとの相互作用がある場合の $R_p$	$R_p'$	1.68	k $\Omega$
ターゲットありの場合の Q 値	Q'	26.0	

ボタン表面は 3D プリントされているため、ボタン設計で必要とされるスペーサーも、独立したスペーサー材料ではなく、ボタン表面に含まれています。スタンドオフとボタンの表面はどちらも厚さ 1mm で、多少の柔軟性があり、必要に応じてターゲットの高さを設定可能です。次に、金属テープをスタンドオフの間のボタン表面に付け、ボタン表面に力が加わったときに所望の領域が変形するようにします。ターゲットは、テープの厚さによってセンサ コイルから約 0.8mm 離れた場所に配置されます。

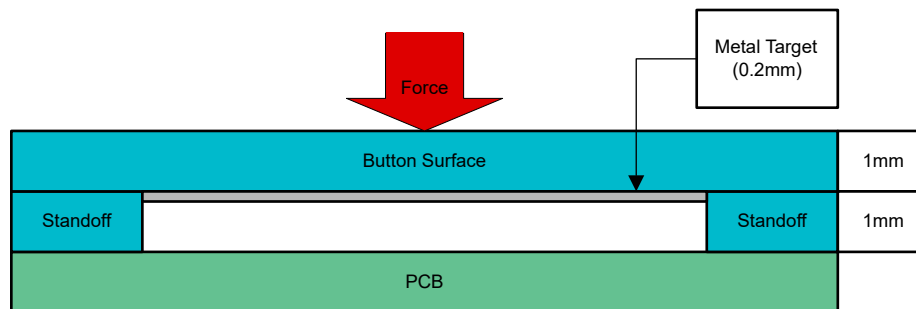


図 2-3. 誘導性タッチ ボタン スタックアップ

ボタン表面の材質は、金属ターゲットの変形量に影響を及ぼします。硬い材料や力を吸収する材料ではたわみが少なく、ボタン押下を検出するためにより多くの力が必要になります。これは、ボタン表面の厚さを考慮する場合にも関係してきます。LDC カルキュレータ ツール スプレッドシートには、材料のヤング率とポアソン比がわかっている場合に、材料のたわみを決定するためのタブがあります。この設計はナイロン 12 を使用して 3D プリントされているため、表面に 2N の力を加えると約 20 $\mu$ m のたわみが発生すると予想されます。そもそも、ターゲットがセンサに非常に近いため、このボタン設計ではこれは十分なたわみ量です。

ボタン表面の内側に金属テープまたは小さな金属ターゲットを使用することで、ボタン製造時に金属以外の材質を使用することができます。性能は、ターゲットに使用する金属によって異なります。ボタンの感度を最大限に高めるには、導電性の高い金属を使用します。このため、導電性が高く、ボタン設計のスペーサー内に収まるように簡単に切断できる銅テープとアルミニウムテープは、どちらも有力な選択肢です。別の方法は、ボタン表面に金属層を取り付け、図 2-4 に示すように金属層と PCB センサとの間にスペーサーを配置することです。ボタン設計の詳細については、『HMI ボタン アプリケーション用の誘導性タッチ システム設計ガイド』アプリケーション ノートを参照してください。

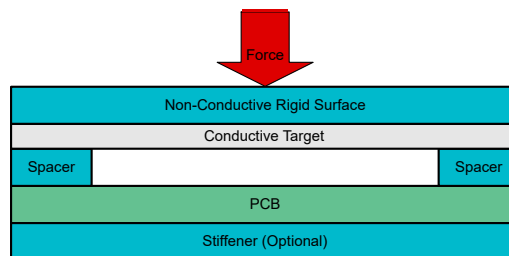


図 2-4. 非導電性タッチ ボタンの代替スタックアップ例

## 2.2.2 センサ コイルの配置

LDC3114 では COM ピンを追加し、センサ コンデンサをコイルの隣ではなくデバイスの近くに配置しているため、センサ コイルを IC の隣ではなく離れた場所に配置できます。その結果、コイルの EMI 応答が改善され、ほとんどの場合は追加のフィルタリングが不要になります。センサ コイルが IC から異なる距離に配置されるため、パターンの長さが異なり、コイルごとに直列抵抗値がわずかに異なります。その結果、センサごとに共振周波数がわずかに異なる結果になる可能性があります。ボタン アプリケーションはベースライントラッキング アルゴリズムを使用するので、チャンネルごとに正確な測定値を設定する必要はなく、データの開始値よりもデータの変化に注意を払う必要があります。

## 2.2.3 複数の LDC からのデータ収集

LDC3114 は同じ I2C アドレスを使用するため、I2C マルチプレクサを使用して各デバイスと個別に通信します。各 LDC3114 はデフォルトの 40SPS で 4 個のセンサ コイルを駆動します。タッチ ボタンは高速動作を必要としないため、サンプル レートを上げる必要がなく、各デバイスのデータをポーリングしてもタッチ ボタンのレイテンシの問題は発生しません。バッテリー動作アプリケーションでは、I2C データを使用する代わりに、サンプル レートを下げて LDC3114 のデジタル出力を監視できます。このリファレンス デザインでは、メイン コントローラに接続するコネクタの GPIO ポート数が制限されていたため、代わりに各デバイスの OUT レジスタからデジタル出力が読み取られます。

## 2.2.4 磁気ダイヤルの実装

TMAG5273 は、この設計でダイヤル実装に使用する 3D ホール効果センサです。3D デバイスであるため、磁界の角度と大きさを検出でき、ダイヤルのプッシュ ボタン機能を可能にします。このデバイスには CORDIC エンジンが内蔵されているため、角度位置検出機能をこのアプリケーションに簡単に実装できます。磁界の角度はデバイス レジスタ経由で通知されるため、MCU による計算は不要です。このアプリケーションで使用できる類似の 2 つの代替品は、TMAG5170-Q1 と TMAG5173-Q1 です。どちらのデバイスも、類似の機能を実現していると同時に、車載認定オプションも提供しています。これらのデバイスはすべて CORDIC エンジンを含んでおり、レジスタを使用して磁界の角度と大きさを報告します。これら 3 つの部品で多少異なるのは、TMAG5170-Q1 と TMAG5173-Q1 は高精度デバイスであり、通信にそれぞれ SPI と I2C を使用しているのに対し、TMAG5273 は I2C 経由で通信を行う汎用低消費電力デバイスであるという点です。このリファレンス デザインでは、角度を表示するために高解像度を必要とせず、メイン通信プロトコルとして I2C を使用しているため、TMAG5273 を選定しました。車載認定が必要な場合は、代わりに TMAG5170-Q1 または TMAG5173-Q1 を使用できます。

このデバイスで使用する磁石は、直径 1/4 x 厚さ 1/8 インチの N42 丸径磁石です。この磁石を選択したのは、この磁石の磁力がフルスケール出力範囲の大部分に対応する入力になれるからです。これにより、設計に適した距離で使用した場合、小型で容易に入手できるという特徴はそのまま、デバイスの SNR 性能を改善することができます。

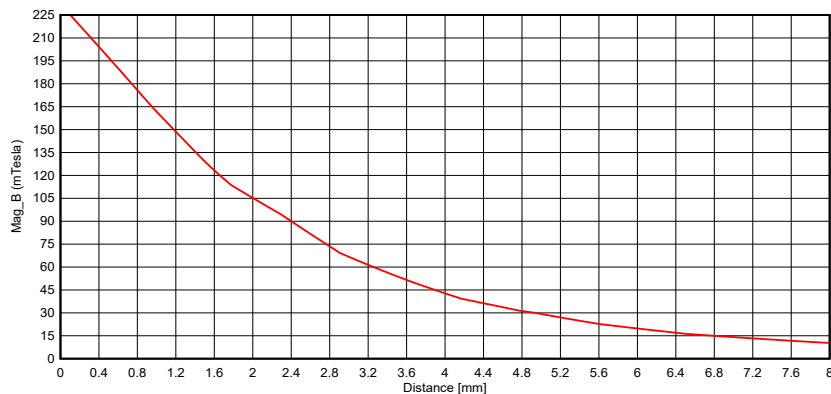


図 2-5. 磁界強度の距離依存性

ダイヤルのプッシュ機能は、設計時にバネを追加することで実現しています。ほとんどのバネは強磁性で磁界と相互作用しますが、この設計で使用している磁石の磁界は十分に強いため、特定の非強磁性のバネでなくても実装が可能です。ただし、この設計では磁界強度の低下により SNR も低下します。これは、磁気測定で平均化を行うことで解消されます。TMAG5273 にはレジスタ設定があり、センサ データの平均化の方法を変更することができます。このアプリケーションでは高速測定は必要ないため、一貫した結果を得るために最大平均化を選択します。あるいは、平均化する値を必要に応じて小さくし、デバイスのスリープ タイマを使用して、低消費電力アプリケーションのためのサンプリングの間、デバイスを低消費電力モードにすることもできます。

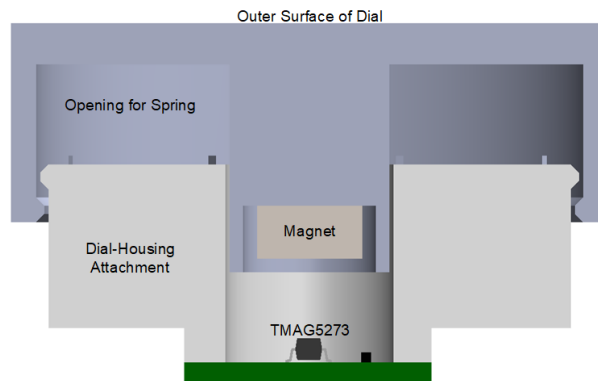


図 2-6. 磁気ダイヤルのプッシュ ボタンのスタックアップ

磁石とセンサの間の距離と磁石の特性が判明していれば、**角度誤差計算ツール**を使用して角度誤差を推定できます。ただし、このアプリケーションは高速なサンプリング レートを必要としないため、高いサンプル平均化が適用された **CORDIC** アルゴリズムを使用すると、ダイヤルの位置に関する十分正確な情報が得られます。

### 2.2.5 CORDIC アルゴリズム

内蔵の **CORDIC** アルゴリズムは、2 つの磁気軸を使用して角度データを決定します。また、線形磁気軸のデータを使用し、外部アルゴリズムで角度を計算することもできます。内部 **CORDIC** アルゴリズムを使用するには、デバイスの **SENSOR\_CONFIG\_2** レジスタの **ANGLE\_EN** ビットを使用して目的の磁気軸を選択する必要があります。この設計では、**X** 軸と **Y** 軸を使用して磁石の角度を決定するので、ビットを **0x1** に設定します。これに加えて、予測される磁界強度に基づいて磁気センシング範囲を設定することが重要です。設定が完了したら、**ANGLE\_RESULT\_MSB** レジスタと **ANGLE\_RESULT\_LSB** レジスタを読み取るだけで、**CORDIC** アルゴリズムから磁石の角度を求めることができます。最後に、**CONV\_AVG** レジスタ設定を変更することで、デバイスのサンプリングに平均化が適用されます。これによりデバイスの **SNR** 性能を向上することができ、**CORDIC** 出力からより正確な角度情報が得られます。

## 2.3 主な使用製品

### 2.3.1 LDC3114-Q1

**LDC3114-Q1** は、パネルの裏に配置した小さいプリント基板 (**PCB**) 上に実装できるコイルを使って導電性ターゲットの微小なたわみを測定することにより、さまざまな材料でヒューマン マシン インターフェイス (**HMI**) 用タッチ ボタンの設計を可能にする、誘導性センシング デバイスです。この技術を使うと、インダクタンス値を表す生データを得ることができるため、車載、民生、産業用途での金属ターゲットの高精度リニア位置検出に使えます。誘導性センシング ソリューションは、湿気にも非導電性汚染物質 (油、汚れなど) にも反応しません。

**LDC3114-Q1** のボタン モードは導電性ターゲットの変形を自動修正できます。**LDC3114-Q1** は、よく整合されたチャネルを備えているため、温度および機械的ドリフトなどの環境条件および経時的変化を補償できる差動およびレシオメトリック測定が可能です。**LDC3114-Q1** は、バッテリー駆動アプリケーションの電源オン / オフ ボタンまたは位置センサ用の超低消費電力モードを搭載しています。

### 2.3.2 TMAG5273

**TMAG5273** 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低消費電力のリニア 3D ホール効果センサです。このデバイスは **X**、**Y**、**Z** 軸に 3 つの独立したホール効果センサを内蔵しています。高精度アナログ信号チェーンと 12 ビット **A/D** コンバータにより、磁界のアナログ測定値をデジタル値に変換します。**I2C** インターフェイスは、いくつもの動作 **VCC** 範囲に対応するとともに、低電圧マイクロコントローラとのシームレスなデータ通信を行います。このデバイスには温度センサが内蔵されており、特定の磁界における熱履歴の確認または温度補償の計算など、各種システム機能に利用できます。

**TMAG5273** は、**I2C** インターフェイスを使用して、磁気軸と温度測定の自由な組み合わせに構成できます。さらに、このデバイスは各種の電力オプション (ウェークアップおよびスリープ モードを含む) を設定できるため、設計者はシステムレベルのニーズに基づいてシステムの消費電力を最適化できます。複数のセンサ変換方式と **SPI** 読み取りフレームにより、スループットと精度を最適化できます。専用の **INT** ピンは、低消費電力のウェークアップおよびスリープ モード時にシステム割り込みとして使用でき、マイクロコントローラが新しいセンサ変換をトリガするためにも使用できます。

内蔵の角度計算エンジン (**CORDIC**) は、軸上と軸外の両方の角度測定トポロジについて、**360°** の角度位置情報を提供します。角度の計算は、ユーザーが選択した 2 つの磁気軸を使用して行います。このデバイスは磁気ゲインとオフセット補正機能を搭載しており、システムの機械的誤差発生源による影響を緩和します。



### 2.3.3 DRV2605

DRV2605 デバイスは、ERM および LRA アクチュエータの非常に柔軟なハプティクス制御を、共有の I2C 互換バス上で行えるよう設計されています。この制御により、ホスト プロセッサはパルス幅変調 (PWM) 駆動信号を生成する必要がなくなり、コストのかかるタイマ割り込みやハードウェア ピンを低減できます。DRV2605 デバイスには包括的なライブラリが内蔵され、Immersion から ERM および LRA 用にライセンスされた 100 を超える効果が組み込まれているため、触覚波形をデザインする必要がありません。DRV2605 デバイスには Immersion 製の TouchSense 2200 ソフトウェアがライセンスされて内蔵されており、これには 2200 エフェクト ライブラリおよび 2200 オーディオから振動への変換機能が含まれています。さらに、リアルタイム プレイバック モードではホスト プロセッサがライブラリ プレイバック エンジンバイパスして、I2C 経由でホストから直接波形を送信できます。また、DRV2605 デバイスにはスマート ループ アーキテクチャが含まれており、LRA に加えて帰還最適化された ERM ドライブの自動共振駆動を簡単に行えます。この帰還によりオーバードライブとブレーキを自動的に行え、単純化された入力波形パラダイムが作成されるとともに、信頼性の高いモータ制御と、一貫したモータ性能が実現されます。この機能は、このリファレンス デザインで LRA を制御するために使用されます。

### 2.3.4 TLV75518

TLV755P は超小型、低静止電流の低ドロップアウトレギュレータ (LDO) で、優れたラインおよび負荷過渡特性で 500mA を供給できます。TLV755P は 1.45V~5.5V の入力電圧範囲に対応し、広範なアプリケーション用に最適化されています。コストとソリューションのサイズを最小限にするため、このデバイスは 0.6V~5V の範囲の固定出力電圧で供給され、今日のマイクロコントローラ (MCU) の低いコア電圧をサポートします。さらに、TLV755P は IQ が低く、イネーブル機能によりスタンバイ電力を最小化できます。このデバイスには、突入電流を低減するソフトスタートが内蔵されており、負荷に対して制御された電圧を供給し、スタートアップ時の入力電圧降下を最小化します。このデバイスは、シャットダウン時に出力をアクティブにプルダウンし、出力を迅速に放電して、既知のスタートアップ状態を確保します。

このリファレンス デザインは、このデバイスの 1.8V 出力オプションを使用して、LDC3114 デバイスとレベル シフトに電力を供給します。

### 2.3.5 TCA9534

TCA9534 は 16 ピン デバイスで、2 ライン双方向 I2C バス (または SMBus) プロトコル用に 8 ビットの汎用パラレル入出力 (I/O) 拡張機能を搭載しています。このデバイスは 1.65V ~ 5.5V の電源電圧で動作できるため、さまざまなデバイスで使用できます。このデバイスは、100kHz (標準モード) と 400kHz (高速モード) の両方のクロック周波数をサポートしています。TCA9534 をはじめとする I/O エクスパンダは、スイッチ、センサ、押しボタン、LED、ファン、その他の類似デバイス用に I/O を追加する必要がある場合に簡単なソリューションとして使用できます。このリファレンス デザインでは、これらのデバイスを複数使用して、ボード上の LED を制御します。

### 2.3.6 PCA9543

PCA9543A は、I2C バスで制御されるデュアル双方向変換スイッチです。SCL/SDA のアップストリーム ペアが、2 つのダウンストリーム ペア (チャンネル) に展開されます。プログラム可能な制御レジスタの設定により、個々の SCn/SDn チャンネルまたは両方のチャンネルを選択できます。2 つの割り込み入力 (INT1 ~ INT0、各ダウンストリーム ペアに 1 つ) を備えています。1 つの割り込み出力 (INT) が 2 つの割り込み入力の論理積として機能します。アクティブ LOW のリセット入力 (RESET) により、PCA9543A はダウンストリームの I2C バスの 1 つが LOW 状態に固着した状況から回復できます。RESET を LOW にすると、I2C ステートマシンがリセットされ、両方のチャンネルが選択解除されます (内部のパワー オンリセット機能と同様)。このリファレンス デザインでは、両方の LDC3114-Q1 デバイスが同じ I2C アドレスを共有しているため、両方の LDC3114-Q1 デバイスと通信できるようにこのデバイスを使用します。

### 2.3.7 センサ制御ボード

センサ制御ボード (SCB) は、MSP432™ マイコンを使用してリファレンス デザインを制御するマイコン ボードです。このボードは、このデザインで使用するファームウェアと USB インターフェイスを取り扱います。この SCB は簡単に取り外して、サポート対象のさまざまな EVM と組み合わせて使用することができます。SCB の詳細については、[テキサス・インスツルメンツ、評価基板用センサ制御ボード \(SCB\) ウェブサイト](#)を参照してください。

### 3 ハードウェア、ソフトウェア、テスト要件、テスト結果

#### 3.1 ファームウェアとプログラミング

このリファレンス デザインでは、SCB を使用して基板上的のさまざまな IC を制御します。このデザインのファームウェアは、Code Composer Studio™ IDE を使用して開発しました。適切なファームウェアを使用して SCB を設定すれば、その SCB をこのリファレンス デザインと組み合わせて使用することができます。この SCB は複数の評価基板と組み合わせて使用できるので、適切なファームウェアをアップロードする GUI を使用して、SCB を容易に設定できます。

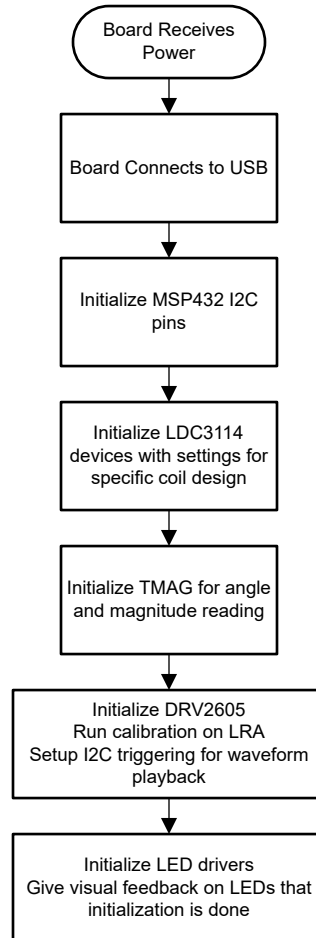


図 3-1. 初期化フローチャート

この設計のファームウェアは、基板上的のさまざまな IC の初期化から始まります。LDC3114 は、ボタン アプリケーション用に設定され、前述のコイル設計に従ってレジスタを設定します。DRV2605 ハプティクスドライバは、I2C コマンドを受信したときにハプティクス フィードバックを実行するように設定されています。また、このデバイスは、基板に取り付けられている特定の LRA 用にセットアップされており、各初期化の際にキャリブレーション チェックを実行します。TMAG5273 は、磁界の X 成分と Y 成分を回転計算に使用するように設定されています。特定の条件下で割り込みを送信するようにこのデバイスを構成することもできますが、この設計ではそれを使用していません。さらに、この設計の各モードでは、TMAG5273 から角度を使用して、ダイヤルの位置でどの LED をオンにするかを決定します。これは 12 ポジションのセレクトタのように動作するため、ダイヤル角度出力にヒステリシスを追加しています。これにより、2 つの LED 出力の間のライン上で角度が直角になって、2 つの LED が交互にちらつくことを防止できます。これは、12 個の LED のそれぞれの間の位置を物理的に保つ方法を採用するのと同じ影響を及ぼします。

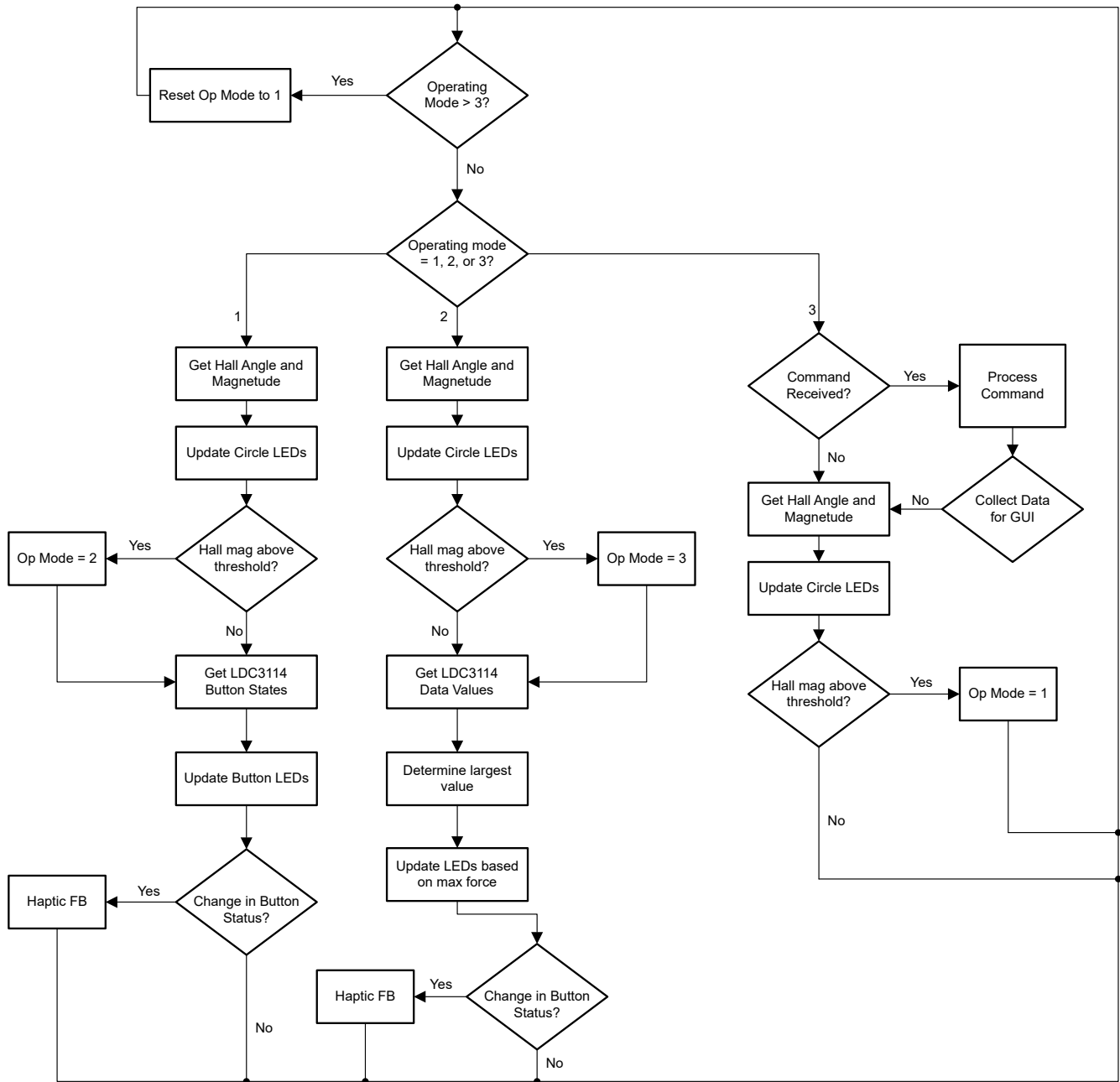


図 3-2. 動作モードのフローチャート

このリファレンス デザインには、通常動作時に 3 つの異なる動作モードがあり、誘導性タッチ ボタンの機能が変化します。

### 3.1.1 動作モード 1

このリファレンス デザインでは、デフォルトでスタートアップ時に動作モード 1 に設定されています。このモードでは LDC3114 のベースライントラッキング アルゴリズムを使用して 8 つの異なるタッチ ボタンを実装します。これらの各ボタンを押すと LDC3114 のデジタル出力が監視され、ボード上の関連した LED に表示されます。ベースライン アルゴリズムのデータがボタンのスレッシュホールドを上回ると、LDC3114 のデジタル出力がトリガされます。この状態になると、デバイスの極性設定に応じて、デバイスと OUT レジスタの両方のピンがボタンのステータスを High と表示します。ボタン フィードバックの表示に使用されている LED は、ボードのそれぞれのサイドにあるボタンの押下により 1 個のみが点灯します。これは、LDC3114 の MAXWIN 機能により、1 つのボタンを大きな力で押したときに同じ側にある 2 つのボタンが押されてしまい、隣のボタンが同時にトリガされることを防いでいるためです。これは LDC3114 によって動作しているため、各デバイスのボタンが押下されていることを LED で同時に表示可能です。LDC3114 の内部アルゴリズムの詳細については、『[LDC211x および LDC3114 の内部アルゴリズム機能](#)』アプリケーション ノートを参照してください。モード 1 では、磁気ダイヤルボタンを押すと動作モードがモード 2 になります。

### 3.1.2 動作モード 2

このリファレンス デザインの 2 番目の動作モードは、1 番目の動作モードと非常によく似ています。LDC3114 はここでもベースライントラッキング モードに設定されていますが、LED の通知方法は異なります。このモードでは、すべてのボタンのベースライントラッキング アルゴリズムからのデータ値を確認し、どのボタンが最も強く押されたかを判定します。この状態で、ボタンが押された強さに応じて LED が点灯し、より強く押されると、より多くの LED が点灯します。このモードに入るたびに、力の最大値が標準にリセットされます。ボタンが標準より強く押された場合、他のボタン押下と比較できるように、新しい力の最大値が保存されます。たとえば、開始時の最大値が 200 の場合、データ値が 100 のときには最初の 4 つの LED が点灯します。ボタンのアルゴリズムで結果が 400 であることが報告された場合、すべての LED を点灯させ、新しい最大値が 400 に設定されます。次に、データ値が 100 になると、2 つの LED だけが点灯します。磁気ダイヤル プッシュボタンを押すと、動作モードがモード 3 に切り替わります。

### 3.1.3 動作モード 3

このリファレンス デザインの動作モード 3 では、いずれかの LDC3114 のボタン アルゴリズムがディスエーブルになり、ボタンに関する未加工データ応答へのアクセスが可能になります。ボタン LED は固定状態になり、動作モード 3 がアクティブであることを示します。ファームウェアは、データを収集するために GUI からのコマンドを待機します。ストリーミング コマンドを受信すると、ファームウェアは 4 つのチャンネルすべてから得られた未加工データを LDC から GUI にストリーミングします。BOOST-LDC3114EVM が未加工データ モードで動作する方法と同様に、これを使用してグラフ上のデータを取得することもできます。

### 3.2 テスト設定

このリファレンス デザインのボタンは同じパラメータを使用して設計されていますが、機械的公差が原因で、性能に多少の違いが生じる可能性があります。このデザインは 3D プリントを意図しているため、それ以外のプリンタやプリント技術では精度や公差が異なります。さらに、3D プリントに別の素材を使用すると、ボタン表面のたわみが変化し、押下イベントによってボタン出力がトリガされるまでにより大きな力が必要になる場合があります。1 回でプリントされるボタンはいずれも同じプリンタと材料を使用していますが、特にデザインが手作業で組み立てられている場合は、ボタンに必要な力にばらつきが生じる可能性があります。ボタンが均一でない場合や、ユニット間で異なる場合、機械的公差を維持するために使用されるテープがボタンに影響を与える可能性があります。これを示すために、アナログ フォース ゲージを使用してボタン表面に力を加えます。その後、各ボタン スレッシュホールドのトリガに必要な力と、さまざまな力に対する応答の未加工データが記録されます。さらに、同じ機械設計で 3D プリント プロセスが異なる 2 種類の材質に対してテストを実施します。

### 3.3 テスト結果

ボタンを押すたびに必要な力は、完全に一様ではない材料や、性能に影響を及ぼすような大きさの設計公差を持つ材料を使用した場合に発生する可能性がある、機械構造の違いを示しています。さらに、2 つの異なる材料を使用したテストでも、それらの違いが明らかになります。

表 3-1. 必要なボタン押下力

ボタンの位置	ABS 左 (ニュートン)	ABS 右 (ニュートン)	ナイロン左 (ニュートン)	ナイロン右 (ニュートン)
1	7	5	2	3.75
2	20	3.5	3	0.75
3	16	1.5	1	1.5
4	3	1	3	1

#### 3.3.1 ABS の力応答

ボタンにより現れる違いの原因は材料の違いだけではありません。これらのテスト ユニットの組み立ては手作業で行われているため、機械的な位置合わせと機械的な絶縁を実現する接着にばらつきがあります。この違いにより、一部のボタンの応答が悪化する可能性があります。制御された再現性の高い組み立てプロセスを採用することで、この問題を軽減できます。各ボタンに異なるゲイン係数を適用することで異なる力応答をオフセットすることができ、すべてのボタンの力に対する応答を揃えることが可能です。これをより的確に示すために、さまざまな力での各ボタンの未加工データを収集します。ABS 製のボタン表面の力応答を 図 3-3 に示します。

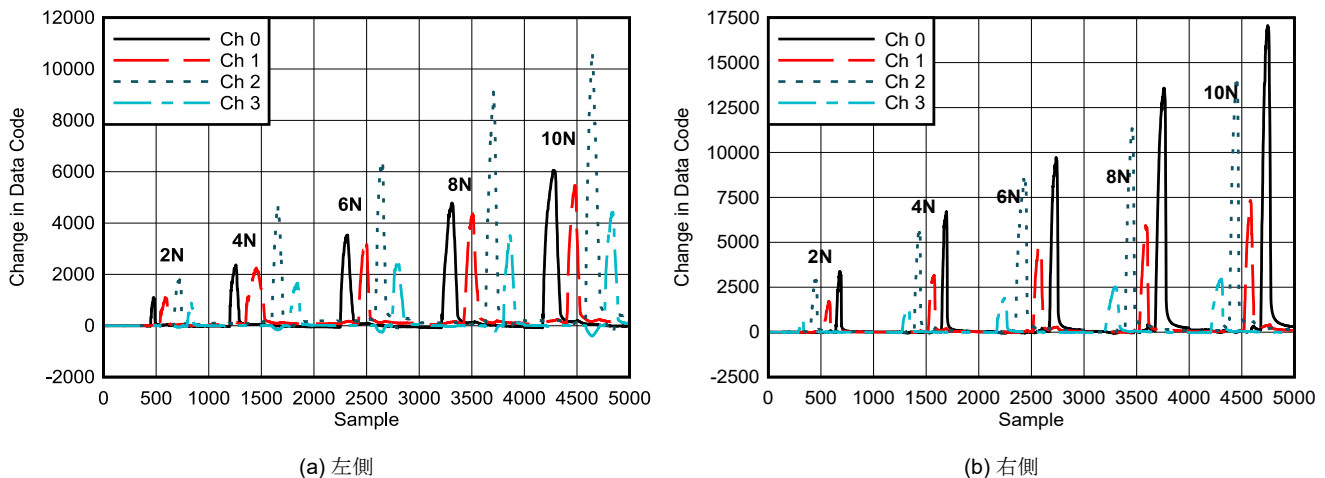


図 3-3. ABS の力応答

### 3.3.2 絶対ゲイン補正

絶対力応答は、ボタンのさまざまな感度を示しています。ボタンの設計は同じですが、3D プリントのばらつきが原因で、機械的機能は各ケースで異なります。より均一な応答を実現するため、各チャンネルにゲインを適用することができます。個々のゲインを適用した後の力応答を 図 3-4 に示します。

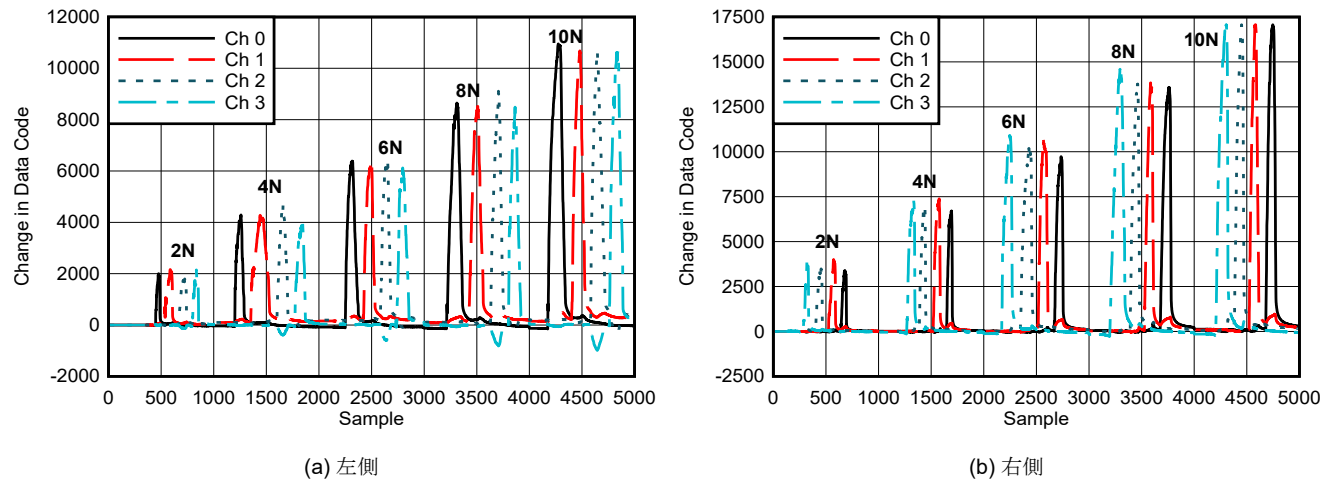


図 3-4. 絶対ゲイン補正

### 3.3.3 ナイロンの力応答

同様に、ナイロン 12 の力応答を収集して比較します。

表 3-2.

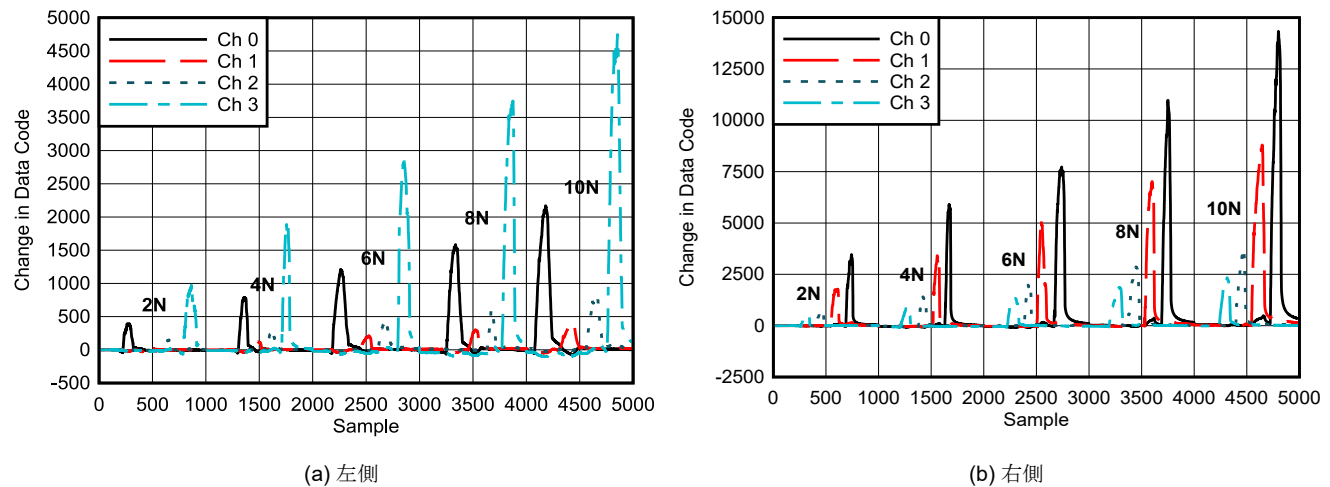


図 3-5. ナイロンの力応答

### 3.3.4 ナイロンのゲイン補正

ナイロンはボタンを押す力の範囲が広いので、均等な応答を得るには **ABS** よりも大きな補正が必要です。

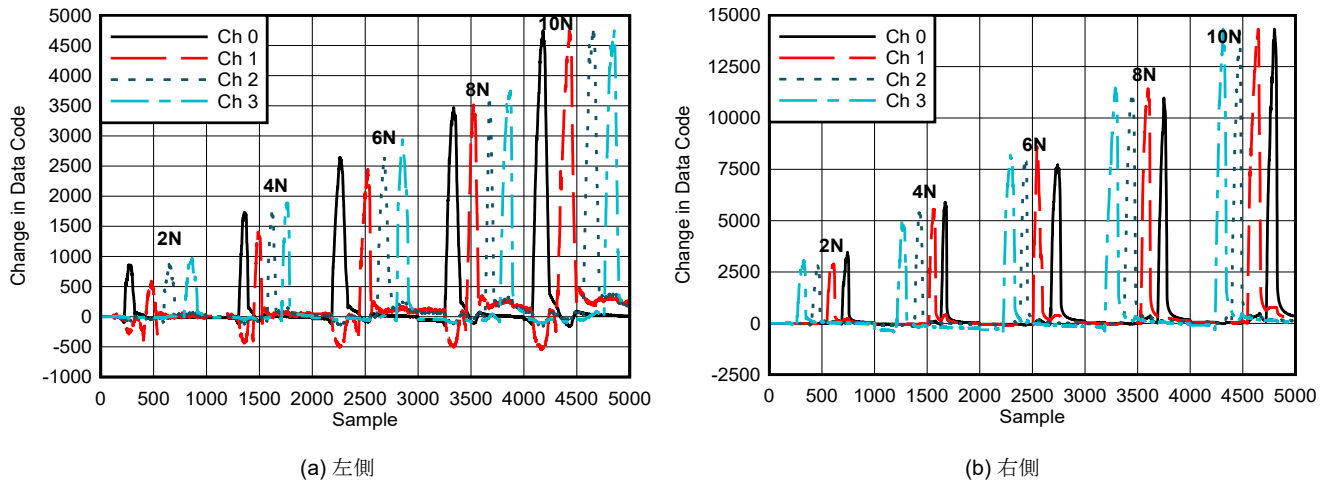


図 3-6. ナイロンのゲイン補正

ゲインの補正値を大きくすることの欠点は、一部のボタン チャンネルで、付近にある他のボタンを押している間に逆応答が見られることです。これは、ボタン設計の機械的性質に起因しています。1 つのボタンを押すと、別のボタン表面がセンサコイルからわずかに変形して離れます。データはボタン押下とは逆方向に移動するため、アプリケーションではその影響を無視できます。また、デバイスのベースライン アルゴリズムには、この影響を問題にならないように処理するための追加のツールが用意されています。とはいえ、機械的な動きをできる限り隔離することで、このようなケースを最小限に抑えることができます。

最後に、両方の材料でゲイン補正を行った後、これら 2 つの材料の差を確認できます。グラフでは、**ABS** はナイロンよりも加えられた力に対してより大きな応答を示しています。これは材料の違いだけではなく、ハウジングの組み立てにも起因しています。**PCB** とボタン表面の間の接着はテスト ユニットでは手作業で行われるため、デザインの欠陥につながる可能性があります。これは、ユニット間で一貫した結果を得るために、厳密な組み立てプロセスを行うことの重要性を示しています。

## 4 ハードウェア コンポーネント

3D プリントされたハウジングは、さまざまなコンポーネントに分離され、最終的なハウジングに組み立てられます。これらのコンポーネントは、ナイロン 12 を材料として使用する選択的レーザー焼結プロセス用に設計されています。これにより、ボタン表面を曲げる柔軟性がわずかに得られ、磁気ダイヤルをスムーズに回転させることができます。この設計は、PCB を乗せるための硬い表面、USB ケーブル用の穴、ハウジングを閉位置で固定するボルト用の複数の穴を備えたハウジングベースから始まります。

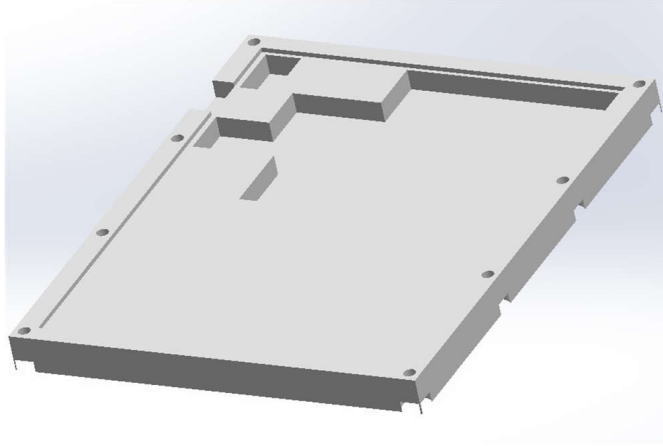


図 4-1. ハウジング ベース

PCB は、ベースの外側にある溝の内側に配置され、SCB が取り付けられています。

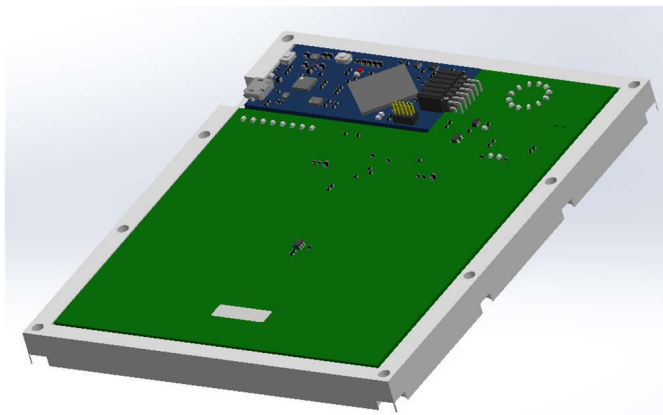


図 4-2. PCB 付きハウジング ベース

トップ カバーは、一部の 3D プリント技術でのプリントが容易になるように、複数のパーツに分割されています。これらのパーツには、ボタン表面、ダイヤル アタッチメント、ダイヤル、PCB 上部用の小型カバーなどがあります。ボタン表面には、ボタン押下が必要な場所を示す溝が上部にあり、中央にはダイヤル アタッチメント ピースを配置するための穴があります。背面には、金属ターゲットを追加するための長方形の切り欠きがあります。最大限の機械的絶縁を実現するために、ボタン カバーを PCB に接着するとともに、ハウジング ベースにボルトで固定します。設計のこの部分は、前述のボタン スタックアップ デザインと一致するように構築されています。



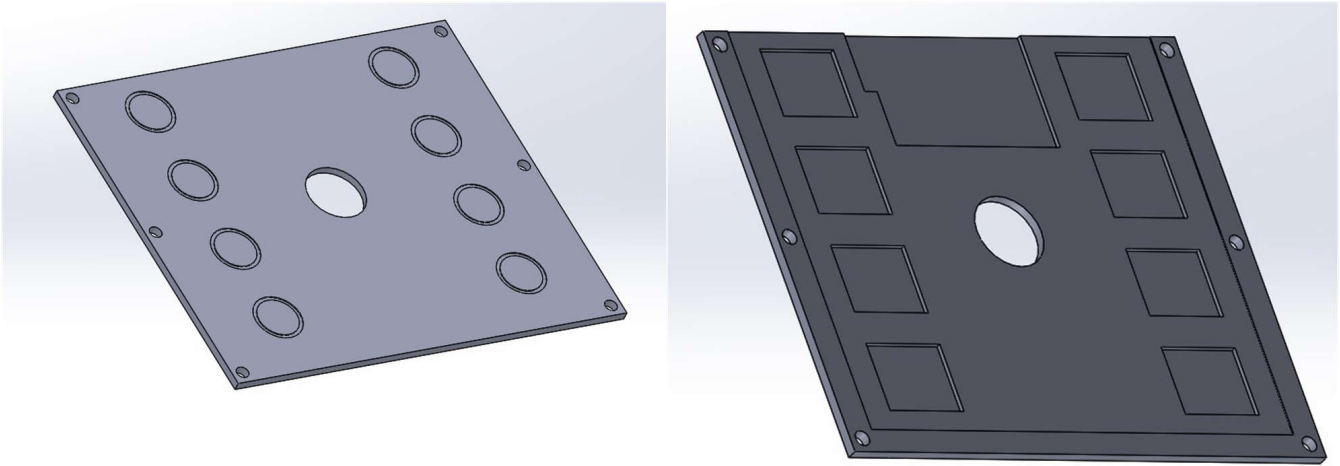


図 4-3. ハウジング ボタン カバー

ダイヤル アタッチメントは、ボタン表面の穴に収まる小さな丸いピースです。主な目的は、ダイヤルを留める場所を提供することです。ダイヤル アタッチメントは、ボタンを使用するときに動かないように接着剤でボタン表面に固定する必要があります。

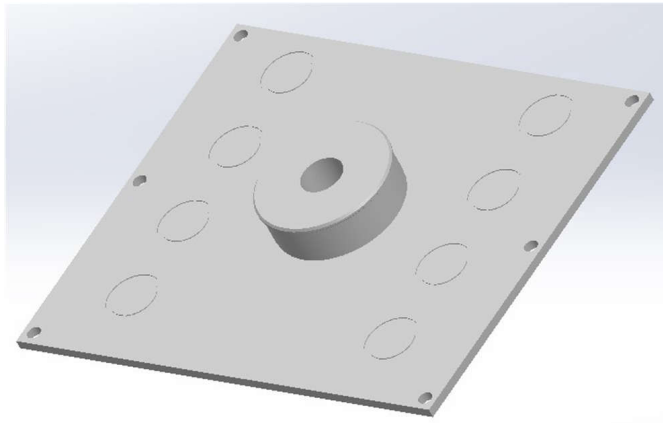


図 4-4. ダイヤル アタッチメント付きボタン カバー

ダイヤルは、間にスプリングが挟まっている 2 つのダイヤル アタッチメントに留めるように設計されています。ダイヤルには、磁石を接着する小さな穴もあります。これにより、磁石が TMAG5273 の真上に配置され、最高の回転センシング測定が可能になります。

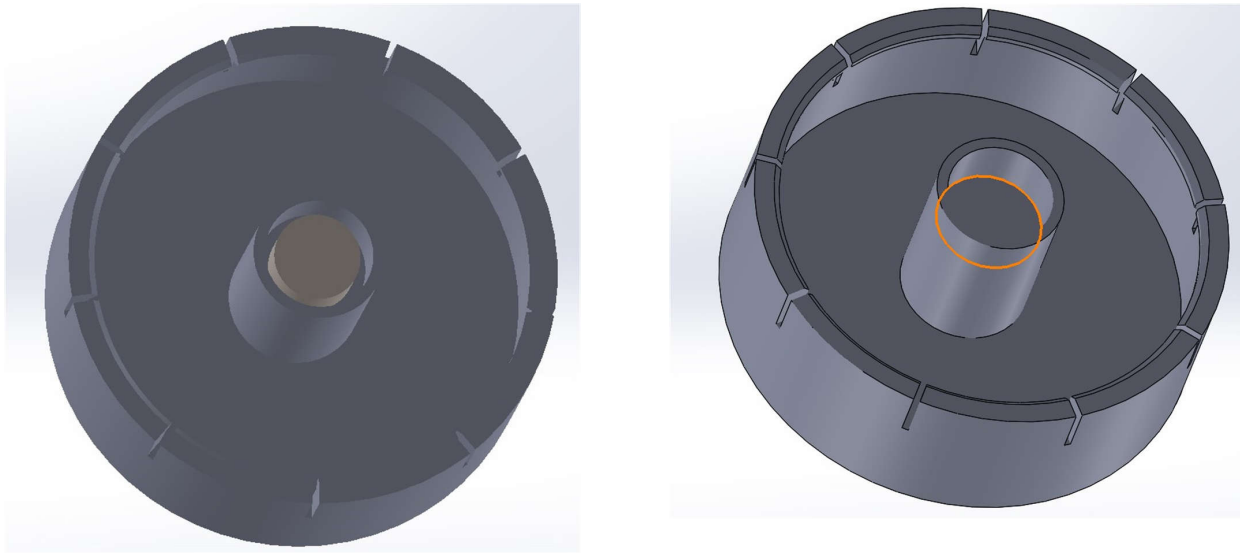


図 4-5. 磁気ダイヤル

小さなトップカバーには、カバーが付いているときでも LED が見えるようにするための切り欠きがあり、USB ケーブルを SCB に接続するための切り欠きもあります。トップカバーの主な目的は、ハウジングを完成させ、SCB を所定の位置に保持することです。

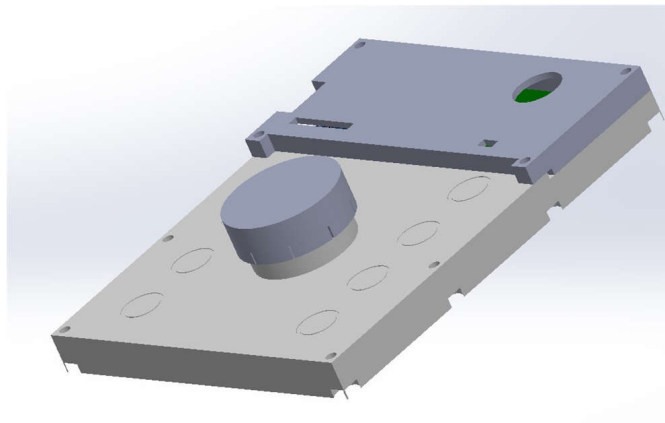


図 4-6. フル アセンブリ

## 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-060039](#) 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-060039](#) のデザイン ファイルを参照してください。

### 5.2 ツールとソフトウェア

#### ツール

<a href="#">誘導性センシング設計カリキュレータ</a>	誘導性コイル センサの設計に役立つ Excel スプレッドシート
<a href="#">角度誤差カリキュレータ</a>	TMAG5170 と TMAG5273 向け磁気センサ角度誤差カリキュレータ

### 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、『[HMI ボタン アプリケーション用の誘導性タッチ システムの設計ガイド](#)』アプリケーション ノート
2. テキサス・インスツルメンツ、『[ヒューマン・マシン・インターフェイス用の誘導性タッチ ボタンの設計上の考慮事項](#)』アプリケーション ブリーフ
3. テキサス・インスツルメンツ、『[LDC211x および LDC3114 の内部アルゴリズム機能](#)』アプリケーション ノート
4. テキサス・インスツルメンツ、『[誘導性タッチ - LDC2114 および LDC3114 ボタン タッチ感度の設定](#)』アプリケーション レポート

### 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

テキサス・インスツルメンツの™, MSP432™, Code Composer Studio™, and テキサス・インスツルメンツ E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 6 改訂履歴

資料番号末尾の英字は改訂を表しています。その改訂履歴は英語版に準じています。

#### Changes from Revision \* (April 2022) to Revision A (April 2024)

Page

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| • デバイスの代替品として TMAG5173-Q1 を追加..... | 7 |
|------------------------------------|---|

## 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