

Application Note

ステッピング モーター向けのセンサレス ストール検出



Dipankar Mitra, Mojtaba Afshar

概要

ステッピング モーター システムは、本質的にオープン ループの位置制御システムです。モーターが動作しているか停止しているかをドライバの IC に知らせるフィードバックはありません。しかし、多くの用途では、ユーザーは診断目的または位置検出のために、モーターの状態を把握する必要があります。現在市場に存在するセンサレス ストール検出ソリューションは、電源電圧、温度、マイクロステッピング モードなどの広範な動作パラメータにわたって、ストールを確実に検出できません。DRV8889-Q1、DRV8434A-Q1、DRV8434A、DRV8434S、DRV8452、DRV8461、DRV8462 などのテキサスインスツルメンツ製デバイスは、PWM オフ時間を用いてバック EMF を検出することにより、ステッピング モーターのセンサレス ストール検出を実現する新しい手法を採用しています。このストール検出アルゴリズムは、電源電圧、コイル抵抗、温度変化に対する一次的な依存性を排除します。このアプリケーション レポートの目的は、ストール検出機能を備えたテキサスインスツルメンツ製デバイスのストール検出アルゴリズムの利点を強調するとともに、さまざまな最終用途においてストールを確実に検出できることを示す具体例を提供することです。

目次

1 はじめに.....	3
2 ステッピング モーターのバック EMF.....	4
3 既存のストール検出方式.....	5
3.1 電流ゼロ交差時のバック EMF の測定.....	5
3.2 固定オフ時間方式.....	5
3.3 PWM サイクル カウント方式.....	6
4 TI の統合型ストール検出アルゴリズム.....	7
4.1 ストール検出方式の詳細.....	7
4.2 ストール検出構造の詳細.....	9
4.3 ストール検出構成の詳細.....	12
4.4 ストール検出機能の実験結果.....	15
5 評価の例.....	31
5.1 車載ヘッドライトのレベリングとスイベル.....	31
5.2 車載ヘッドアップ ディスプレイ (HUD).....	34
5.3 HVAC バルブ制御.....	35
6 まとめ.....	36
7 参考資料.....	36
8 改訂履歴.....	37

図の一覧

図 2-1. コイル電流によるバック EMF の位相シフト.....	4
図 3-1. 固定オフ時間方式.....	5
図 4-1. 固定リップル電流制御方式.....	7
図 4-2. 無負荷モーターのバック EMF.....	8
図 4-3. 車載用途に使用される PL35L-024 ステッピング モーター.....	16
図 4-4. モーター動作時のコイル電流とトルク カウント.....	16
図 4-5. モーターがストールしているときのコイル電流およびトルク カウント.....	16
図 4-6. DRV8889 の PL35L-024 モーターのトルク カウント.....	17
図 4-7. トルク スケール無効時における DRV8434S での PL35L-024 モーターのトルク カウント.....	18
図 4-8. トルク スケール有効時における DRV8434S での PL35L-024 モーターのトルク カウント.....	18
図 4-9. 動作方向の違いによる定常カウントの速度依存性.....	19

図 4-10. 動作方向によるストール カウントの変化.....	19
図 4-11. DRV8889-Q1 の 150pps での定常カウント.....	20
図 4-12. TRQ_SCALE 無効時の DRV8434S における 150pps での定常カウント.....	21
図 4-13. TRQ_SCALE 有効時の DRV8434S における 150PPS での定常カウント.....	21
図 4-14. DRV8889-Q1 の 100PPS での定常カウント.....	22
図 4-15. TRQ_SCALE 無効時の DRV8434S における 100PPS での定常カウント.....	22
図 4-16. TRQ_SCALE 有効時の DRV8434S における 100PPS での定常カウント.....	23
図 4-17. 200PPS での定常カウント.....	23
図 4-18. 700PPS での定常カウント.....	24
図 4-19. Q1 レギュレーションが失われたときの定常カウントの変更.....	25
図 4-20. 1100PPS での定常カウント.....	26
図 4-21. 電源電圧による定常カウントの変動.....	27
図 4-22. マイクロステップングによる定常カウント変動.....	27
図 4-23. 出力スルーレートによる定常カウントの変動.....	28
図 4-24. 周囲温度による定常カウントの変動.....	28
図 4-25. フルスケール電流による定常カウント変動.....	29
図 4-26. 抵抗 80Ω のバルブ モーターのコイル電流波形.....	30
図 4-27. 抵抗 36Ω のバルブ モーターのコイル電流波形.....	30
図 4-28. 定常状態のトルク カウントの変動.....	31
図 5-1. 動作条件全域で安定したカウント.....	32
図 5-2. DRV8889-Q1 を用いたヘッドライト モジュールのストール検出.....	32
図 5-3. ストール検出機能を搭載していないオーディオ ノイズ分光器.....	33
図 5-4. DRV8889-Q1 のストール検出における音響ノイズ スペクトログラム.....	33
図 5-5. ストール検出あり/なしにおける音響ノイズ SPL プロット.....	34
図 5-6. ストール検出.....	35
図 5-7. HVAC バルブ定常カウント.....	36

表の一覧

表 4-1. ストール検出機能を内蔵したドライバ.....	7
表 4-2. ストール検出機能を搭載した TI のステップングドライバの比較.....	8
表 4-3. DRV8889-Q1 レジスタ マップ.....	9
表 4-4. DRV8434S レジスタ マップ.....	9
表 4-5. フォルト条件のまとめ.....	11
表 4-6. DRV8434A、DRV8434A-Q1 のストール関連ピン.....	11
表 4-7. STL_MODE および TRQ_CNT/STL_TH ピンの構成の概要.....	12
表 4-8. STL_REP ピン構成の概要.....	12
表 5-1. ヘッドライト ステップパ モーターの動作条件.....	31
表 5-2. HUD モジュールの動作条件.....	34
表 5-3. HVAC バルブの動作条件.....	35

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

オープン ループのステッピング モーター システムは簡便さが魅力ですが、ステッピング モーターであってもフィードバックが望ましい場合があります。多くのアプリケーションでは、モーターの状態を把握することが求められます。例えば、モーターがジャミングしているか、過負荷状態にあるかを診断するためです。また、位置検出の目的で、モーターが行程終端に到達したか、物理的な障害物に衝突したかを検知する必要もあります。

多くのアプリケーションでは、目標とする終端位置に確実に到達させるために、モーターを終端位置を超えて大きく駆動することがあり、その結果、システム効率が低下します。エンコーダやホール センサなどの回転子の位置を監視するための外部コンポーネントは、システムのコストを増加させます。ストール検出機能がない場合、モータードライバは障害物に対して駆動を続け、可聴ノイズや機械的故障を引き起こします。

内蔵されたセンサレス ストール検出機能により、これらの問題を防止し、モーターの過負荷や物理的な障害による停止を確実に検出できます。さらに、高精度な位置検出が不要な用途では、センサレス ストール検出は高価なホール センサ、リミットスイッチ、エンコーダの代替となります。統合型のセンサレス ストール検出は、タイムアウト機構を必要とする位置センサ方式と比較して、ストール発生時に即座に応答します。

統合型センサレス停止検出アルゴリズムを活用できるシステムやアプリケーションには、次のものがあります：

- 車載ヘッドライトのレベリングとスイベル
- 車載ヘッドアップ ディスプレイ (HUD)
- 車載および産業用 HVAC アクチュエータ制御
- 電子膨張弁 (EEV)
- プリンタ複合機
- 3-D プリンタ
- 監視カメラ (パン動作とチルト動作)
- 医療用アプリケーション

2 ステッピング モーターのバック EMF

ステッピング モーターの場合、電源電圧は式 1 で表すことができます。

$$VM = I \times R_{\text{coil}} + \text{BEMF} + L \times \frac{di}{dt} \quad (1)$$

ここで

- I はコイル電流です
- R_{coil} は、モーター コイルのコイル抵抗です
- BEMF はバック EMF 電圧です
- L はインダクタの値です

バック EMF は、アーマチュアが固定子内部で回転する際にモーターによって生成される電圧です。バック EMF は、式 2 を使って表すことができます。

$$\text{BEMF} = -p \times \psi_m \times \omega \times \sin(p\omega t) \quad (2)$$

ここで

- p は極対数です
- ψ_m は最大磁束であり、モーターごとに一定の値です
- ω はモーターの角速度です

したがって、バック EMF は本質的に正弦波形であり、モーター速度 (ω) に直接比例します。モーターのスピンの速度が速いほど、低速時に比べてより大きなバック EMF を生成します。モーターがストールすると、バック EMF は生成されません。

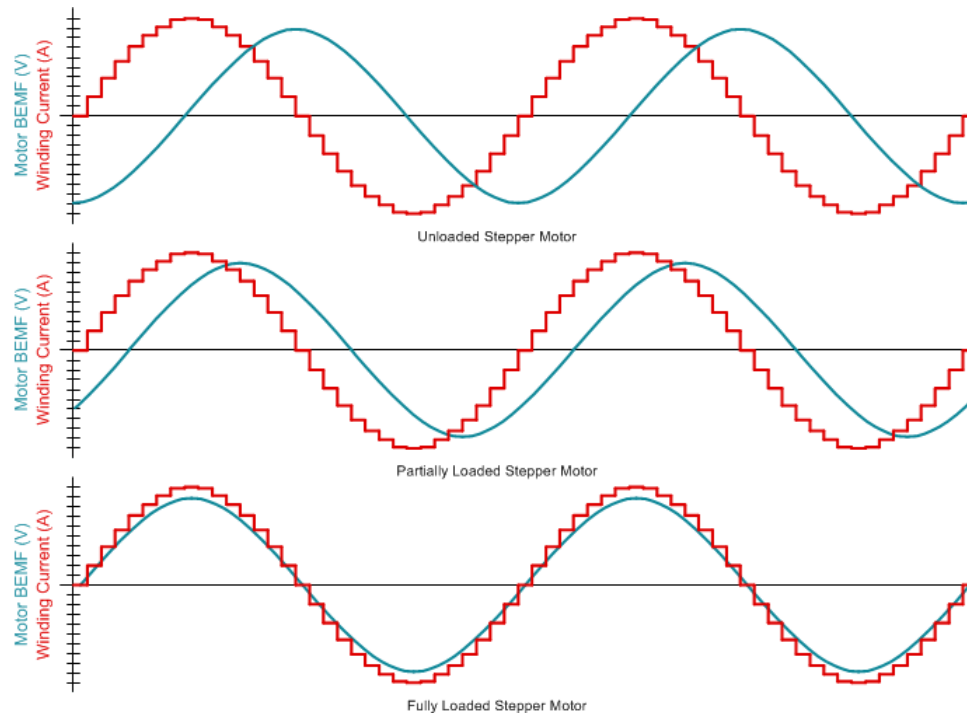


図 2-1. コイル電流によるバック EMF の位相シフト

ステッピング モーターでは、コイル電流、バック EMF、機械的トルク負荷の間に明確な関係があります (図 2-1 を参照)。無負荷状態のモーターでは、バック EMF はコイル電流に対して 90° 位相がシフトされます。モーター負荷が、あるコイル電流におけるモーターのトルク能力に近づくにつれて、バック EMF はコイル電流と同相になります。負荷トルクが定格負荷状態を超えて増加すると、回転子はステーターの磁界との同期を失い、モーターはストールします。

一定の速度で動作しているモーターが同期を失わずに発生できる最大トルクを、プルアウトトルクと呼びます。したがって、モーターの負荷トルクがモーターのプルアウトトルクを超えると、ストール状態が発生します。多くのステッピングモーターのデータシートには、プルアウトトルク対速度特性曲線が含まれています。プルアウトトルクは、速度が増加すると低下し、モーターコイルを流れる電流が増加すると増大します。

3 既存のストール検出方式

現在、さまざまなステッピングドライバメーカーから、複数のセンサレスストール検出方式が提供されています。これらの方法の簡単な説明を以下に示します：

3.1 電流ゼロ交差時のバック EMF の測定

現在一般的に用いられている多くのストール検出方式は、正弦波電流のゼロ交差時にバック EMF を測定します。コイル電流がゼロのとき、モーターコイルの両端の電圧はバック EMF と等しくなります。モーターがストールすると、バック EMF はゼロに近い値まで低下します。したがって、バック EMF が低下すると、モーターがストールしたことを示す良い指標となります。

ただし、この方法には以下のような欠点があります：

- バック EMF はゼロ交差時にのみ監視されます。
- 測定ウィンドウでは、コイル電流が本当にゼロに達していることを確認する必要があります。ゼロ交差点付近のコイル電圧波形のリングングにより、測定ウィンドウが短くなる可能性があり、追加のブランキング時間が必要になる場合があります。
- モーターが高速の場合、高速測定を行うために複雑な回路が必要です。したがって、この方式は中程度以上の高いモーター速度では機能しません。
- この方式はフルステップモードでは機能しません。コイル電流がフルスケール設定値の 71% と -71% の間で切り替わるため、ゼロ交差検出が不可能だからです。フルステップモードでもゼロ交差期間を強制する方法もありますが、その方法には独自の問題があります。
- モーターがゆっくりスピンしているとき、バック EMF の変化を検出するのは困難な場合があります。

3.2 固定オフ時間方式

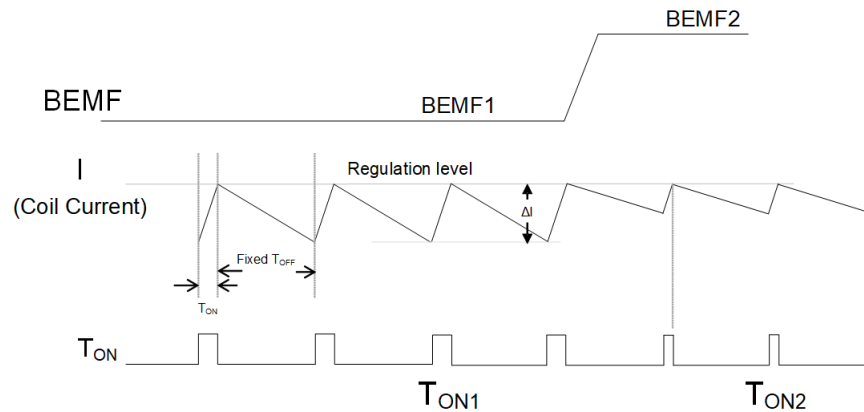


図 3-1. 固定オフ時間方式

一部の固定 PWM オフ時間 (T_{OFF}) 電流制御方式では、連続するサイクルにおける PWM オン時間 (T_{ON}) の差を用いてバック EMF を判定し、それによってストール検出します (図 3-1 を参照)。

ただし、この方法にも独自の欠点があります。オン時間の式は、式 3 で計算されます：

$$T_{ON} = T_{OFF} \times \frac{((I \times R) - BEMF)}{(VM - ((I \times R) - BEMF))} \quad (3)$$

$$\Delta T_{ON} = T_{ON1} - T_{ON2} = T_{OFF} \times \frac{VM \times (BEMF2 - BEMF1)}{(VM - (I \times R) - BEMF1) \times (VM - (I \times R) - BEMF2)} \quad (4)$$

式 4 から明らかなように、 ΔT_{ON} は電源電圧、コイル電流、およびコイル抵抗 (したがって周囲温度) に依存します。したがって、この方式では、電源電圧、温度、またはモーター電流が変化した場合に、誤検出や検出漏れが発生する可能性があります。

3.3 PWM サイクル カウント方式

一部の実装では、PWM サイクル カウントを監視してバック EMF の変化を検出し、それによってストールを検出します。ストール条件ではバック EMF が減少するため、電流立ち上がり時間が短くなります。ステップ周波数が一定の場合、ストールが発生すると (TOFF が固定であるため) 1 ステップあたりの PWM サイクル数は増加します。この方法には、次のような欠点があります：

1. 式 3 からわかるように、 T_{ON} は、電源電圧 (VM)、モーター電流 (I)、および温度 (T) によって変動します (モーター抵抗 R は温度の上昇とともに増加します)。したがって、この方法では、電源電圧、温度、またはモーター電流が変化した場合に、誤検出や検出漏れが発生する可能性があります。
2. フル ステップ モードでは動作しません
3. ステップ周波数が比較的一定の場合にのみ機能します。ステップ周波数が動的に変化すると、PWM パルスの数が不確定になります。

4 TI の統合型ストール検出アルゴリズム

ストール検出機能を統合した TI のステッピング モーター ドライバを表 4-1 に示します。

表 4-1. ストール検出機能を内蔵したドライバ

デバイス	業界	電圧レンジ	最大電流	インターフェイス
DRV8889-Q1	車載	4.5 ~ 45 V	1.5A	SPI
DRV8434A	産業用	4.5 ~ 48 V	2.5A	GPIO
DRV8434S	産業用	4.5 ~ 48 V	2.5A	SPI
DRV8452	産業用	4.5 ~ 55 V	5A	SPI
DRV8461	産業用	4.5 ~ 65 V	3A	SPI
DRV8462	産業用	4.5 ~ 65 V	10A	SPI

DRV8889-Q1 は、ストール検出機能を統合した TI 初のステッピングドライバであり、主に車載用途を対象としています。その後のドライバでは、産業用途で一般的に見られる比較的高いモーター速度においてストールを検出できるよう、わずかに改良された方式が採用されています。以下のセクションでは、ストール検出方式について詳細に説明します。

4.1 ストール検出方式の詳細

図 2-1 に示すように、無負荷モーターではバック EMF はモーター電流に対して 90° の位相差を持っています。負荷が増加すると、バック EMF の位相シフトは減少します。最後に、負荷が増加して負荷トルクがブルアウトトルクを超えると、モーターはストールし、バック EMF はゼロになります。モーター電流の立ち上がりおよび立ち下り電流区間におけるバック EMF の位相シフトを検出することで、ストール検出機能を備えたテキサス インストルメンツ製のデバイスは、モーターの過負荷によるストール状態やエンド オブ ライントラベルを検出できます。

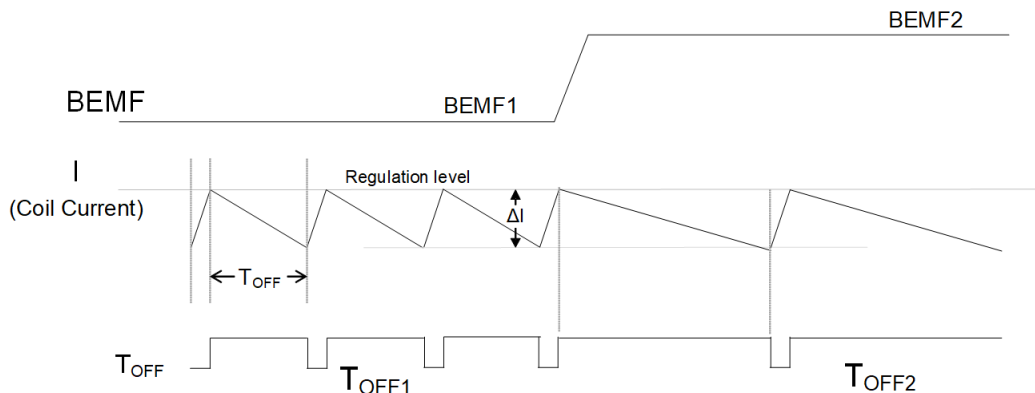


図 4-1. 固定リップル電流制御方式

$$T_{OFF} = \frac{L \times \Delta I}{(I \times R) - BEMF} \quad (5)$$

固定したに関連する問題を克服するために T_{OFF} 電流レギュレーション方式では、TI のステップドライバが固定リップル電流レギュレーション方式 (スマート チューンリップル コントロール 減衰モード) を使用しています (図 4-1 を参照)。これにより T_{OFF} は、バック EMF によっても変化します。バック EMF が大きいほど T_{OFF} が大きくなり、バック EMF が小さいほどは小さくなります T_{OFF} と仮定すると、以下の T_{OFF} を監視することで、PWM オフ時間中に VM 電源がモーターから切断されるため、電源電圧に対する一次依存関係はなくなります。式 5 は T_{OFF} が VM には依存しないことを示します。

$$\frac{1}{T_{OFF1}} - \frac{1}{T_{OFF2}} = \frac{1}{L \times \Delta I} \times (BEMF2 - BEMF1) \quad (6)$$

では T_{OFF} デルタの代わりに T_{OFF} の逆数のデルタを使うことで、I と R の項 (モーターの電流と抵抗 / 温度) への依存をさらになくすことができます。式 6 に示すように、デルタ ($1/T_{OFF}$) は、VM、I、R には依存せず、バック EMF の変化のみ に依存します (他の用語 ΔI と L は、電流リップルとモーター インダクタンスで、システムの定数を示します)。

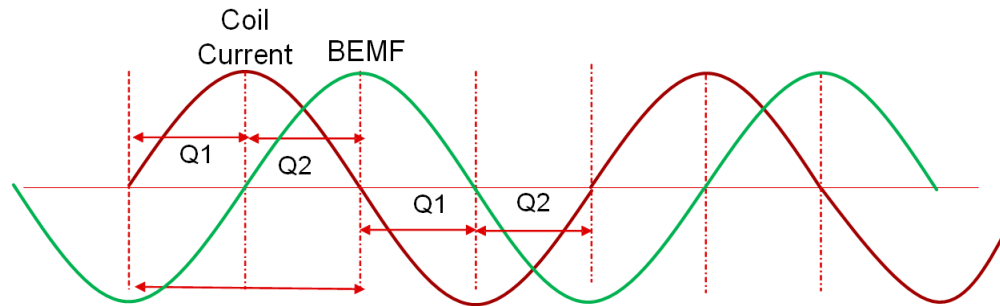


図 4-2. 無負荷モーターのバック EMF

図 4-2 に示すように、($1/T_{OFF}$ を監視することで) 正弦波電流の立ち上がり (Q1) および立ち下がり (Q2) 電流象限間でバック EMF を比較することにより、モーター負荷の良い指標が得られます。モーターの負荷が軽い場合、図 4-2 の立ち下がり象限と立ち上がり象限の間のデルタ バック EMF は正の値になります。負荷が増大してストール状態に近づくにつれて、立ち下がりおよび立ち上がり電流象限間のバック EMF 差分はゼロに収束し、この特性を利用してストールを検出できます。

ストール アルゴリズムは T_{OFF} を各電氣的半周期の Q1 および Q2 において監視します。 $1/T_{OFF1}$ (平均) および $1/T_{OFF2}$ (平均) の差分は、各半周期の終端で算出されます。 $(1/T_{OFF1} - 1/T_{OFF2})$ は半周期の終端で計算された値で、直前の 3 つの半周期の終端で計算された値と平均化され、トルク カウント TRQ_COUNT と呼ばれる移動平均値が得られます。軽負荷状態のモーターでは、TRQ_COUNT はゼロではない定常値に収束し、この値は定常カウントと呼ばれます。モーターがストール状態に近づくにつれて、TRQ_COUNT は徐々に低下してゼロに近づき、この特性を利用してストール状態を検出できます。TRQ_COUNT が STL_TH と呼ばれる事前設定されたスレッシュホールドを下回った場合、デバイスはストール状態を検出します。

4.1.1 TRQ_COUNT および STL_TH ビットの分解能

DRV8889-Q1 デバイスは TRQ_COUNT および STL_TH に 8 ビットレジスタを備えています。一方、DRV8434S、DRV8452、DRV8461、DRV8462 デバイスは、TRQ_COUNT および STL_TH において 12 ビット精度のより高い分解能を提供します。さらに、DRV8434A-Q1、DRV8434A は TRQ_CNT/STL_TH 出力 / 入力ピンに対して 12 ビットの分解能を実現するハードウェア デバイスであり、ストール検出の精度を向上させています。ビット分解能が向上することで、ストール条件をより正確に検出できます。この高い分解能により、機械的負荷変化をより細かく識別できるようになり、誤検出や検出漏れを伴わない、より正確なストール検出が可能となります。

4.1.2 増幅トルク カウントとストール スレッシュホールド

モーターのコイル抵抗が高い場合や動作速度が低い用途では、BEMF が低減するため、TRQ_CNT 値は一般的に低くなります。その結果、DRV8889-Q1 におけるストール検出はより困難になり、信頼性も低下します。この問題を軽減するために、DRV8434A-Q1、DRV8434A、DRV8434S、DRV8452、DRV8461、DRV8462 などの一部のデバイスには、トルク カウントおよびストール スレッシュホールドを 8 倍に拡大するスケールアップ機能が搭載されています。トルク カウントを増幅することで、これらのデバイスは BEMF が低い条件下でもより正確な検出を可能にし、その結果、TRQ_CNT 値はより高くなります。以下の表では、ストール検出機能を備えた TI デバイスを比較します。

表 4-2. ストール検出機能を搭載した TI のステッピングドライバの比較

ストール 検出機能	DRV8889-Q1	DRV8434S、DRV8452、DRV8461、 DRV8462	DRV8434A-Q1、DRV8434A
インターフェイス	SPI	SPI	ハードウェア
トルク カウント分解能	8 ビット	12 ビット	12 ビット

表 4-2. ストール検出機能を搭載した TI のステッピングドライバの比較 (続き)

ストール検出機能	DRV8889-Q1	DRV8434S、DRV8452、DRV8461、DRV8462	DRV8434A-Q1、DRV8434A
ストール スレッシュホールド分解能	8 ビット	12 ビット	12 ビット
CTRQ_COUNT/STALL_TH スケールアップ	該当なし	8 倍に拡大	8 倍に拡大

4.2 ストール検出構造の詳細

このセクションでは、異なるインターフェイス構成を備えた TI ステッピングドライバにおけるストール検出の設定について説明します。

4.2.1 SPI インターフェイス搭載デバイス

DRV8889-Q1、DRV8434S、DRV8452、DRV8461、DRV8462 は、SPI インターフェイスを介したストール検出機能を備えています。これらのデバイスのストールパラメータ設定は、大きく 2 つのグループに分類できます。DRV8434S は、DRV8452、DRV8461、DRV8462 と同一のパラメータを共有しています。一方で、DRV8889-Q1 は異なる設定となっています。包括的な内容を網羅するために、このセクションでは DRV8889-Q1 と DRV8434S に注目し、両方のカテゴリを表します。

これらのデバイス用評価基板 (EVM) のハードウェア実装について詳しく理解するには、各ユーザーガイド (DRV8889-Q1 評価基板ユーザーガイド および DRV8434S-Q1 評価基板ユーザーガイド) を参照してください。また、DRV8889-Q1 評価基板 GUI ユーザーガイド および DRV8434S 評価基板 GUI ユーザーガイド では、評価基板と組み合わせてグラフィカル ユーザー インターフェイス (GUI) ソフトウェアを利用する手順をステップバイステップで説明しています。

DRV8889-Q1 および DRV8434S デバイスのレジスタマップは、それぞれ表 4-3 および表 4-3 に示されており、各デバイスのレジスタ構成の詳細な概要を提供しています。STALL_TH および TRQ_COUNT のビット分解能とスケール係数の向上をサポートするために、DRV8434S (および類似デバイス) に 2 つの追加レジスタがあることが、以下のレジスタマップからわかるようになります。

表 4-3. DRV8889-Q1 レジスタマップ

レジスタ名	7	6	5	4	3	2	1	0	アクセス タイプ	アドレス
FAULT のステータス	フォルト	SPI_ERROR	UVLO	CPUV	OCP	STL	TF	OL	R	0x00
DIAG ステータス 1	OCP_LS2_B	OCP_HS2_B	OCP_LS1_B	OCP_HS1_B	OCP_LS2_A	OCP_HS2_A	OCP_LS1_A	OCP_HS1_A	R	0x01
DIAG ステータス 2	UTW	OTW	OTS	STL_LRN_OK	STALL	RSVD	OL_B	OL_A	R	0x02
CTRL1	TRQ_DAC [3:0]			RSVD		SLEW_RATE [1:0]			RW	0x03
CTRL2	DIS_OUT	RSVD		TOFF [1:0]		DECAY [2:0]			RW	0x04
CTRL3	DIR	ステップ	SPI_DIR	SPI_STEP	MICROSTEP_MODE [3:0]				RW	0x05
CTRL4	CLR_FLT	LOCK [2:0]			EN_OL	OCP_MODE	OTSD_MODE	TW_REP	RW	0x06
CTRL5	RSVD		STL_LRN	EN_STL	STL_REP	RSVD			RW	0x07
CTRL6	STALL_TH [7:0]								RW	0x08
CTRL7	TRQ_COUNT [7:0]								R	0x09

表 4-4. DRV8434S レジスタマップ

レジスタ名	7	6	5	4	3	2	1	0	アクセス タイプ	アドレス
FAULT のステータス	フォルト	SPI_ERROR	UVLO	CPUV	OCP	STL	TF	OL	R	0x00
DIAG ステータス 1	OCP_LS2_B	OCP_HS2_B	OCP_LS1_B	OCP_HS1_B	OCP_LS2_A	OCP_HS2_A	OCP_LS1_A	OCP_HS1_A	R	0x01

表 4-4. DRV8434S レジスタ マップ (続き)

レジスタ名	7	6	5	4	3	2	1	0	アクセス タイプ	アドレス
DIAG ステータス 2	UTW	OTW	OTS	STL_LRN_OK	STALL	RSVD	OL_B	OL_A	R	0x02
CTRL1	TRQ_DAC [3:0]			RSVD		SLEW_RATE [1:0]			RW	0x03
CTRL2	DIS_OUT	RSVD		TOFF [1:0]		DECAY [2:0]			RW	0x04
CTRL3	DIR	ステップ	SPI_DIR	SPI_STEP	MICROSTEP_MODE [3:0]				RW	0x05
CTRL4	CLR_FLT	LOCK [2:0]		EN_OL	OCP_MODE	OTSD_MOD E	TW_REP		RW	0x06
CTRL5	RSVD		STL_LRN	EN_STL	STL_REP	RSVD			RW	0x07
CTRL6	STALL_TH [7:0]								RW	0x08
CTRL7	RC_RIPPLE[1:0]		EN_SSC	TRQ_SCALE	SATLL_TH [11:8]					
CTRL8	TRQ_COUNT [7:0]								R	0x09
CTRL9	REV_ID [3:0]				TRQ_COUNT [11:8]					

ストール検出アルゴリズムに関連する重要なパラメータは、わずか数ビットで制御されており、デバイスをストール検出用に設定するのは比較的容易です。ストール検出に関連するビットは、表 4-3 および表 4-3 で強調表示されています。

- **EN_STL:** デフォルトでは、デバイスの電源投入後、ストール検出は無効になっています。ストール検出を有効にするには、EN_STL を 01b に設定する必要があります。
- **DECAY [2:0]:** ディケイ モードはスマート チューンリップル制御に設定する必要があるため、このモードは 111b に設定する必要があります。ディケイ モードを他の値に設定すると、ストール検出が無効になります。
- **STL_LRN:** デフォルトでは 00b に設定されています。自動ストール学習プロセスを有効にするには、01b に設定する必要があります。ストール学習プロセスが完了すると、このビットは自動的に 00b に戻ります。
- **STL_LRN_OK:** ストール スレッショルドの学習が成功すると 01b になります。
- **TRQ_COUNT [7:0]:** これら 8 ビットは TRQ_CNT の値を予約して、負荷トルクを示すものです。この値はモーター負荷に反比例し、モーターが無負荷のときに最大となり、ストールに近づくにつれてゼロに近づきます。これにより、モーターの負荷状態を評価できます。さらに、12 ビット分解能を備えたドライバでは、別のレジスタに追加の TRQ_COUNT [11:8] ビットが用意されており、レンジが拡張されるため、より高精度なトルク監視が可能です。
- **STALL_TH [7:0]:** これらの 8 ビットは、ストール学習プロセスにより、目的のストール スレッショルドを手動で設定、または自動学習させるために使用されます。トルク カウントがこのスレッショルドを下回ると、デバイスはストールを検出します。さらに、12 ビットのストール スレッショルドを備えたデバイスでは、別のレジスタに追加の 4 ビット (STALL_TH [11:8]) が用意されており、設定オプションが拡張されます。
- **STL_REP:** このビットはストール検出の通知を制御します。nFAULT ピンでストール検出の故障レポートを有効にするには、STL_REP ビットを 01b に設定する必要があります。この条件が満たされると、ストールが検出された際に nFAULT ピンは Low に駆動され、故障が明確になります。
- **TRQ_SCALE:** スケールアップ機能を備えたデバイスでは、このビットを「1」に設定することで、低い TRQ_COUNT および STALL_TH の値を 8 倍にスケールアップできます。具体的には、アルゴリズムによって算出された初期 TRQ_COUNT 値が 500 未満の場合、検出精度向上のために TRQ_SCALE ビットを 01b に設定することが推奨されます。

ストールが検出されると、STALL、STL、および FAULT ビットは High にラッチされ、nFAULT ピンは Low にプルダウンされます (STL_REP が 01b に設定されている場合)。このストール状態では、モーター シャフトは停止します。ただし、STEP 信号を引き続き受信している場合、モーターは振動を示すことがあります。ストール状態が解消されると、モーターはスピンを再開します。CLR_FLT ビットを設定するか、nSLEEP リセット パルスを印加して故障クリア コマンドを実行すると、nFAULT 信号は解除され、故障レジスタはクリアされます。SPI デバイスでのストール検出に関連する故障条件の包括的な概要については、表 4-5 を参照してください。

表 4-5. フォルト条件のまとめ

フォルト	条件	構成	Hブリッジ	チャージポンプ	インデクサ	ロジック	復帰
ストール検出 (STALL)	モーターのストール / 停止	STL_REP = 00b	動作	動作	動作	動作	CLR_FLT / nSLEEP
		STL_REP = 01b	動作	動作	動作	動作	

4.2.2 ハードウェア インターフェイス デバイス

DRV8434A-Q1 および DRV8434A デバイスには、ハードウェア ストール検出機能が搭載されています。ハードウェア実装の詳細な概要については、DRV8434A 評価基板ユーザーガイドを参照してください。この評価基板の包括的な説明が記載されています。以下の表は、ハードウェア インターフェイスを備えたデバイスにおけるストール検出に関連する主要ピンをまとめたもので、ストール検出機能に関与する主要なピンおよび信号を示しています。

表 4-6. DRV8434A、DRV8434A-Q1 のストール関連ピン

ピン	タイプ	説明				
STL_MODE	入力	<p>ピンの入力レベルでストール検出モードを設定: GND = トルク カウント モードとなり、TRQ_CNT/ STL_TH ピンにトルク カウントのアナログ電圧が出力されます。 ハイ インピーダンス = 学習モード。学習結果のアナログ電圧が TRQ_CNT/STL_TH ピンに出力されません。 DVDD = ストール スレッシュホールド モード。ストール スレッシュホールドが TRQ_CNT/STL_TH ピンの入力電圧で設定されます。 GND を 330k Ω 抵抗で接続 = ストール検出は無効です。</p>				
TRQ_CNT/STL_TH	入力 / 出力	<p>STL_MODE ピンの入力レベルに応じて、トルク カウントアナログ出力またはストール スレッシュホールドアナログ入力。このピンと GND の間に 1nF のコンデンサを接続する必要があります。 STL_MODE = GND。トルク カウント電圧を出力として示します。 STL_MODE = DVDD。ストール スレッシュホールド電圧を入力として設定します。 STL_MODE = ハイ インピーダンス。ストール スレッシュホールド電圧を出力として示します。</p>				
STL_REP	オープンドレイン	<p>ストール フォルト通知出力。プルアップレジスタ (推奨 10k Ω) が必須です。このピンを GND に接続すると、ストール故障通知は無効になります。</p> <table border="1"> <tr> <td>STL_MODE = GND/ DVDD</td> <td>STL_REP ピンが Low から High へ遷移すると、ストールを示します</td> </tr> <tr> <td>STL_MODE = Hi-Z</td> <td>STL_REP ピンが High から Low へ遷移すると、学習が成功したことを示します。</td> </tr> </table>	STL_MODE = GND/ DVDD	STL_REP ピンが Low から High へ遷移すると、ストールを示します	STL_MODE = Hi-Z	STL_REP ピンが High から Low へ遷移すると、学習が成功したことを示します。
STL_MODE = GND/ DVDD	STL_REP ピンが Low から High へ遷移すると、ストールを示します					
STL_MODE = Hi-Z	STL_REP ピンが High から Low へ遷移すると、学習が成功したことを示します。					
イネーブル	入力	<table border="1"> <tr> <td>0 = デバイス出力をディスエーブル</td> </tr> <tr> <td>1 = デバイス出力をイネーブル</td> </tr> <tr> <td>ハイ インピーダンス = デバイス出力を有効化し、トルク カウントを 8 倍にスケールリングします</td> </tr> </table>	0 = デバイス出力をディスエーブル	1 = デバイス出力をイネーブル	ハイ インピーダンス = デバイス出力を有効化し、トルク カウントを 8 倍にスケールリングします	
0 = デバイス出力をディスエーブル						
1 = デバイス出力をイネーブル						
ハイ インピーダンス = デバイス出力を有効化し、トルク カウントを 8 倍にスケールリングします						

表 4-6. DRV8434A、DRV8434A-Q1 のストール関連ピン (続き)

ピン	タイプ	説明
nFAULT	出力	STL_REP > 1.6V の場合、ストールが検出されると nFAULT は Low になります。

DRV8434A および **DRV8434A-Q1** デバイスのストール検出アルゴリズムは、2 本のデジタル IO ピン (STL_MODE と STL_REP) と 1 本のアナログ IO ピン (TRQ_CNT/STL_TH) の 3 つの主要ピンの組み合わせによって包括的に設定されます。これらのピンは、ストール検出機能を精密に制御し、カスタマイズするために使用されます。これらのピンの役割、設定方法、および用途については以下で詳しく説明しており、さまざまな動作条件において **DRV8434A** および **DRV8434A-Q1** の性能を最適化する方法を包括的に理解できます。

4.2.2.1 STL_MODE ピンと TRQ_CNT/STL_TH ピン

STL_MODE ピンは、次の 4 つの構成可能な状態によって多様性を実現します: Low、ハイインピーダンス、High、および 330kΩ 抵抗を介したグラウンドへの接続。ピンの具体的な状態によって、ストール検出条件の機能および TRQ_CNT/STL_TH ピンの動作が決定されます。これらの機能は以下の表に詳細にまとめられており、さまざまなシナリオにおける STL_MODE ピンの機能および用途を明確に理解するための指針となります。

表 4-7. STL_MODE および TRQ_CNT/STL_TH ピンの構成の概要

動作モード	STL_MODE	TRQ_CNT/STL_TH のステータス
トルク カウント モード	GND	出力:トルク カウント電圧を示します
ストール スレッシュホールド モード	DVDD	入力:プログラム ストール スレッシュホールド電圧
学習モード	ハイインピーダンス	出力:ストール スレッシュホールド電圧を示します
ストール検出無効	330kΩ 経路で GND に接続	該当なし

4.2.2.2 STL_REP ピン

STL_REP ピンはストール故障レポート用に割り当てられており、グラウンドに直接接続するとその機能は無効になります。正常に動作させるには、外付けプルアップ抵抗が必須です。ピンの動作条件の詳細な概要を、下表に示します。

表 4-8. STL_REP ピン構成の概要

動作モード	STL_MODE	条件	STL_REP	nFAULT
トルク カウント モード または ストール スレッシュホールド モード	GND または DVDD	ストール レポートなし	外部で Low にプル	High
		ストール故障なし	Low	High
		STALL フォルト	High	Low (STL_REP > 1.6V の場合)
学習モード	ハイインピーダンス	学習は成功しました	Low	該当なし
		学習は行われていません	High	
ストール検出無効	330kΩ 経路で GND に接続		Low	

4.3 ストール検出構成の詳細

ストール検出アルゴリズムは TRQ_COUNT 値を算出し、この値はモータの負荷状態を示す重要な指標として機能します。負荷の軽いモータでは、TRQ_COUNT はゼロ以外の値を示し、この値が定常カウントと呼ばれます。モータがストール状態に近づくにつれて、TRQ_COUNT はゼロに向かって減少し、この値はストール カウントと呼ばれます。この変化により、ストール状態を検出することが可能となります。TRQ_COUNT が事前定義されたスレッシュホールドを下回ると、ストールが検出されます。設定手順は、SPI ベースのデバイスおよびハードウェア ベースのデバイス向けにそれぞれ最適化されており、性能および検出能力を最大限に引き出せるよう設計されています。

4.3.1 SPI インターフェイス デバイス

DRV8889-Q1、DRV8434S、DRV8252、DRV8461、DRV8462 などの SPI インターフェイス搭載デバイスでストール検出を有効にするには、次の手順に従います:

1. **ストール検出の有効化:** アプリケーションにおける通常の回転速度および負荷電流でモーターをスピンさせ、EN_STL を 01b に設定して機能を有効にします。
2. **読み取りトルク カウント値:** 通常動作中に TRQ_CNT レジスタを読み出して、トルク カウント情報を取得します。
3. **ストール スレッシュホールドの設定:** 次の 2 つの設定オプションから選択できます:
 - a. ストール発生時に TRQ_CNT レジスタを読み出し、STALL_TH ビットに書き込んで特定のスレッシュホールド値を手動で設定します。
 - b. ストール学習プロセスを通じて、アルゴリズムが理想的なスレッシュホールド値を自動的に学習させることを可能にします。

セクション [SPI デバイスでストール スレッシュホールドを設定する方法](#) では SPI デバイスがストール スレッシュホールドを設定するために必要な手順について説明します。

4. **ストール レポートの監視:** 以下を含むさまざまなチャンネルを通じてストール検出レポートを受信します:
 - a. DIAG ステータス 2 および故障ステータス レジスタの STALL ビット、STL ビット、FAULT ビット。
 - b. STL_REP ビットが有効化されている場合の nFAULT ピン。

トルク スケール機能を備えたデバイスの場合、初期 TRQ_COUNT 値が 500 未満の場合、TRQ_SCALE ビットを有効にします。これにより TRQ_COUNT を 8 倍にでき、トルク測定を実質的にスケールリングして精度および分解能を向上させることができます。

4.3.1.1 SPI デバイスでストール スレッシュホールドを設定する方法

ストール検出機能を備えた SPI インターフェイス搭載デバイスでは、ストール スレッシュホールドは次のいずれかの方法で設定できます。すなわち、STALL_TH ビットに手動で書き込む方法、またはストール学習プロセスを通じてアルゴリズムに最適なスレッシュホールドを自動学習させる方法です。

4.3.1.1.1 ユーザー定義のストール スレッシュホールド

ユーザーは、自身の用途におけるトルク カウント情報を把握している場合、スレッシュホールドレジスタに値を書き込むことができます。ユーザーは、モーターの通常動作時およびストール時に TRQ_CNT レジスタを読み出すことで、自身の用途におけるトルク カウント情報を取得できます。ストール スレッシュホールドは、定常カウントとストール カウントの平均として設定される必要があります。トルク カウントの特性評価は、動作条件の全範囲 (温度、電源電圧、速度など) にわたって、かつ正転と逆転の両方向について実施する必要があります。動作条件が大きく変動する場合、たとえばモーター速度が高低の間で変化するような場合には、すべての条件に対して単一のストール スレッシュホールドを設定することができない可能性があります。この場合、コントローラはストール スレッシュホールド用の参照テーブルを実装することがあります。場合によっては、モーターがストールした際の振動に起因するトルク カウントのリップルを除去するために、十分に大きな時定数を持つ外付けローパス フィルタが必要になることがあります。

4.3.1.1.2 ドライバ定義ストール スレッシュホールド

システム自体がストール学習モードに移行し、モーターの理想的なストール スレッシュホールドを計算できます。以下に、ストール学習モードの手順を示します:

- 無負荷の状態でもーターを動作させます
- STL_LRN = 1 を書き込んで学習を開始します
- 本ドライバが定常カウントを学習するように 32 電氣的サイクルの間待機します。待機時間は、ステップ周波数およびマイクロステップに依存します。
- モーターをストールさせます
- ドライバがストールカウントを学習できるように、16 電気サイクル待機します
- STL_LRN = 0 になるまでレジスタを読み出します
- STL_LRN_OK = 1 の場合、ストール スレッシュホールド値が計算されます。STL_LRN_OK = 0 の場合、ストール学習は成功しません。

- ストール スレッシュホールドは、定常カウントとストール カウントの平均として計算されます。学習が正常に完了すると、STALL_TH レジスタに適切なストール スレッシュホールドビットがロードされます。

特定の状況では、モーターの動作中またはストール時にトルク カウントが変動することにより、ストール学習プロセスが正確な結果を得られない場合があります。高いコイル抵抗や極端な速度などの要因により、トルク カウントに大きなばらつきが生じることがあります。その結果、定常状態のカウントとストール カウントの差が小さくなります。このような場合には、動作範囲全体にわたって定常状態のカウントおよびストール カウントを解析し、最小の定常状態カウントと最大のストール カウントの中間値にスレッシュホールドを設定することが推奨されます。

4.3.2 ハードウェア インターフェイス デバイス

DRV8434A や DRV8434A-Q1 などのハードウェア インターフェイス搭載デバイスでストール検出を有効にするには、以下の手順に従います。

1. **ストール検出の有効化:** アプリケーションで想定される通常のリターン速度および負荷電流条件で、モーターはスピンを開始します。STL_MODE はストール検出モードを設定します。STL_MODE ピンを GND または DVDD に設定すると、ストール検出が有効になります。STL_MODE ハイ インピーダンスは学習モードを有効にします。
2. **読み取りトルク カウント値:** STL_MODE ピンを GND に接続し、TRQ_CNT/STL_TH ピンのアナログ電圧を測定します。
3. **ストール スレッシュホールドの設定:** 次の 2 つの設定オプションから選択できます:
 - a. STL_MODE を DVDD に接続し、TRQ_CNT/STL_TH ピンに特定のスレッシュホールド電圧を印加します。この電圧はストールのスレッシュホールド電圧として使用され、内部の TRQ_CNT 値と比較されます。
 - b. ストール学習プロセスを通じて、アルゴリズムが理想的なスレッシュホールド値を自動的に学習させることを可能にします。

セクション **ハードウェア デバイスでストール スレッシュホールドを設定する方法** では、ハードウェア デバイスがストール スレッシュホールドを設定するために必要な手順について説明します。

4. **ストール レポートの監視:** STL_REP ピンはストール故障のレポート用に割り当てられており、グラウンドに直接接続すると機能が無効になります:
 - a. STL_REP ピンが High のとき、ストール故障が通知されます。
 - b. STL_REP > 1.6V の場合、nFAULT は low になります。

ENABLE ピンをフロート (ハイ インピーダンス モード) にすることで、TRQ_SCALE を有効にできます。これにより TRQ_COUNT を 8 倍にでき、初期の TRQ_COUNT 値が 500 未満の場合に、トルク測定を実質的にスケールリングして精度および分解能を向上させることができます。

4.3.2.1 ハードウェア デバイスでストール スレッシュホールドを設定する方法

ハードウェア インターフェイス搭載デバイスでは、ストール スレッシュホールドは次のいずれかの方法で設定できます。すなわち、ユーザー定義のストール スレッシュホールド、またはドライバ定義のストール スレッシュホールドであり、これらについては以下で詳細に説明します。

4.3.2.1.1 ユーザー定義のストール スレッシュホールド

ストール スレッシュホールド値を効果的に活用するには、使用事例に固有のトルク カウント情報にアクセスする必要があります。これは、STL_MODE を GND に接続した状態で、通常動作時およびストール時の両条件において、TRQ_CNT/STL_TH ピンのトルク カウント電圧を測定することで実現できます。その後、これらの測定値の平均を使ってストール スレッシュホールドを決定できます。

決定されたストール スレッシュホールドに基づいてストール故障を検出する方法は、二通りあります:

1. **TRQ_CNT/STL_TH ピンにストール スレッシュホールド電圧を印加する:** このモードでは、ストール スレッシュホールド情報を使ってストール検出を設定できます。STL_MODE を DVDD に接続すると、デバイスはストール スレッシュホールドの動作モードに入ります。続いて、設定したいストール スレッシュホールド電圧を TRQ_CNT/STL_TH ピンに印加します。この電圧は、内部 TRQ_CNT 値と比較されます。内部値が印加されたスレッシュホールドを下回ると、このデバイスは、STL_REP ピンを Low から High に駆動することでストール故障を通知します。STL_REP をプルダウンさせ、nFAULT を再びプルアップさせるには、nSLEEP リセット パルスを印加します。

2. **マイコンを使ったストール検出モード:** このモードでは、マイコンが TRQ_CNT/STL_TH 電圧を入力として取り込みます。マイコンはあらゆる二次的影響を補正し、その電圧を内部のストール スレッシュホールドと比較することで、ストールを検出します。これを実装するには、STL_MODE ピンを GND に接続し、TRQ_CNT/STL_TH ピンをマイコンの ADC ピンに接続する必要があります。次にマイコンは TRQ_CNT 値を指定されたストール スレッシュホールド値と比較し、必要に応じて故障を報告します。このモードは外部方式であるため、STL_REP ピンを GND に接続して、デバイスの内部ストール通知機能を無効にする必要があります。さらに、マイコンはトルク カウントに基づいて VREF を制御するアルゴリズムを実行でき、検出精度およびシステム性能を向上させることができます。

4.3.2.1.2 ドライバ定義ストール スレッシュホールド

このシステムは自動ストール学習モードを備えており、モーターに最適なストール スレッシュホールドを決定し、その値を TRQ_CNT/STL_TH ピンからアナログ電圧として出力します。スレッシュホールド値は内部にも保存され、後にトルク カウントモードで使用されます。これにより、学習モードで算出された最適なストール スレッシュホールドに基づいて、ドライバがストール故障を検出できるようになります。このプロセスを開始するには、次の手順に従います。

1. ストール スレッシュホールド学習の前に、モータ速度が目標値に達していることを確認します。モーター速度の上昇または下降中は、ストール スレッシュホールド学習を行わないでください。
2. STL_MODE ピンをハイ インピーダンスにして学習を開始します。
3. 無負荷の状態でもーターを動作させます。
4. 本ドライバが定常カウントを学習するように 32 電氣的サイクルの間待機します。
5. モーターをストールさせます。
6. ドライバがストール カウントを学習するよう、16 電氣的サイクルの間待機します。
7. 学習が成功すると、STL_REP が Low にプルされます。
8. ストール スレッシュホールドは、定常カウントとストール カウントの平均として計算されます。
9. 学習が成功すると、TRQ_CNT/STL_TH ピンはストール スレッシュホールドをアナログ電圧として出力し、トルク カウントモードで使用するためにその値を内部に保存します。
10. 学習が成功した後、STL_MODE の論理レベルを変更することでこのデバイスがトルク カウント モードまたはストール スレッシュホールド モードに移行すると、STL_REP は High に遷移し、nFAULT はプルダウンされ、TRQ_CNT/STL_TH ピンの電圧はリセットされます。
11. STL_REP をプルダウンさせ、nFAULT を再びプルアップさせるには、nSLEEP リセット パルスを印加します

4.4 ストール検出機能の実験結果

アダプティブ ヘッドライト用途で一般的に使用されている PL35L-024 ステッピング モーターを、ストール検出実験に使用しました。このモーターは最大 450mA の駆動電流に定格されており、コイル抵抗は 7.7Ω です。図 4-3 に示すように、動作方向に応じて、モーターシャフトは内側または外側に移動します。8 ビットの TRQ_COUNT を備えたデバイス (DRV8889_Q1 など) では、MSP430 マイコンがマイコン内蔵の 8 ビット DAC を使用して TRQ_COUNT をアナログ電圧に変換します。DAC のフルスケール範囲は 3.3V で、TRQ_COUNT レジスタの 256 カウントに対応します。したがって、一つの TRQ_COUNT ビットは 12.89mV と表されます。一方、12 ビットの TRQ_COUNT を備えたデバイス (DRV8434S など) では、MSP430 マイコンがマイコン内蔵の 12 ビット DAC を使用して TRQ_COUNT をアナログ電圧に変換します。DAC のフルスケール範囲は 3.3V で、TRQ_COUNT レジスタの 4096 カウントに対応します。したがって、単一の TRQ_COUNT 値は 0.81mV と表されます。

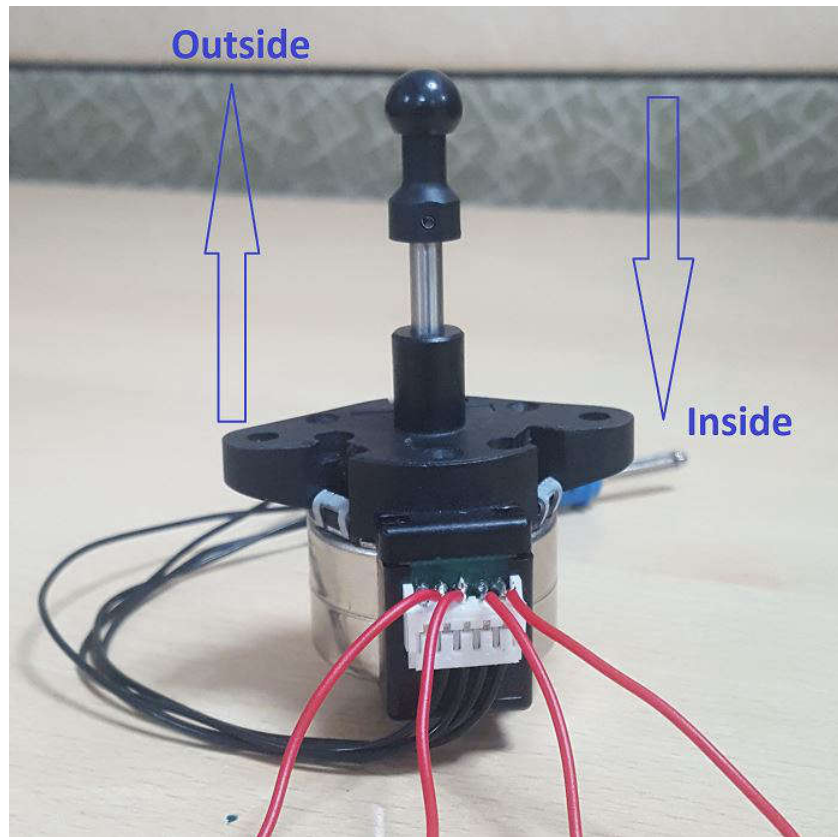


図 4-3. 車載用途に使用される PL35L-024 ステッピング モーター

4.4.1 通常状態およびストール状態におけるモーター波形

図 4-4 および図 4-5 に、通常条件とストール条件でのモーター コイル電流、TRQ_COUNT 値、ステップ パルスをそれぞれ示します。電源電圧 13.5V において、DRV8889-Q1 デバイスはフルステップ モードに設定され、125pps の速度で動作し、フルスケール電流 200mA、スルーレート 105V/ μ s の条件で動作しています。モーターがいずれかのエンドストップに到達すると、ストール状態になります。図から明らかなように、モーターが公称速度で動作している場合、バック EMF によりコイル電流が歪み、 T_{OFF} フェーズ中に本来減衰すべき電流が上昇します。その結果、DAC の出力電圧は約 500mV で、TRQ_COUNT 38 に相当します。これに対し、モーターがストールしている場合はバック EMF が存在しないため、すべての象限でコイル電流が均一となり、トルク カウントは 0 に低下します。

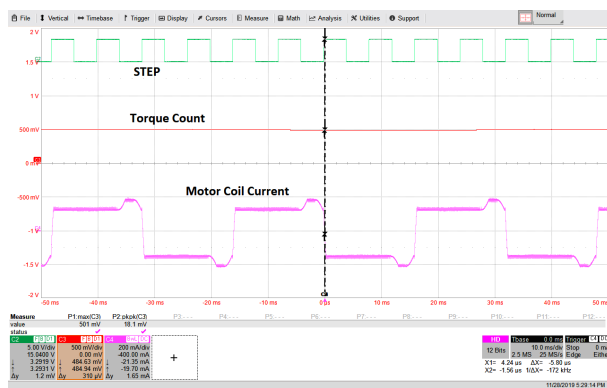


図 4-4. モーター動作時のコイル電流とトルク カウント

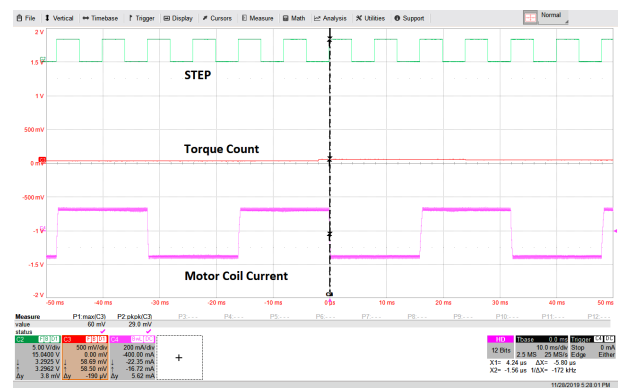


図 4-5. モーターがストールしているときのコイル電流およびトルク カウント

4.4.2 TRQ_COUNT/STALL_TH の分解能分析

このセクションでは、DRV8889-Q1 における 8 ビット実装と DRV8434S における 12 ビット実装を比較し、TRQ_COUNT および STALL_TH の分解能がセンサレスストール検出性能に及ぼす影響を検証します。モーターは 1/4 マイクロステップモードで動作し、ステップレートは 500PPS、スルーレートは 105V/μs、フルスケール相電流は 200mA に設定されています。モーター シャフトは内側方向および外側方向の両方向に繰り返し駆動され、それぞれの方向でストール状態に移行させることで、対応する TRQ_COUNT の挙動を観察します。図 4-6 に示すように、8 ビットの TRQ_COUNT を実装している DRV8889-Q1 では、通常動作時のトルクカウントは約 75 カウント (約 970mV) で、これはフル 8 ビット範囲の 30% に相当します。外側方向に移動する場合は 58 カウント (約 750mV) で、これはフル 8 ビット範囲の約 22% に相当します。8 ビットの分解能により、トルク カウントははるかに粗くなります。一方、図 4-6 に示すように、DRV8434S は 12 ビットの TRQ_COUNT を備えており、トルク分解能を大幅に高精度に設定できます。TRQ_SCALE を無効にした場合、通常動作時の TRQ_COUNT は約 125 カウント (約 100mV) で、12 ビット全範囲の約 3% に過ぎません。スケールリングされていないトルク カウントは利用可能な範囲のより小さい部分を占有しますが、分解能が高いため、通常の動作とストールを明確に区別できます。図 4-6 に示すようにトルク カウントが 500 未満の場合には TRQ_SCALE 機能を有効にすることを推奨します。これにより、TRQ_CNT および STL_TH の値は 8 倍にスケールリングされ、内側移動、外側移動、ストール状態の区別が向上するとともに、高い分解能が維持されます。

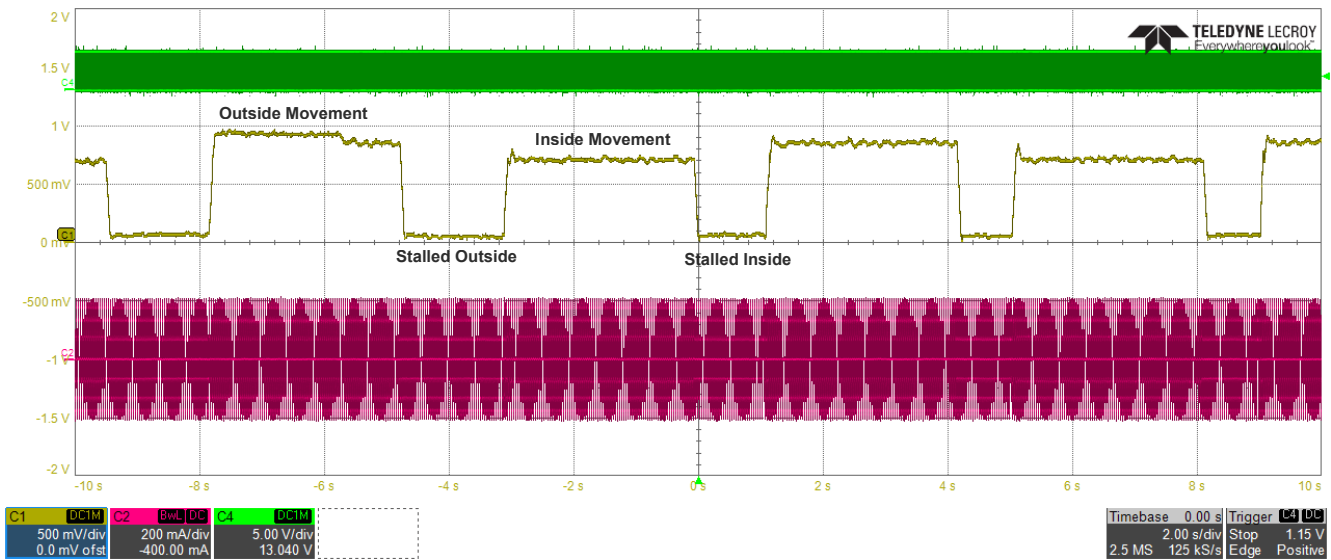


図 4-6. DRV8889 の PL35L-024 モーターのトルク カウント

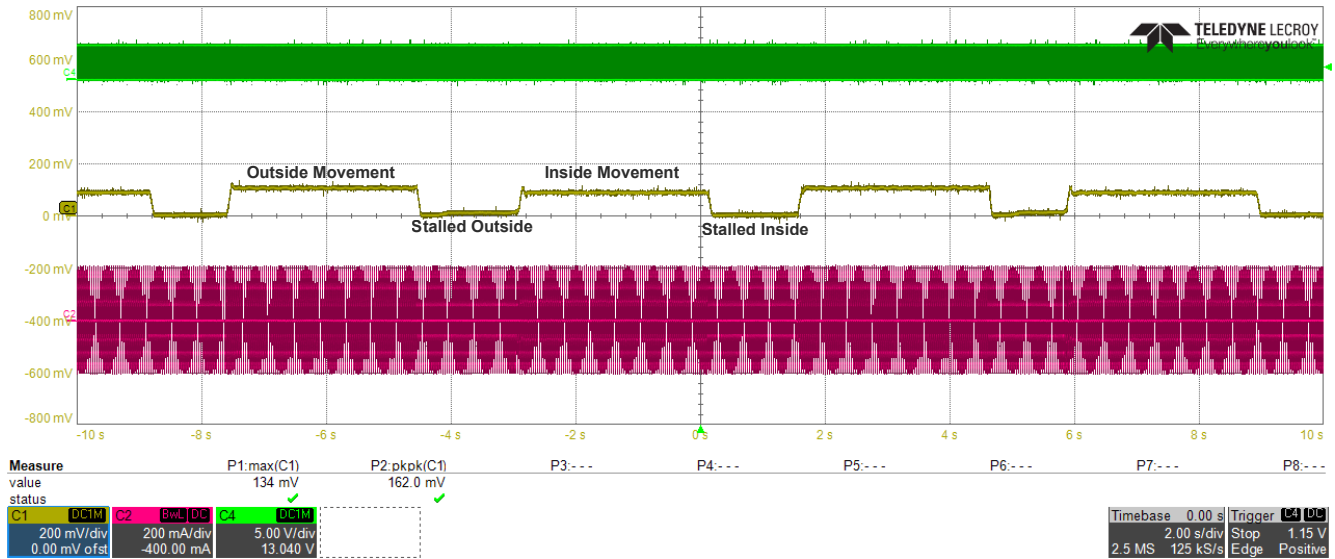


図 4-7. トルクスケール無効時における DRV8434S での PL35L-024 モーターのトルクカウント

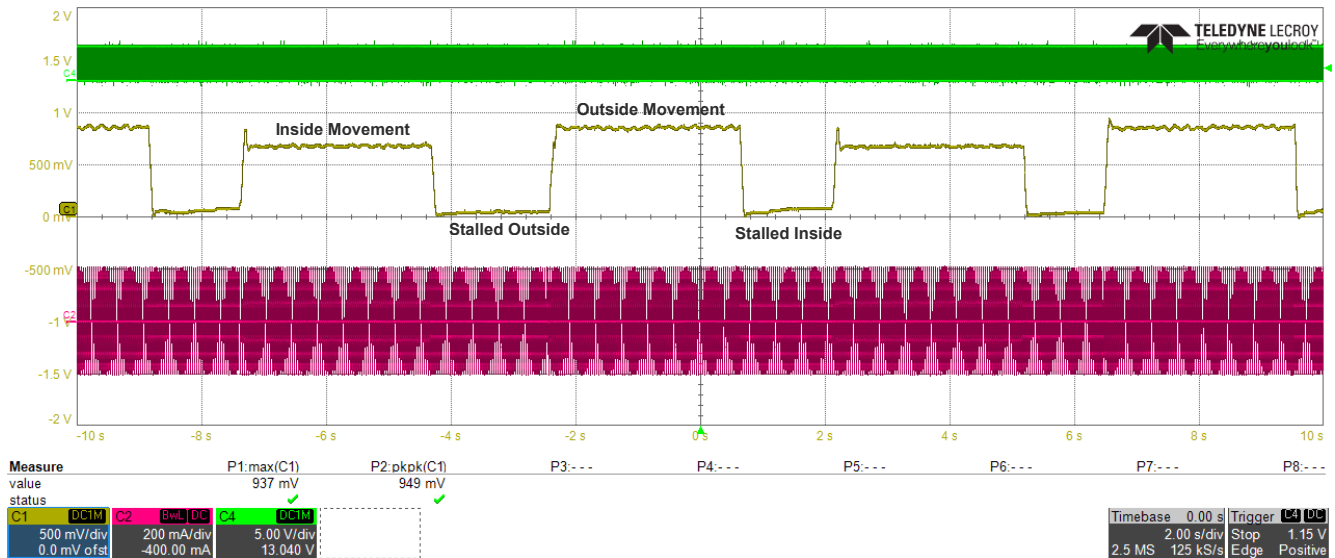


図 4-8. トルクスケール有効時における DRV8434S での PL35L-024 モーターのトルクカウント

4.4.3 動作条件によるトルクカウントの変動

トルクカウントは、電源電圧、温度、その他の動作条件が変動してもほぼ一定です。ただし、このセクションで詳述するように、二次的な影響によりトルクカウント値にわずかな変動が生じる場合があります。

4.4.3.1 モーター速度および回転方向による変動

トルクカウントは、モーターの動作方向によって変動する場合があります。モーターにかかる実効負荷は、動作方向によって変わる場合があります。例えば、回転子の動きは、ある方向では重力やコイルスプリングによって補助され、反対方向ではそれらにより抵抗を受ける場合があります。負荷の違いにより、コイル電流に対するバック EMF の位相変化が異なります。これにより動作方向に応じて定常カウントが異なります。

図 4-9 は、PL35L-024 モーターの定常カウントが、回転子のシャフトが内側に動く場合と外側に動く場合でどのように変化するかを示しています。モーターはフルステップモードで動作しており、フルスケール電流は 200mA に設定され、スルーレートは 105V/μs でした。電源電圧は 13.5V でした。なお、定常カウントはモーター速度の増加に伴い、ほぼ直線的に増加します。これは、バック EMF がモーター速度に比例するためです。高速になるほどバック EMF が増加し、それに

伴い立ち上がりおよび立ち下がり電流象限間での T_{OFFs} との差分が拡大します。つまり、トルク カウントが増加します。DRV8434S は、分解能が高いため、トルク カウントが高くなります。

モーターがストールしているときのトルク カウント (ストール カウント) も、動作方向によって変動する場合があります。ストール カウントは、エンド ストップの硬さに依存します。移動端に到達しても、実際には回転子がストールしない場合があります。エンドストップが緩い、弾性的である、または柔らかい場合には、回転子が跳ね返ることでスピンを続けることがあります。通常、ストールした回転子が移動しようとする振動します。ただし、回転の動きはバック EMF につながります。ステップ角が大きいモーターは、ステップ角が小さいモーターに比べて振動が大きくなる場合があります。このような場合、ストール カウントは定常カウントよりも大幅に小さくなりますが、ゼロではありません。同じ動作条件における PL35L-024 モーターのストール数を、図 4-9 に示します。

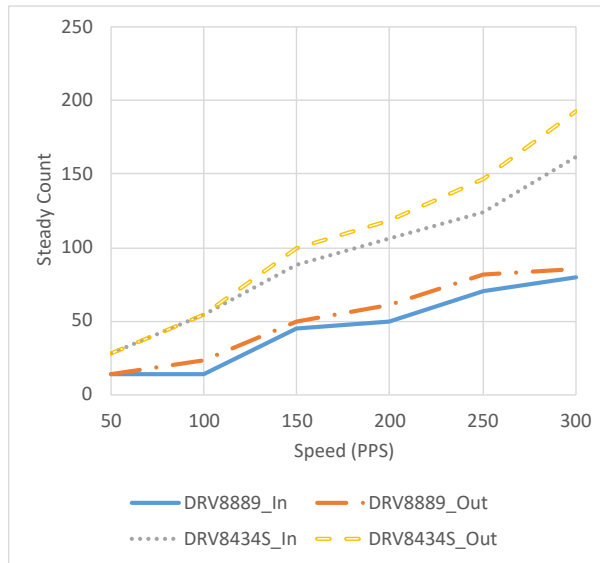


図 4-9. 動作方向の違いによる定常カウントの速度依存性

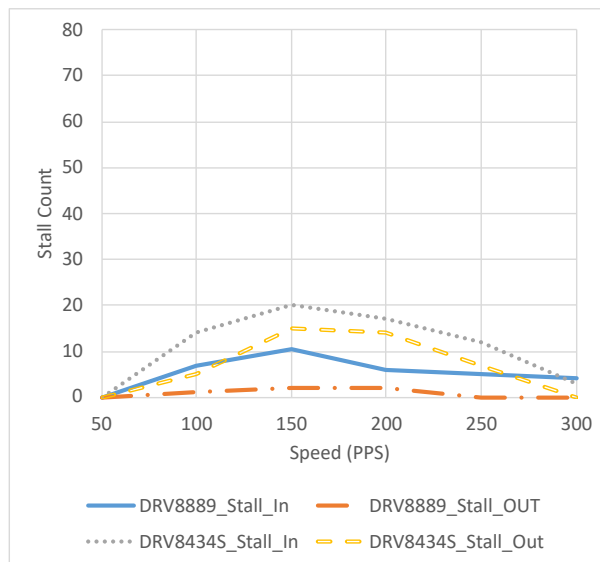


図 4-10. 動作方向によるストール カウントの変化

4.4.3.2 モーター低速動作に起因する制約

低速動作は、バック EMF が本質的に低いいため、ストール検出において最も厳しい条件となります。図 4-11～図 4-11 は、1/8 マイクロステップングを用いた 150PPS および 100PPS での定常トルク カウント測定結果を示しており、DRV8889-Q1 と DRV8434S について、TRQ_SCALE 機能の有効と無効を比較しています。

DRV8889-Q1 では、[図 4-11](#) は、150PPS においてトルク カウントが非常に低く、通常は 10 未満の値にとどまることが示されています。さらに、トルク カウントの分解能が比較的粗いため、トルクの変動幅が小さくノイズフロア付近にとどまり、その結果、通常動作とストール状態との分離が不十分になります。その結果、低速時における DRV8889-Q1 のストール検出は、信頼性の確保が一層困難になります。

一方、DRV8434S は、TRQ_SCALE を無効にした場合でも、主に有効なトルク カウント分解能が高いことにより、低速時のトルクの可視性が向上しています。[図 4-11](#) に示すように、150PPS におけるトルク カウント波形は、DRV8889-Q1 と比較してより滑らかで、分解能も向上しています。ただし、非常に低速な条件では、トルク カウントの絶対振幅は利用可能なダイナミックレンジに制約されるため、トルク スケーリングの必要性が明確になります。DRV8434S ([図 4-11](#)) で TRQ_SCALE がイネーブルの場合、明確な改善が観察されます。トルク スケーリングにより有効なトルク カウント振幅が増加し、通常動作とストール イベントとの分離が大幅に向上します。より高い分解能により、これらの動作状態をより細かく区別することができます。

100PPS では、DRV8889-Q1 の制限がより明確になります。[図 4-11](#) に示すように、分解能が粗いため、トルク カウントは動作時およびストール時のいずれにおいてもゼロ付近まで低下し、この速度では信頼性の高いストール検出が事実上不可能になります。これに対し、DRV8434S は[図 4-11](#) に示すように TRQ_SCALE がデイスエーブルの場合でもトルク観測性が向上します。TRQ_SCALE を有効にすると、DRV8434S は 100PPS においても動作時とストール時を明確に区別でき、超低速動作下でも優れたトルク カウントの可視性を示します。

総じて、これらの結果は、より高いトルク カウント分解能とトルク スケーリングの組み合わせが、低速動作において本質的な優位性をもたらすことを示しています。DRV8889-Q1 と比較して、DRV8434S は、1/8 マイクロステップにおける 150PPS および 100PPS の両条件で、優れたトルク カウントの可視性、より大きなストール検出マージン、ならびに高い堅牢性を実現します。TRQ_SCALE 機能の追加により、利用可能なトルク測定レンジが最大化され、これらの利点はさらに拡張されます。その結果、DRV8434S は、信頼性の高いストール検出が重要となる超低速かつ高精度のモーション制御アプリケーションに適したデバイスとなります。

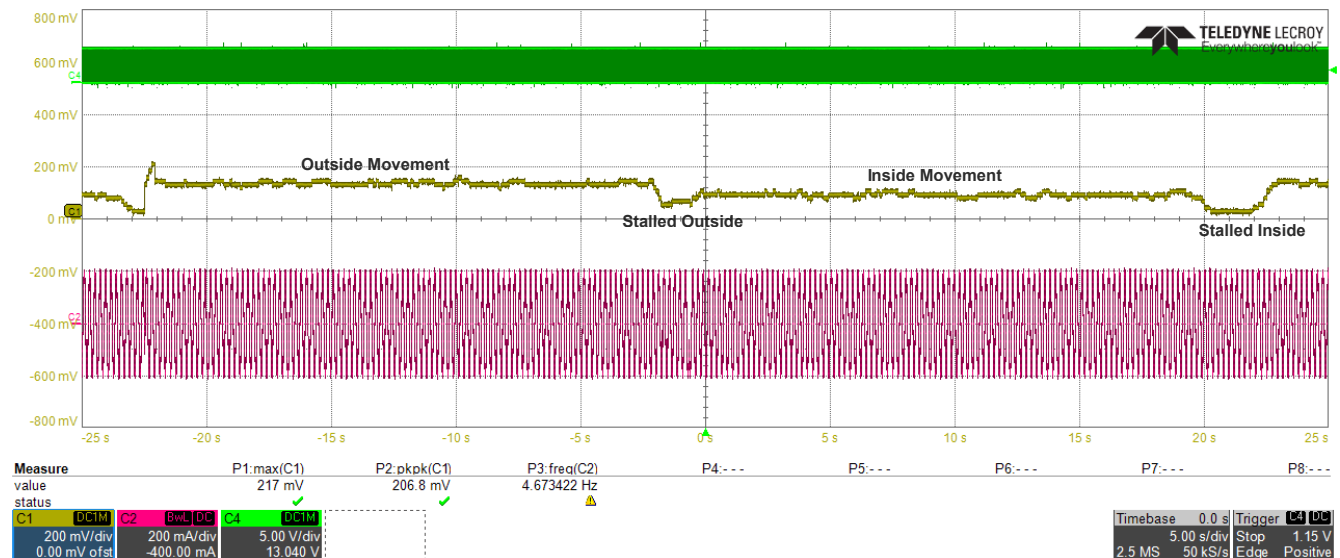


図 4-11. DRV8889-Q1 の 150pps での定常カウント

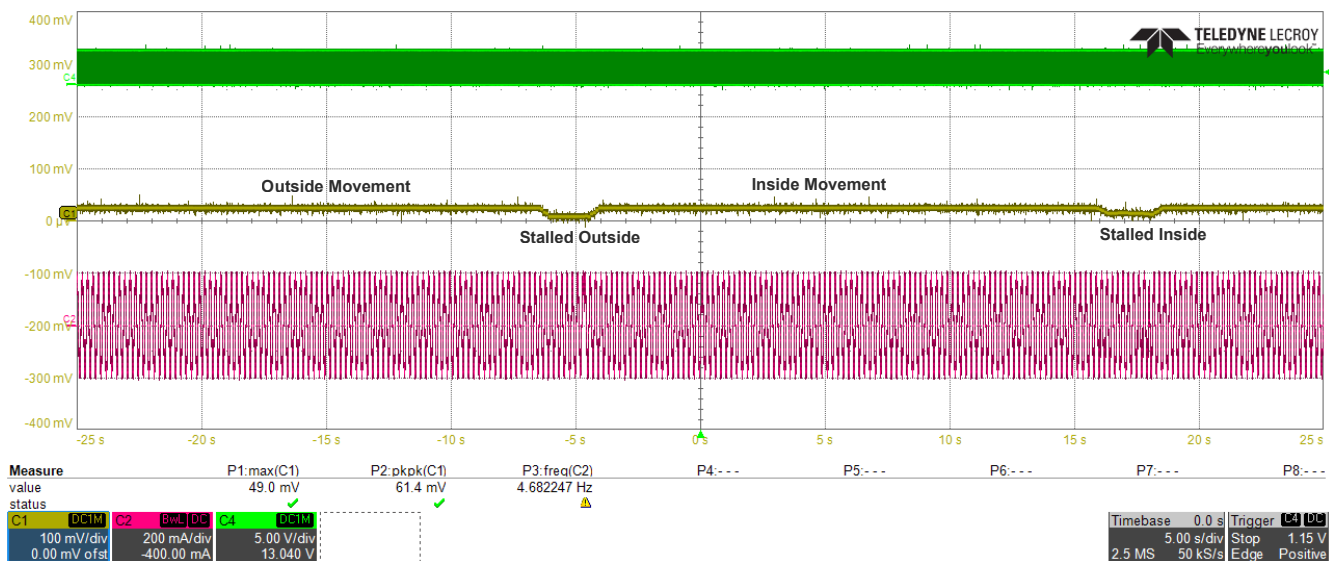


図 4-12. TRQ_SCALE 無効時の DRV8434S における 150pps での定常カウント

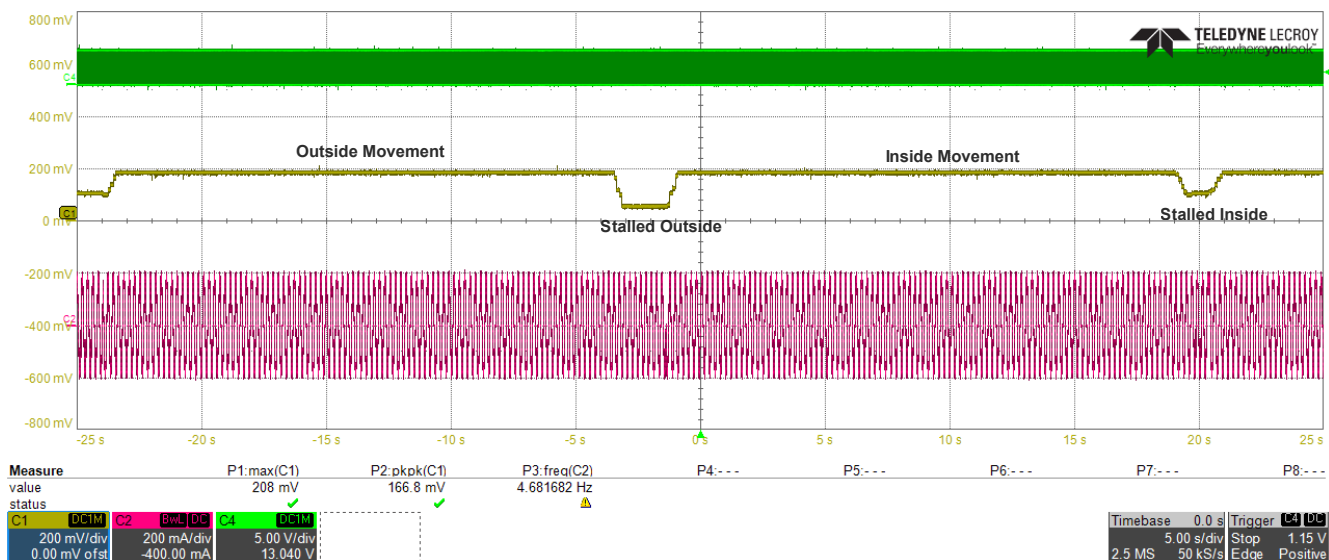


図 4-13. TRQ_SCALE 有効時の DRV8434S における 150PPS での定常カウント

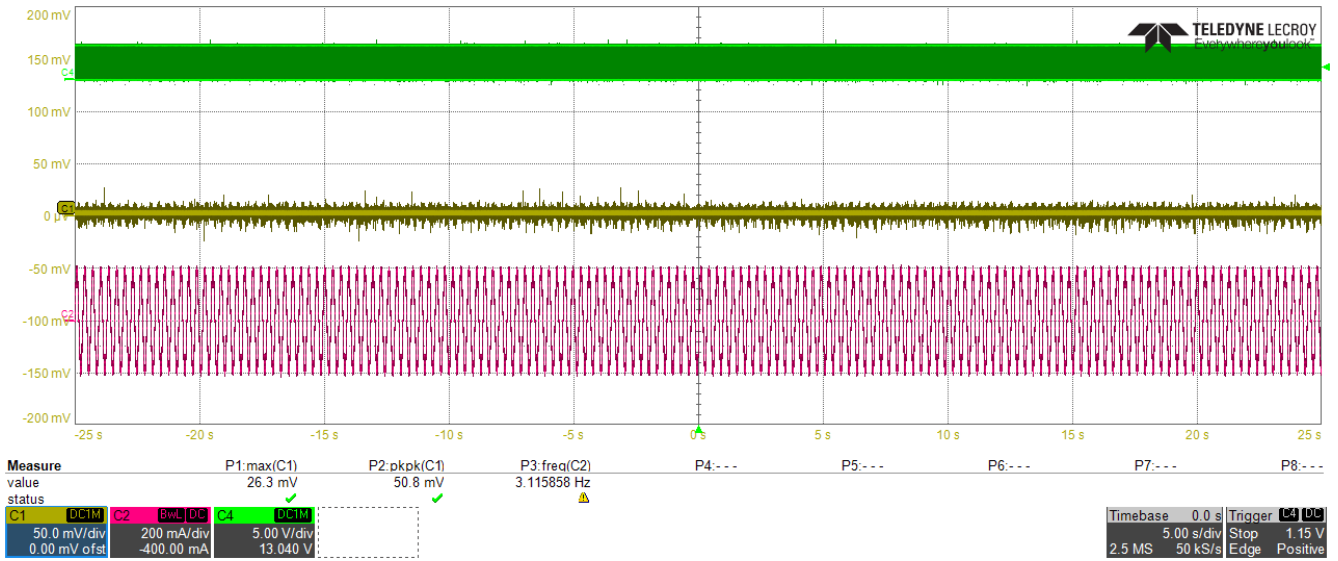


図 4-14. DRV8889-Q1 の 100PPS での定常カウント

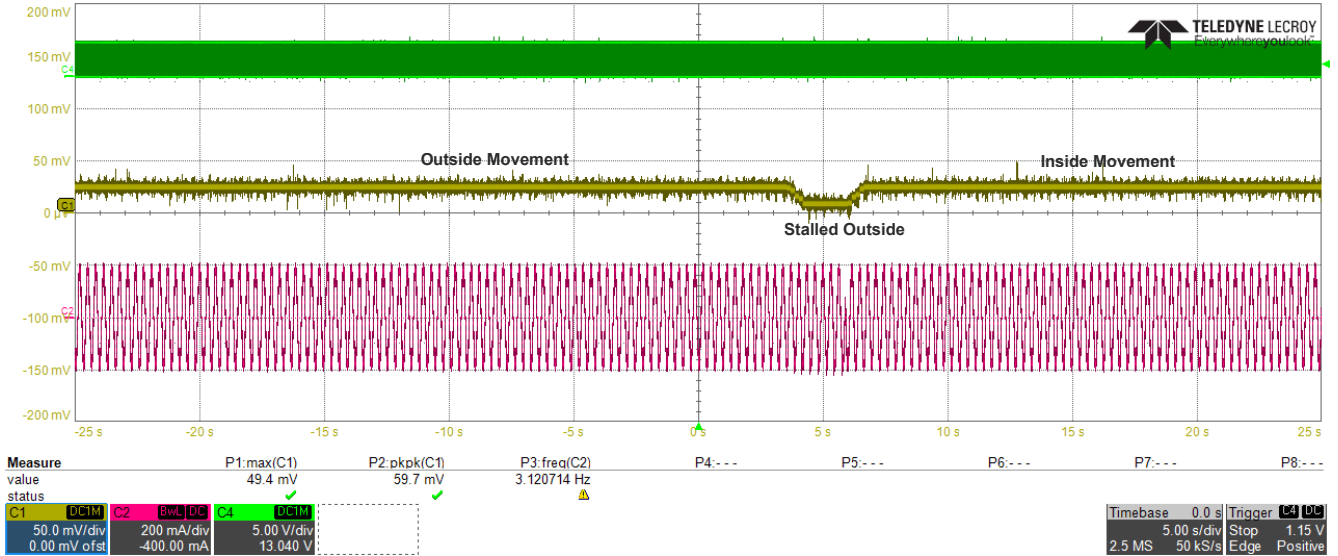


図 4-15. TRQ_SCALE 無効時の DRV8434S における 100PPS での定常カウント

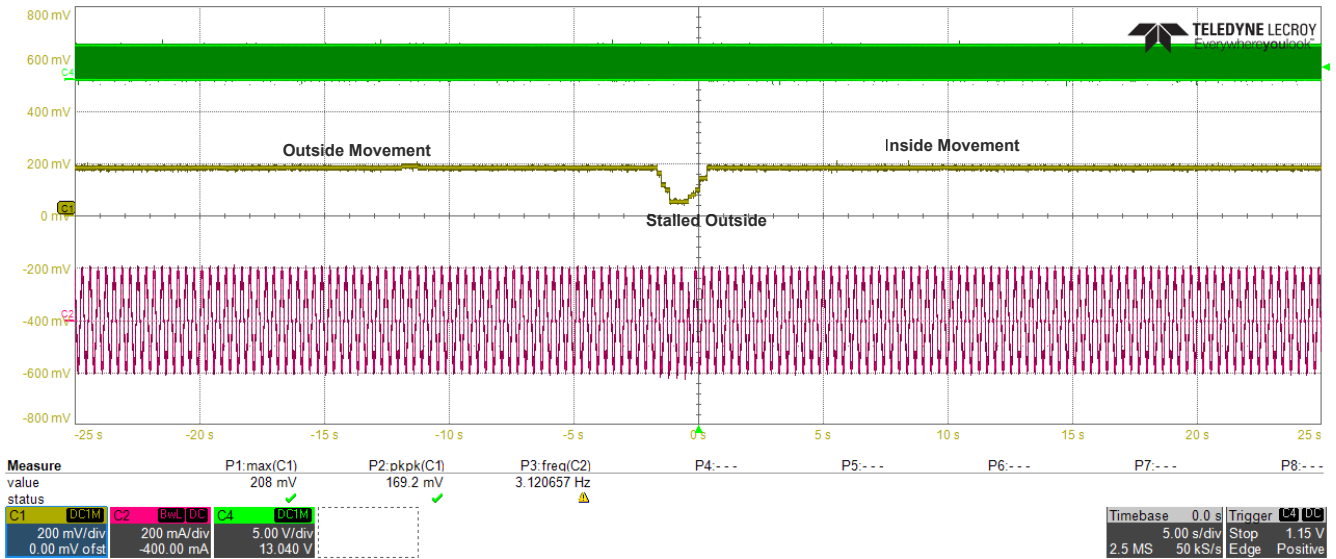


図 4-16. TRQ_SCALE 有効時の DRV8434S における 100PPS での定常カウント

4.4.3.3 モーターの高速動作による制約

高速動作および大きなバック EMF によりコイル電流が歪み、非常に高いモーター速度ではストール検出の信頼性が低下する可能性があります。以下の 4 つのオシロスコープ波形は、17PM-F438B モーターを 13.5V 電源、フルスケール電流 500mA で動作させたフルステップ モード時のコイル電流を示しています。

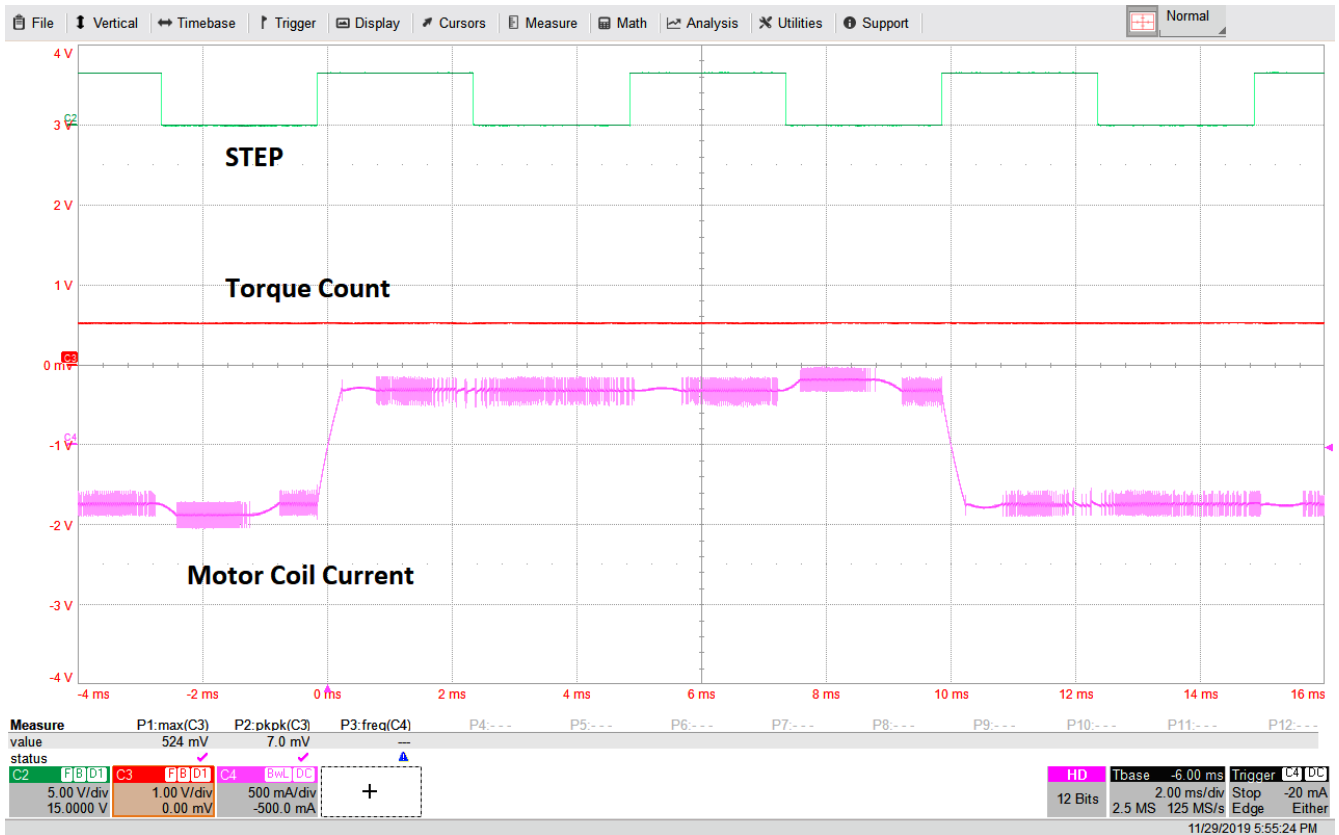


図 4-17. 200PPS での定常カウント

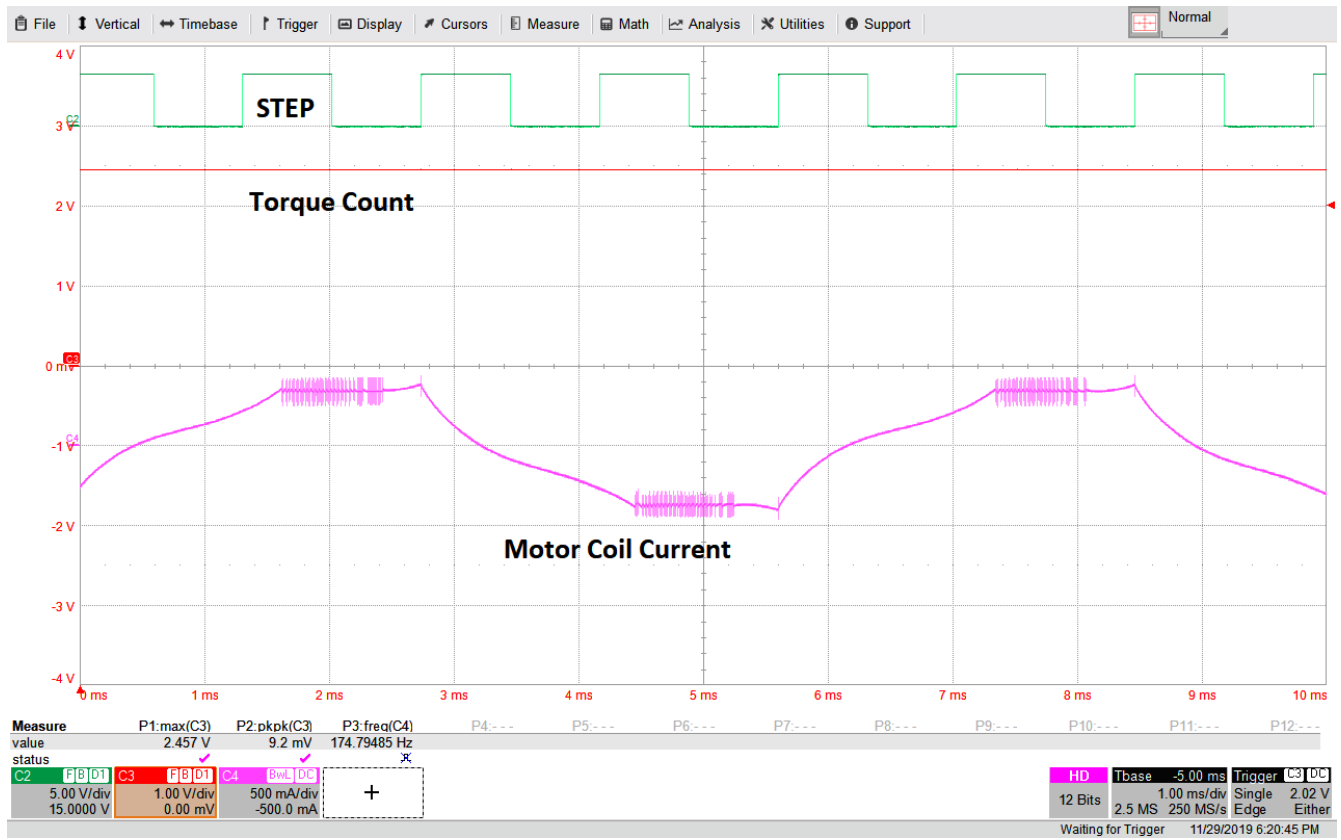


図 4-18. 700PPS での定常カウント



図 4-19. Q1 レギュレーションが失われたときの定常カウントの変更

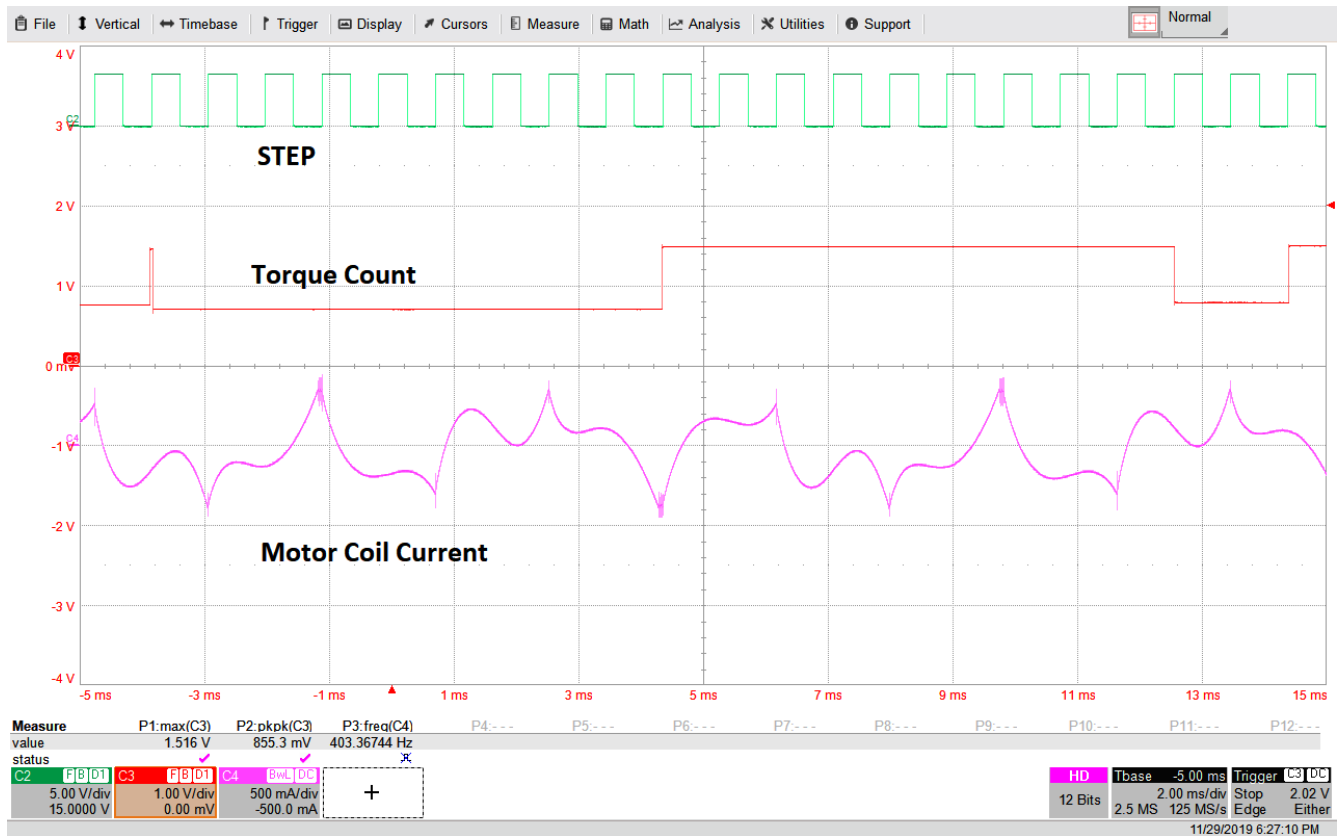


図 4-20. 1100PPS での定常カウント

図 4-17 に示すように、モーター速度が Q1 および Q2 の両象限で電流制御が維持される範囲にある場合、アルゴリズムは両象限の T_{OFF} を用いてトルク カウントを算出します。

図 4-17 に示すとおり、高速域では電流の立ち上がり時間が長くなりすぎるため、Q1 では電流レギュレーションが破綻しますが、Q2 では引き続き制御が行われます。この場合でも、ストールは確実に検出されます。Q1 において電流制御が失われると、図 4-17 に示すように、トルク カウント値が急激に跳ね上がります。

さらに高速 (図 4-17) になった場合、電流波形が非常に歪み、Q1 と Q2 の両方の象限でレギュレーションが失われる可能性があります。このような場合、アルゴリズムはストールを検出できなくなり、トルク カウント値は不安定になり、信頼性が低くなります。

図 4-17 に示す電流の立ち上がり時間は、よく知られている $V = L \times di/dt$ の式に従って、電源電圧、コイル インダクタンス、コイル電流レベルで決まります。立ち上がり時間が短いほど、より高い速度域でも電流を制御できます。したがって、(1) 低インダクタンスのモーター、(2) 低い電流レベル、(3) より高い電源電圧を用いることで、より広い動作速度範囲を実現できます。

4.4.3.4 電源電圧による変動

関式 5 式によると T_{OFF} パラメータは、電源電圧 (VM) に依存しません。したがって、ある象限の T_{OFF} の平均値を、次の象限の T_{OFF} の平均値と比較した場合、結果は電源電圧に依存しないはずですが、図 4-21 は、電源電圧に応じて定常カウントに小さな変動があることを示しています。このデータは、PL35L-024 モーターについて、1/8 マイクロステッピング、速度 1000PPS、スルーレート 105V/ μ s、フルスケール電流 200mA の条件で取得したものです。

この変動は、さまざまな電源電圧における電流リップルを確認することで説明できます。電圧が高くなるとリップルがわずかに増加し、その結果 T_{OFF} 値がわずかに増加します。しかし、Q2 象限における T_{OFF} の変化は、Q1 における T_{OFF} の変化よりもわずかに大きくなります。これは、高電圧時でもバック EMF の大きさが一定に保たれるためです。その結果、電源電圧の上昇に伴い、定常カウントがわずかに増加します。

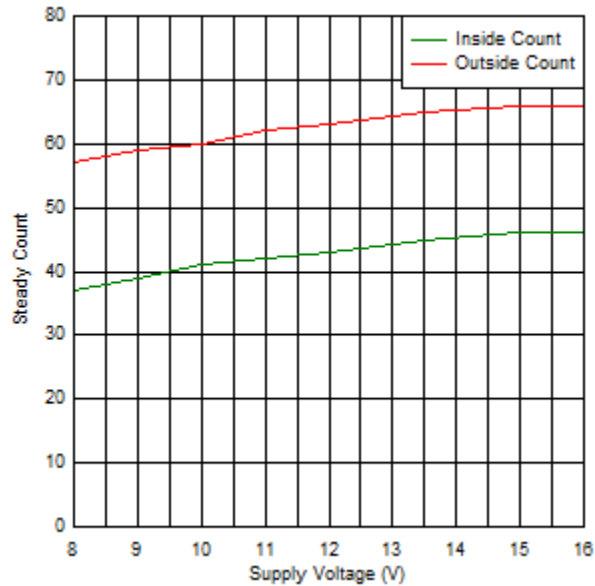


図 4-21. 電源電圧による定常カウントの変動

4.4.3.5 マイクロステッピング設定による変動

一般に、より高次のマイクロステッピングでは、トルク カウントは高くなる傾向があります。図 4-22 に、PL35L-024 モーターのマイクロステッピング設定による定常カウントの変動を示します。各マイクロステッピング設定において、最終的に毎秒 125 フルステップとなるように、モーター速度 (PPS) を調整しました。

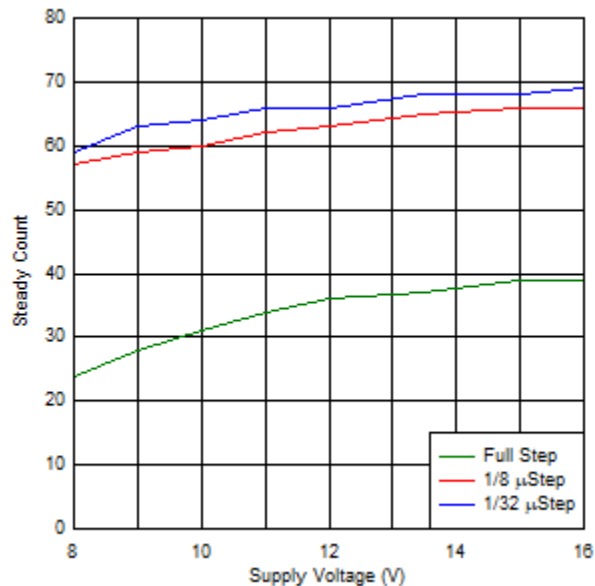


図 4-22. マイクロステッピングによる定常カウント変動

4.4.3.6 出力スルーレートの変動

出力スルーレートが遅くなるとトルクカウントが減少します。出力の立ち下がり時間が遅いため T_{OFF} はより低いスルーレートで減少し、その結果トルク カウントが低下します。

より高いスルーレートは、ドライバのスイッチング損失を最小限に抑えるためにも望ましいものといえます。その結果、所定の周囲温度において、より高い電流をサポートできます。逆に、スルーレートが小さいほど、EMC 性能は向上します。用途に適したスルーレートを選定するためには、慎重なトレードオフ分析を実施する必要があります。

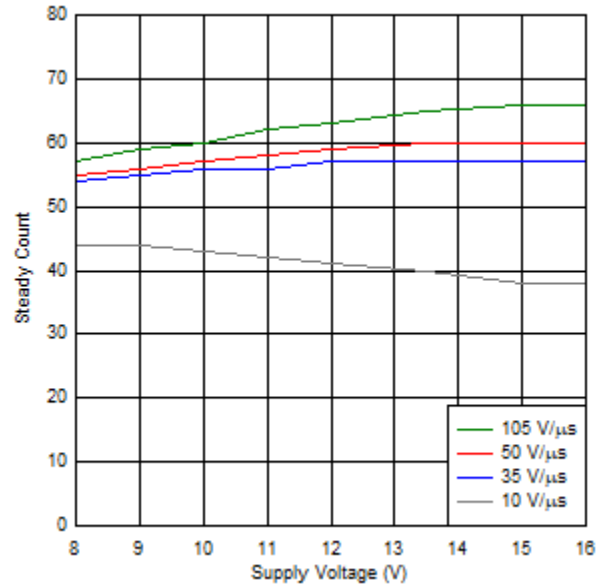


図 4-23. 出力スルーレートによる定常カウントの変動

4.4.3.7 周囲温度による変動

図 4-24 に、HVAC ガスバルブで使用されるステップの周囲温度に応じて内側カウントと外側カウントがどのように変化するかを示します。モーターは、300PPS の速度でフルステップ モードで動作していました。プロットから明らかなように、トルク カウントは周囲温度にほとんど依存しません。

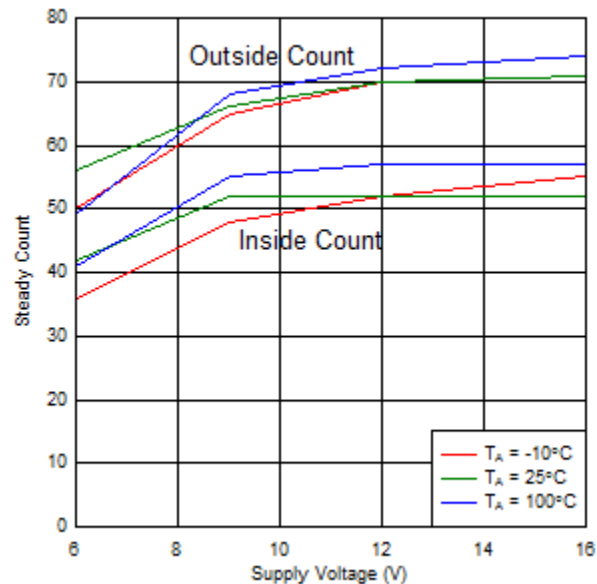


図 4-24. 周囲温度による定常カウントの変動

4.4.3.8 フルスケール電流設定による変動

電源電圧が一定の場合、フルスケール電流が高くなると定常カウントは低下します。モーター コイルにおける $I \times R$ コイルの電圧降下が大きいと、バック EMF が十分に得られなくなります。その結果 T_{OFF} がほとんど影響を受けず、カウントが低下します。

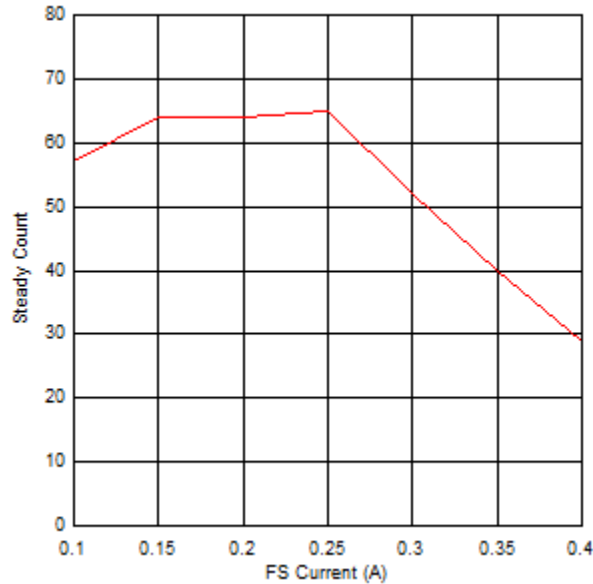


図 4-25. フルスケール電流による定常カウント変動

4.4.3.8.1 高コイル抵抗による制限

コイル抵抗が高すぎる場合、コイル電流の波形が歪み、バック EMF が T_{OFF} に影響を与えられなくなる結果、トルク カウントおよびストール検出が不安定になります。

図 4-26 は、抵抗 80Ω の HVAC バルブ モーターにおけるコイル電流波形を示します。電源電圧は 12V、フルスケール電流は 200mA です。トルク カウント波形が不規則であることは明らかであり、ストールを確実に検出することはできません。図 4-26 は、同一の動作条件におけるコイル抵抗 36Ω の別の HVAC モーターのトルク カウントを示します。モーターが一端でストールすると周期的な振動が発生し、その結果ストール カウントにスパイクが生じます。定常カウントとストール カウントの間にある程度の重なりがあったとしても、ストール カウントのスパイクを除去できる十分に大きな時定数を持つ外付けローパス フィルタを使用すれば、信頼性の高いストール検出が可能となります。

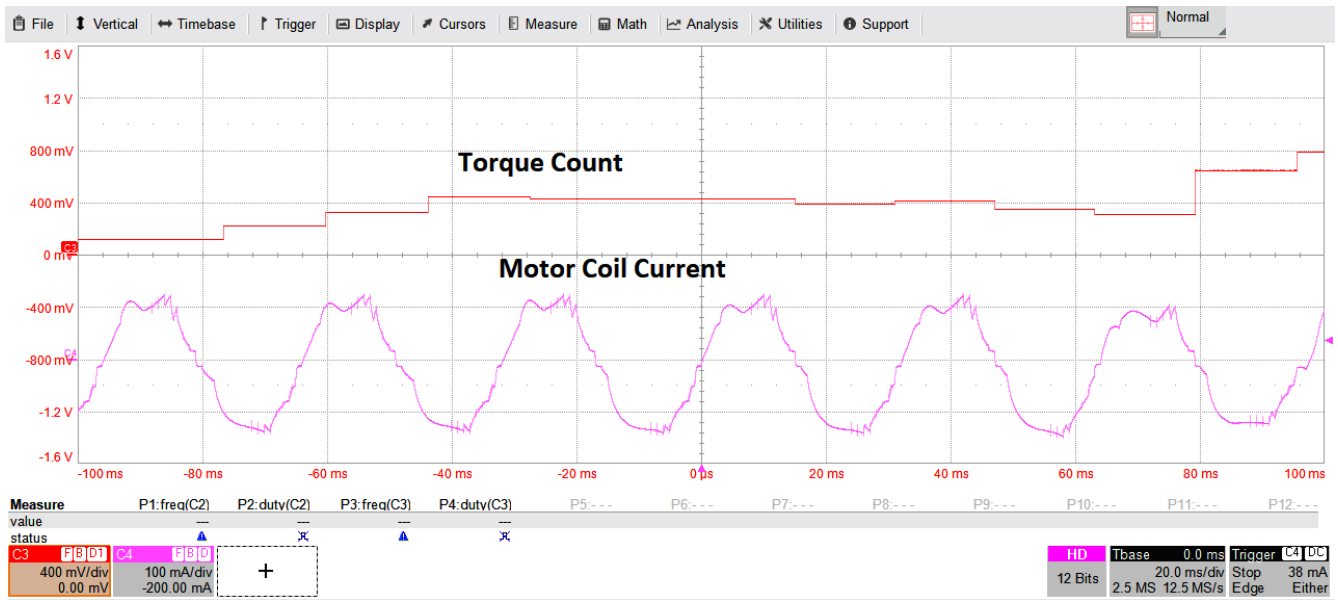


図 4-26. 抵抗 80Ω のパルス モーターのコイル電流波形

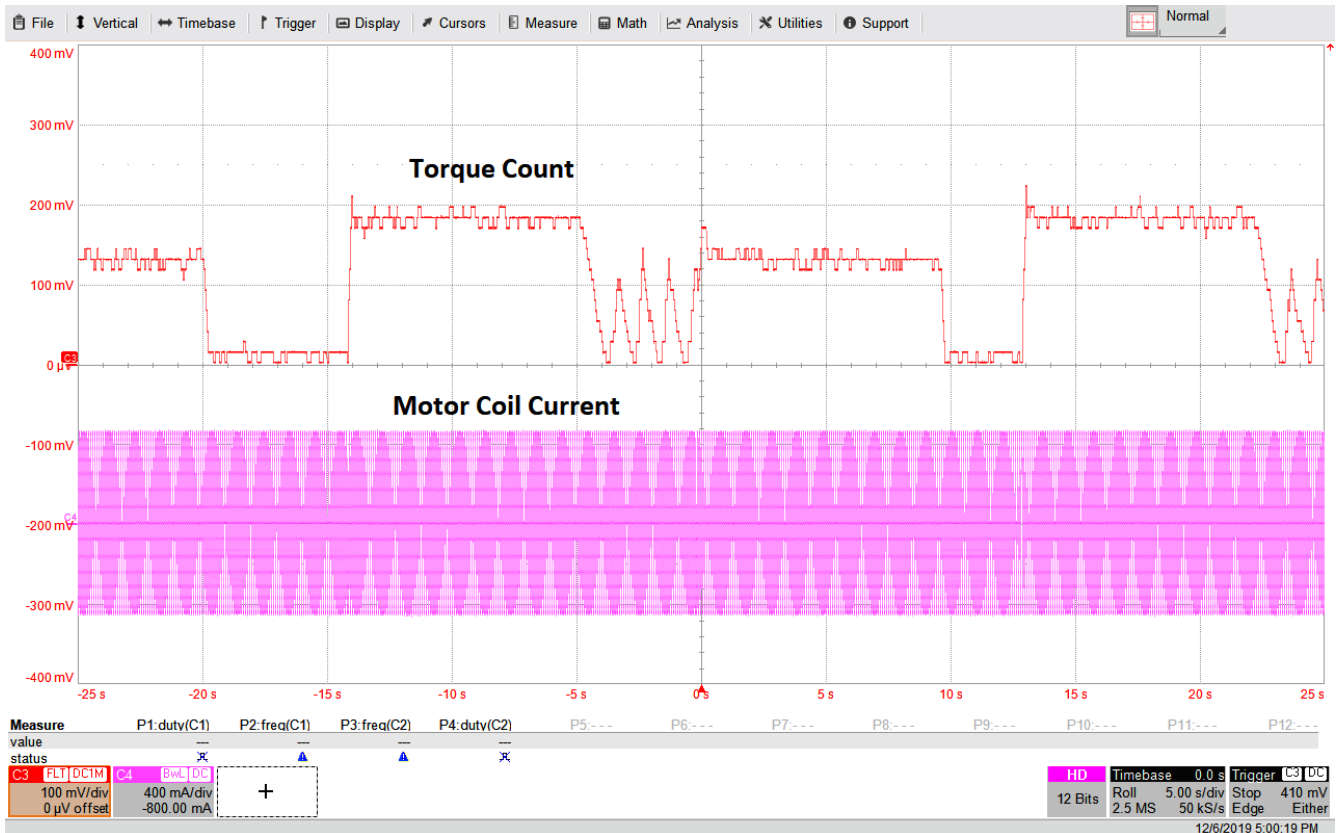


図 4-27. 抵抗 36Ω のパルス モーターのコイル電流波形

4.4.3.9 固定動作条件での定常状態におけるカウント変動

図 4-28 に、1/8 マイクロステップと 1000PPS の速度で動作する PL35L-024 モーターの定常カウントを示します。この波形のピークツーピークリップルは 42mV であり、カウントの変動量 3 に相当します。つまり、定常カウントは 63 から 66 の間で変化します。これは、バック EMF 電圧の特性やモータ構造におけるわずかな非対称性など、いくつかの要因による T_{OFF} の小さなランダム変動によって説明できます。

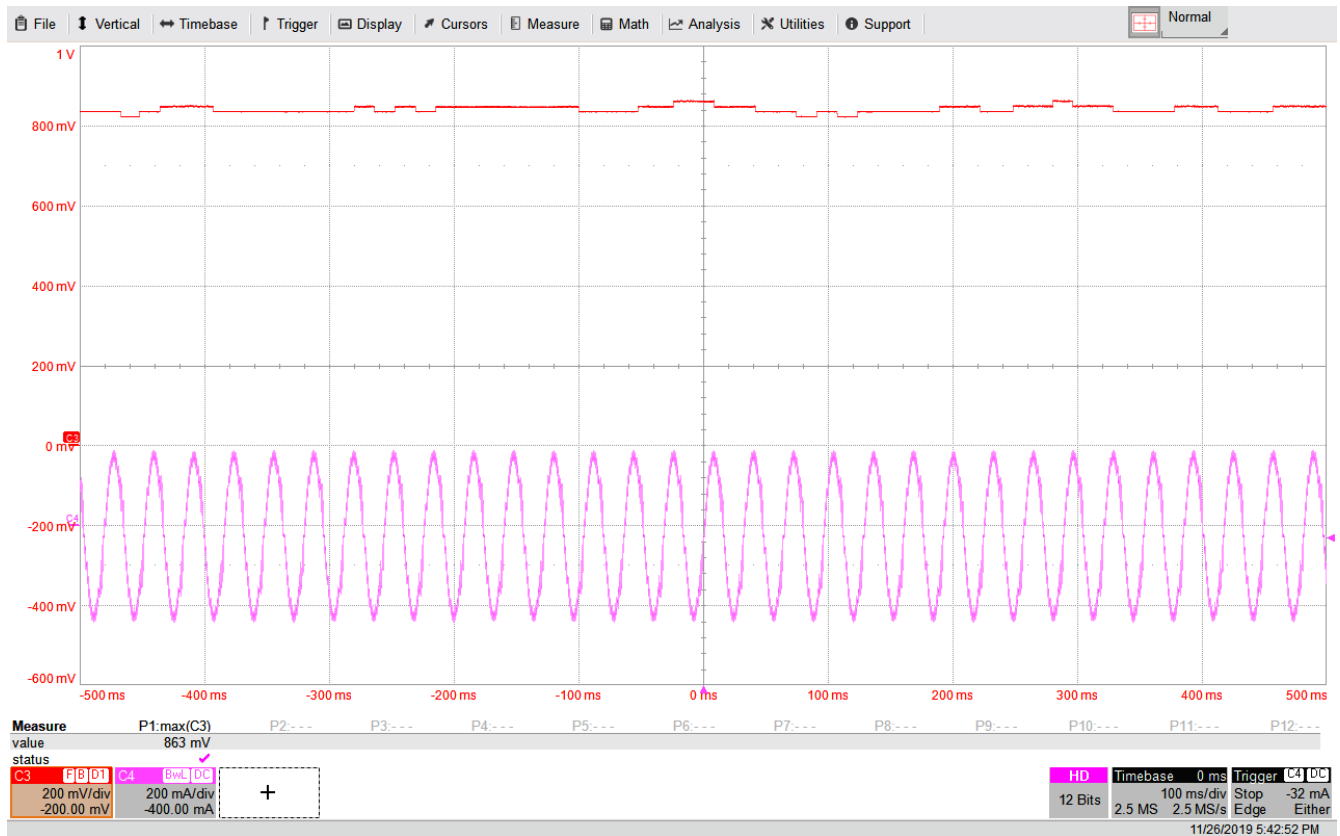


図 4-28. 定常状態のトルク カウントの変動

5 評価の例

5.1 車載ヘッドライトのレベリングとスイベル

アダプティブ フロント ライティング (AFS) システムは、地理的な場所のさまざまな自動車メーカーに広く使用されています。これらのシステムは、車両の路面に対する傾きの変化を補正するために、ヘッドランプの光軸をわずかに上下方向へ調整します。また、車両の進行方向の変化に応じて、ヘッドランプを旋回させます。ステッピング モーターは、低コストで堅牢性が高く、サイズに対して高トルクを発揮できるため、ヘッドランプの調整用途によく使用されます。

多くの自動車用ヘッドランプ システムでは、初期位置キャリブレーション時や通常動作時にモーターがエンドストップに当たるのを防ぐため、ストール検出が必要とされます。ストール検出機能がない場合、エンドストップに確実に到達させるために、推定されるエンドストップ位置を超えて複数ステップ分モーターを駆動します。その結果、モーターがブロック済みとなり、異音の発生や機械的な摩擦を引き起こします。可聴ノイズは電気自動車にとって特に影響を受けやすくなります。統合型ストール検出がない場合、モーターの角度位置に関するフィードバックを受信するために、高価な位置センサの使用を余儀なくされるシステムもあります。

以下の例は、DRV8889-Q1 が車載用ヘッドライト モジュールのストールを検出する方法を示しています。動作中、回転子のシャフトは内側または外側に移動し、両端でストールする可能性があります。この代表的なアダプティブ ヘッドライト アプリケーションの動作条件を表 5-1 に示します。

表 5-1. ヘッドライト ステップ モーターの動作条件

パラメータ	値
電源電圧範囲	9V ~ 16V
フルスケール電流	500mA
目標速度	122.5 フルステップ / 秒
マイクロステッピング	1/8 または 1/32
温度範囲	-40°C ~ 105°C

表 5-1. ヘッドライト ステップパ モーターの動作条件 (続き)

パラメータ	値
モーター コイルの抵抗	7.7 Ω
モーター ステップ角	15°

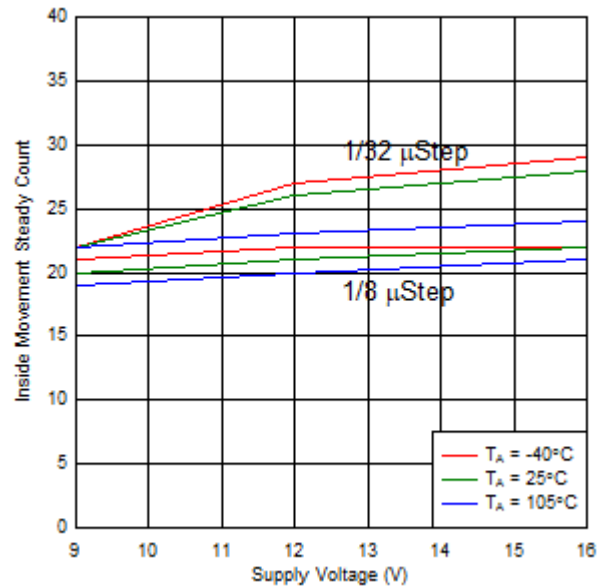


図 5-1. 動作条件全域で安定したカウント

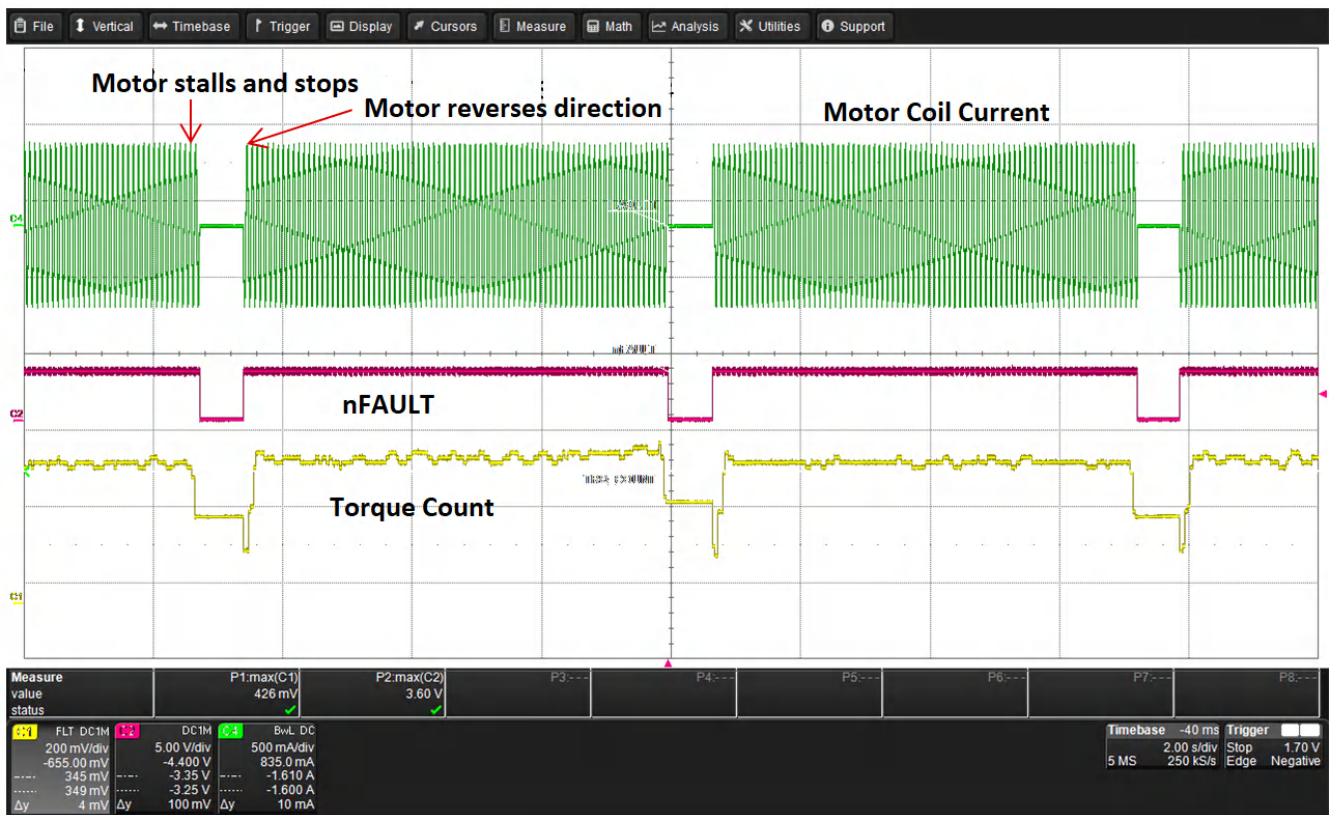


図 5-2. DRV8889-Q1 を用いたヘッドライト モジュールのストール検出

図 5-1 は、ヘッドライト モジュールの動作パラメータに対する内側移動時の安定したカウントを示しています。内側方向のカウントは、外側方向のカウントよりも低くなっています。最小内部カウントに基づいて、ストール スレッシュホールドとして 12 が選択されました。このスレッシュホールド設定により、DRV8889-Q1 は動作条件全域において両端で安定してストールを検出できることが、図 5-2 に示されています。トルク カウントがストール スレッシュホールドを下回ると、nFAULT 出力は Low になり、ストールが検出されたことをシステムに通知します。

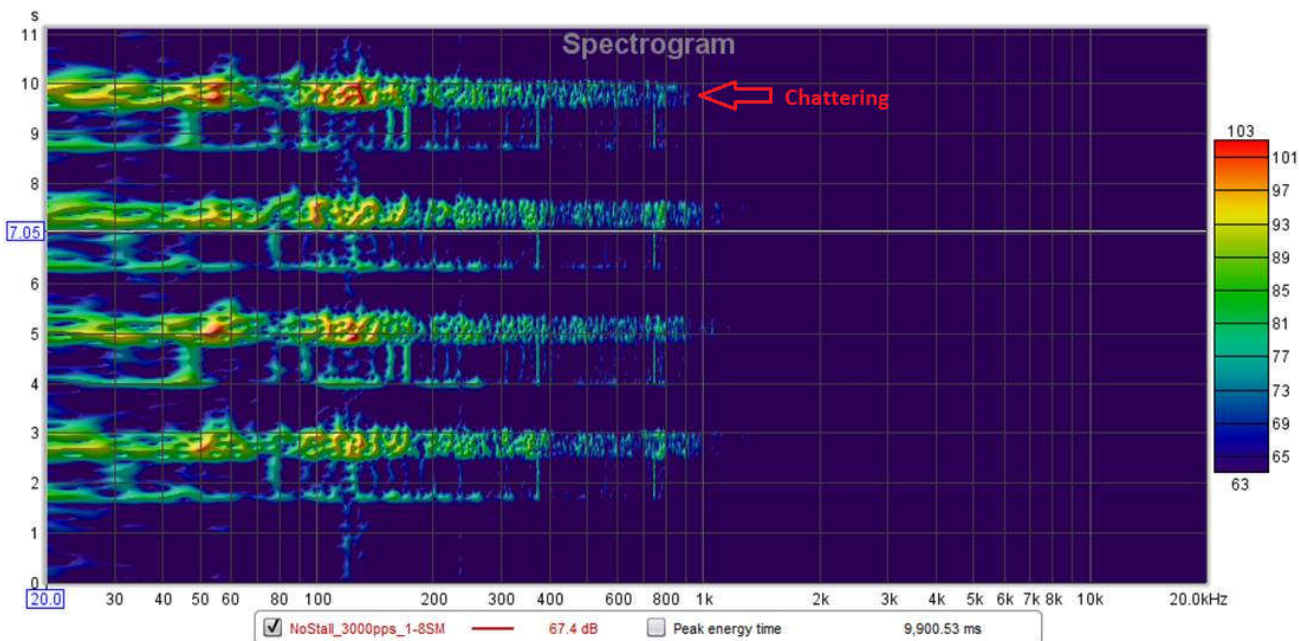


図 5-3. ストール検出機能を搭載していないオーディオ ノイズ分光器

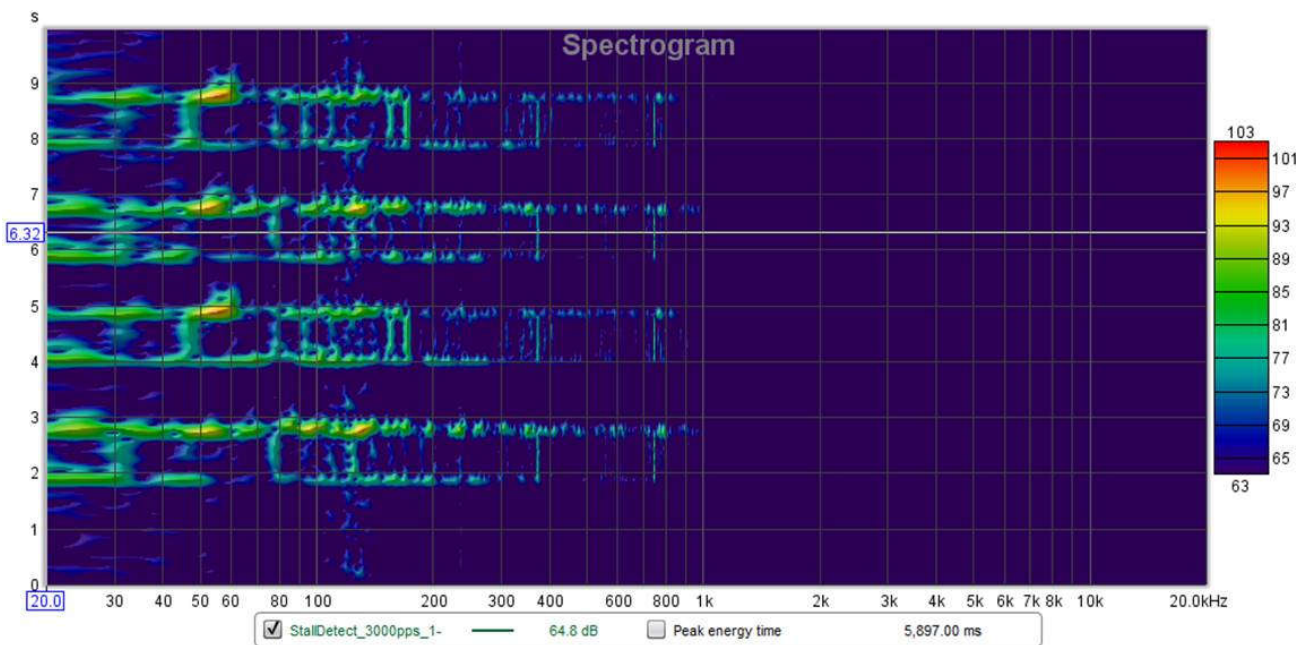


図 5-4. DRV8889-Q1 のストール検出における音響ノイズ スペクトログラム

図 5-3 と図 5-3 は、2 つのケースにおける音響ノイズのスペクトログラムを示しています。一方はヘッドライト モジュールがストール検出なしで動作する場合、もう一方は DRV8889-Q1 を用いて両端でストールを検出する場合です。図 5-3 は、約 55Hz および 100Hz から 200Hz の間に大きな音響ノイズが発生していることを明確に示しています。このスペクトログ

ラムは、モーターが確実に終端に到達したことを保証するために必要なオーバードライブの影響で、ステッピングモーターが終端に達した際にチャタリングを起こす様子も示しています。逆に、[図 5-3](#) は音声ノイズはほとんど存在しないことを示しています。つまり、100Hz から 200Hz の間で、チャタリングも存在しません。

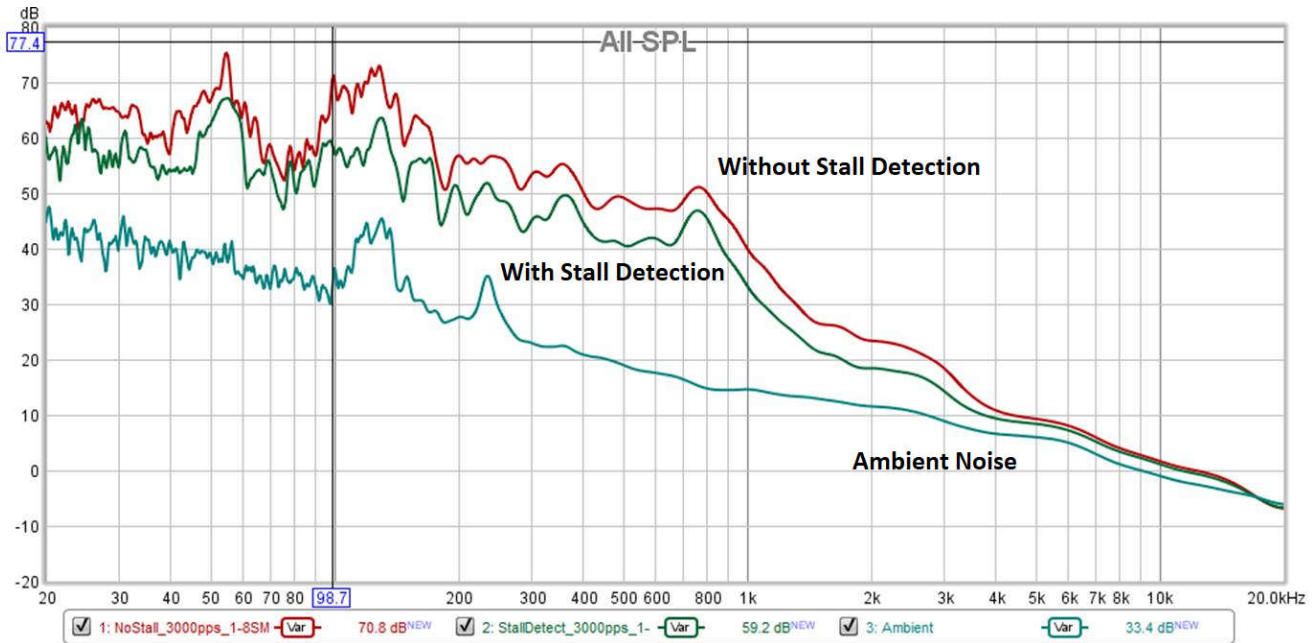


図 5-5. ストール検出あり / なしにおける音響ノイズ SPL プロット

[図 5-3](#) は、ストール検出による可聴ノイズの低減を示します。明らかに、ストール検出により、特定の周波数でノイズレベルが 10dB 以上改善されています。

5.2 車載ヘッドアップ ディスプレイ (HUD)

車載ヘッドアップ ディスプレイ (HUD) は、速度、ナビゲーション情報、RPM、警告表示、拡張現実オーバーレイなどの重要な走行情報を、フロントガラスの内側表面、または「コンバイナ」と呼ばれる透明なプラスチック板に投影することで、運転手を支援することを目的としています。このシステムでは、情報をフロントガラスまたはコンバイナに投影するために複数のレンズおよびミラーが必要であり、正確な位置決めを実現するために、ミラーを高精度に回転させる必要があります。そのため、多くの HUD ユニットではステッピングモーターが使用されており、ミラーがエンドストップに到達したことを確認するために、過度な動作音や機械的摩擦を発生させることなく検出できるセンサレスストール検出がしばしば要求されます。

以下の例では、DRV8889-Q1 デバイスが車載 HUD モジュールにおいてどのようにストールを検出するかを示します。このコンバイナ型 HUD モジュールでは、カスタムのバイポーラ ステッピングモーターを使用しており、リフレクタミラーを上下に移動させます。HUD アプリケーションの動作条件とステッピングモーターの詳細を[表 5-2](#) に示します。

表 5-2. HUD モジュールの動作条件

パラメータ	値
動作電圧範囲	8V ~ 16V
フルスケール電流	180mA
目標速度	2550 PPS
マイクロステッピング	1/32
温度範囲	-40°C ~ +85°C
モーター コイルの抵抗	20Ω ±7%
ステップ角度	0.514° / ステップ

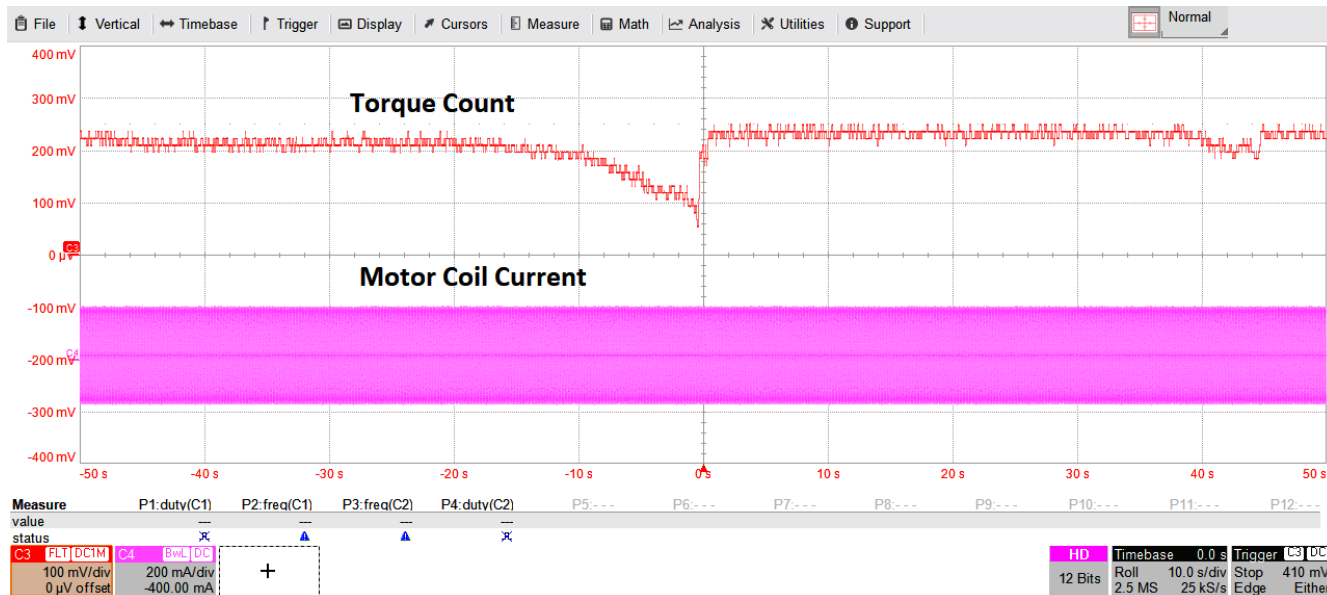


図 5-6. ストール検出

モーター ストール中のトルク カウントが減少する様子を示します。このアプリケーションでは、120mV (TRQ_COUNT = 10 に相当) のスレッシュホールドで、コーナー条件全体にわたり確実にストールを検出できます。

5.3 HVAC バルブ制御

HVAC バルブ制御アクチュエータは、ストール検出も必要です。センサレスストール アルゴリズムを内蔵したステッピングモータードライバは、たステッピング モーター を過駆動することなく、HVAC システム内のフラップやバルブ先端のエンドストップを高精度に検出できます。以下の例は、DRV8889-Q1 が HVAC バルブのストールを検出する方法を示しています。この HVAC アプリケーションの動作条件を表 5-2 に示します。

表 5-3. HVAC バルブの動作条件

パラメータ	値
動作電圧範囲	6V ~ 16V
フルスケール電流	300mA
目標速度	300 ステップ / 秒
マイクロステッピング	フルステップ
温度範囲	-30°C ~ +100°C

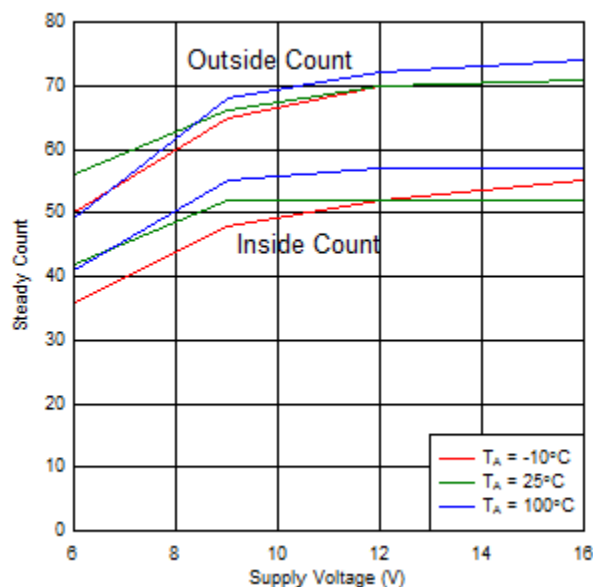


図 5-7. HVAC バルブ定常カウント

バルブ モーターは動作の両端で停止します。電源電圧の関数としての両方向の定常カウントを、図 5-7 に示します。ストール スレッシュホールドを 30 に設定すると、バルブ先端の両端でストールを確実に検出できます。

6 まとめ

さまざまなメーカーから、さまざまなセンサレス ストール検出方式が利用できます。テキサス インストルメンツ製ステッピングドライバに実装された新しいストール検出方式は、電源電圧、速度、その他の動作パラメータの広範な範囲にわたり、さまざまな用途でストールを確実に検出できます。アルゴリズムの堅牢性と使いやすさを兼ね備えていることから、これらのステッピングドライバは、さまざまな最終用途において位置フィードバックを送るために使用されてきた高価な位置センサの代替として理想的なオプションとなります。

7 参考資料

- Acarnley, Paul P. ステッピング モーター: 理論と実践のガイド。第 4 編、工学技術研究所、2007 年。
- Sooping Saw, Rakesh Raja, Anuj Jain, Matthew Hein 著、堅牢で効率的なステッピング モーター BEMF 測定のための方法および装置、米国特許 US10063170B2
- Sooping Saw, Rakesh Raja, Wen Pin Lin, Sudhir Nagaraj 著、モーター電流の立ち上がり整流相と立ち下がり整流相の間の差動逆起電力を使用したステッピング モーターのストール検出。米国特許 US20190109551A1
- テキサス インストルメンツ、DRV8889-Q1 車載用ステッピングドライバ (電流検出内蔵、1/256 マイクロステッピング対応、ストール検出機能搭載)、データシート
- テキサス インストルメンツ、DRV8434A ステッピングドライバ、内蔵電流センス機能、1/256 マイクロステッピング、スマート チューン、GPIO ピンによるストール検出機能搭載、データシート
- テキサス インストルメンツ、DRV8434S ステッピングドライバ、内蔵電流センス機能搭載、1/256 マイクロステッピング、SPI インターフェイス、スマートチューン テクノロジーおよびストール検出機能搭載、データシート
- テキサス インストルメンツ、DRV8461:65V、3A 対応高効率・低騒音動作ステッピング モーター ドライバ、データシート
- テキサス インストルメンツ、DRV8452:55V、5A 対応高効率・低騒音動作ステッピング モーター ドライバ、データシート
- テキサス インストルメンツ、DRV8462:65V、5-10A 対応高効率・低騒音動作ステッピング モーター ドライバ、データシート

8 改訂履歴

Changes from Revision * (September 2020) to Revision A (February 2026)

Page

-
- ストール検出機能を搭載した TI のデバイスを更新..... 1
-

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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月