

Application Note

ステップモーターの可聴ノイズ低減方法



Madison Eaker, Dipankar Mitra, Mojtaba Afshar

概要

ステップモーターは動作時に可聴ノイズを発生させることが知られており、多くのアプリケーションにおいて望ましいものではありません。一定の割合でミックス ディケイ電流のチョッピングおよび低レベルのマイクロステップがある従来のステップモータードライバは、ノイズ発生の大きな原因となっています。しかし、スマート チューニング テクノロジー、サイレントステップ減衰モード、高マイクロステップなどの機能により、可聴ノイズを大幅に低減できます。このアプリケーションレポートの目的は、広範な各種ステップモーターシステムやアプリケーションで特定のモータードライバ機能を使用して可聴ノイズを低減する方法を説明することにあります。

目次

1 はじめに.....	3
2 テスト設定の詳細.....	4
3 ステップモーターのノイズ源.....	5
3.1 磁気ノイズ.....	5
3.2 機械ノイズ.....	5
3.3 電気ノイズ.....	6
4 まとめ.....	16
5 参考資料.....	16
6 改訂履歴.....	17

図の一覧

図 1-1. マイクロステップ電流の波形.....	3
図 1-2. ディケイ モード.....	3
図 2-1. 可聴ノイズ測定のセットアップ.....	4
図 3-1. 印加磁界に応じて変化する分子双極子.....	5
図 3-2. マイクロステップ電流とステップ入力の関係、スロー ディケイの場合.....	6
図 3-3. マイクロステップ電流とステップ入力の関係、ミックス ディケイの場合.....	6
図 3-4. 増加ステップおよび減少ステップでの 30% ミックス ディケイ.....	7
図 3-5. 増加ステップおよび減少ステップでのスロー ディケイ.....	7
図 3-6. スマート チューンリップル コントロール減衰モード.....	7
図 3-7. ミックス ディケイとスマート チューンリップル制御 (STRC) の関係 (1/256 マイクロステップ).....	8
図 3-8. 電流リップルの変化の影響.....	9
図 3-9. サイレントステップのブロック図.....	9
図 3-10. サイレントステップ減衰のコイル電流波形.....	10
図 3-11. 1/256 マイクロステップ時のサイレントステップ減衰モード (SS) とスマート チューンリップル コントロール (STRC) の関係.....	11
図 3-12. 38% レベルの PWM、PWM 周波数は 55kHz.....	12
図 3-13. 92% レベルの PWM (増加)、PWM 周波数は 44kHz.....	12
図 3-14. 100% レベルの PWM、PWM 周波数は 35kHz.....	12
図 3-15. 92% レベルの PWM (減少)、PWM 周波数は 25kHz.....	12
図 3-16. 長いブランキング時間による電流歪み.....	13
図 3-17. 長い OFF 時間による電流歪み.....	13
図 3-18. 1/16 マイクロステップでのゼロ交差の平滑性.....	13
図 3-19. 1/64 マイクロステップでのゼロ交差の平滑性.....	13
図 3-20. 1/4 マイクロステップ、ミックス ディケイ、ステップ周波数 = 2000pps (パルス / 秒) での SPL プロット.....	14

図 3-21. さまざまなマイクロステッピングレベルでの SPL プロット.....	14
図 3-22. 1/8 マイクロステッピングでの電流波形 (スマートチューンリップル制御).....	15
図 3-23. 1/256 マイクロステッピングでの電流波形 (スマートチューンリップル制御).....	15

表の一覧

表 3-1. スマートチューンリップル制御機能付きステッパ モーター ドライバ.....	7
表 3-2. サイレント ステップ減衰モードを備えたステッパ モーター ドライバ.....	10

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

ステップ モーターは、プリンタ、プロジェクタ、繊維機械、舞台照明、産業用オートメーション、電子 POS、車載ヘッドライト、車載ヘッド アップ ディスプレイなど、幅広いアプリケーションで用いられています。ステップ モーターは、回転中のステップ角で定義される離散的なステップで動作します。ステップ モーターには 2 つの電流巻線があり、各巻線は H ブリッジを使用して制御できます。図 1-1 に示すように、ステップ モータードライバは、1 つのコイルにサイン波 (青)、もう 1 つのコイルにコサイン波 (赤) を近似した電流波形を印加します。電流波形の 1 象限 (90°) は、ステップ モーターの 1 ステップ角ごとの回転に対応します。現在使用されているほとんどのハイブリッド ステップ モーターでは、この 1 ステップ角は 1.8° です。

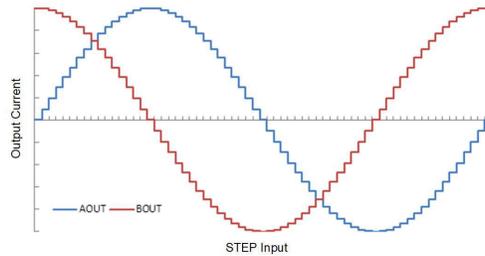


図 1-1. マイクロステップ電流の波形

多くのステップ モータードライバは、ドライブ出力を PWM 周波数と呼ばれる特定の周波数でチョッピングすることにより、電流を制限します。PWM 電流チョッピング中、PWM 電流チョッピング スレッショルドに達するまで H ブリッジはモーター巻線を駆動します。図 1-2 の項目 1 にこれを示します。

チョッピング電流スレッショルドに達した後、H ブリッジは 2 種類の状態 (ファースト ディケイまたはスロー ディケイ) で動作できます。ファースト ディケイ モードでは、PWM チョッピング電流スレッショルドに達すると、巻線電流が逆方向に流れるように H ブリッジは状態を反転させます。反対側の FET がオンになり、巻線電流がゼロに近づく、ブリッジはディセーブルされ、逆電流が流れるのを防止します。図 1-2 の項目 2 に、ファースト ディケイ モードを示します。スロー ディケイ モードでは、ブリッジの両方のローサイド FET をオンにすることで巻線電流を再循環させます。図 1-2 の項目 3 にこれを示します。ほとんどの従来型ステップドライバは、一定の割合のミックス ディケイ方式を備えています。この方式では OFF 時間のうちの一定の割合がファースト ディケイ モード、残りの OFF 時間がスロー ディケイ モードになります。

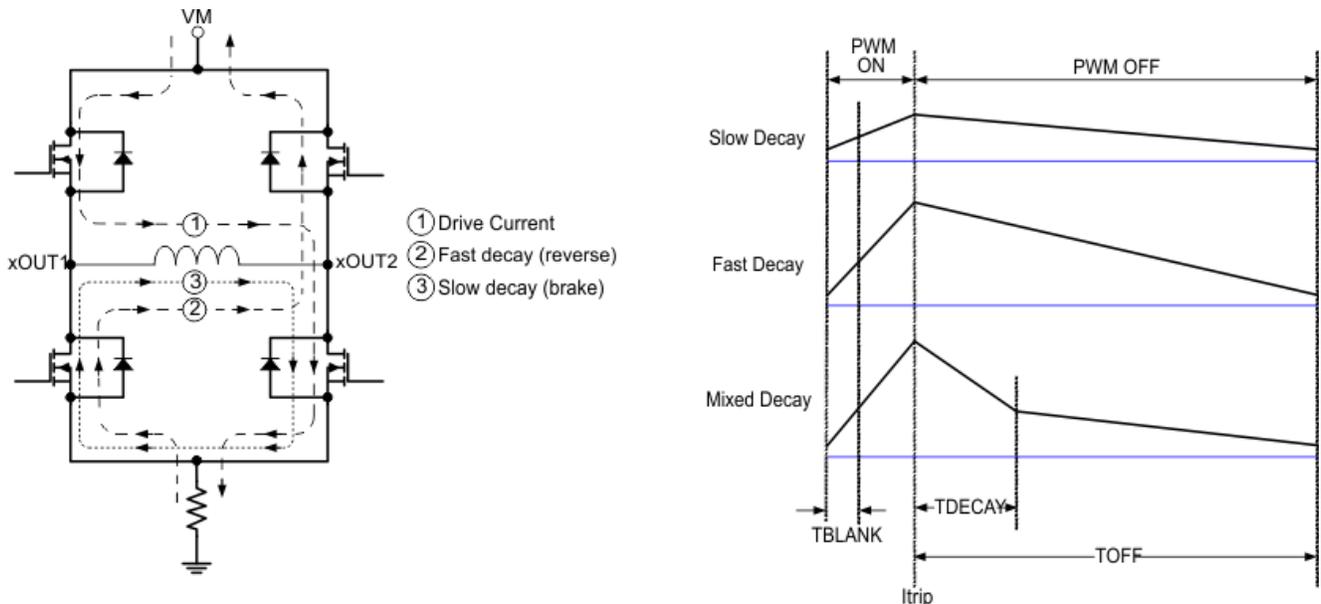


図 1-2. ディケイ モード

スロー、ファースト、ミックス ディケイの従来のモードでは、ステッピング モーターが動作しているときにハム音やヒュー音がすることがあります。大半のアプリケーションでは、可聴ノイズがユーザーを悩ませる可能性があり、ゴム アイソレータなどの高価なノイズ抑制方法を使用する理由となる場合がありますが、それでもノイズを完全には除去できません。たとえば、家庭用またはオフィスのプリンタや 3D プリンタには、複数のステッピング モーターが使われており、モーターからのノイズによってユーザーの集中力が損なわれる可能性があります。モーター ノイズを低減できる高品質のステッピング モーター ドライバは、ユーザーの満足度を高めるうえで非常に有用です。別の例として、電気自動車挙げられます。この場合、内燃エンジンがないため一般に静音であり、ヘッドライト レベル調整で使用されるステッピング モーターのノイズレベルを下げると、全体的な静粛性を実現するのに役立ちます。

以降のセクションでは、ステッピング モーターのさまざまなノイズ発生源について述べ、各種ステッピング モーター ドライバ機能によりそのノイズのほとんどを軽減できることを説明します。

2 テスト設定の詳細

このアプリケーション レポートでは、モーター ノイズを低減するうえでステッピング モーター ドライバのさまざまな設定が有効であることを示すために、いくつかの測定を実施しました。測定方法の一つとして音圧レベル (SPL) を用いました。SPL は、音波によって発生する周囲圧力からの局所的な圧力偏差の測定値です。SPL は、デシベル (dB) 単位の音と周波数の関係をグラフィカルに表現します。このアプリケーション レポートに示す SPL プロットを得るために、DRV8424 および DR8462 ドライバによって駆動されるマイクロフォンおよびステッピング モーターを音響チャンバー内に配置しました。さまざまな動作条件でステッピング モーターからの可聴ノイズを記録し、SPL プロットを取得しました。図 2-1 に、チャンバー内のマイクロフォンの写真を示します。セットアップの詳細は次のとおりです。

- 余分な振動を最小限に抑えるために、モーターをゴムに確実に取り付けました。
- ステッピング モーターの定格は 2.3A であり、ステップ角度は 1.8°、インダクタンスは 1.9mH、抵抗は 0.93Ω です。
- ノイズを録音するために、キャリブレーションされた USB マイクを使用しました。
- 最初に、数秒 (約 5 秒) の周囲のノイズをキャプチャし、これを基準として使用しました。
- その後、モーターが回転している間に音を数秒間 (約 5 ~ 10 秒) 録音しました。
- オーディオ録音からのファイルをソフトウェアにインポートし、SPL プロットを取得しました。



図 2-1. 可聴ノイズ測定のセットアップ

3 ステップモーターのノイズ源

ステップモーターから発生する可聴ノイズの量は、モーターの種類と動作条件によって異なります。ステップモーターのノイズは、甲高いヒュー音、ヒス音、またはタイヤの空気が抜ける音と説明されています。人間の可聴周波数範囲は一般的に 20Hz ~ 20kHz とみなされていますが、人間の耳は 2kHz ~ 15kHz の周波数に最も敏感です。永久磁石モーターおよびハイブリッド ステップモーターは一般にノイズが小さく、可変リアクタンス ステップモーターはノイズが最大です。

ステップモーターから発生するノイズの原因は、磁気、機械、電気という 3 つの主なカテゴリに分類されます。

3.1 磁気ノイズ

強磁性材料には磁気歪みという性質があり、磁界に応じて磁性材料が膨張または収縮する原因になります。図 3-1 に示すように、分子双極子と磁界の境界は磁界に反応してシフトし、印加された磁界の方向に長さがわずかに変化します。ステップモーターでは、磁気歪みにより鉄が変形し、空間距離内の回転子と固定子の歯が互いに引き寄せられ、可聴ノイズが発生します。



図 3-1. 印加磁界に応じて変化する分子双極子

ステップモーターの場合、磁気歪みの可聴音は、激しい低ピッチのハム音という形で現れます。低速で動作するステップモーターは、磁気歪みによる最もひどい影響を示します。したがって、レーザー プリンタやコピー機で使用されるモーターは、一般的にモーターの動作速度が低いため、磁気歪みが最悪のノイズの影響をもたらします。

磁気歪みに起因するノイズは完全に除去できませんが、特定の種類の金属は他の金属よりも磁気歪みが大きい傾向があることが知られています。所定のアプリケーションに対し最高の性能を発揮するために、磁気歪みとコア損失の間で折り合いをつける特殊な材料があります。

3.2 機械ノイズ

機械ノイズは、ステップモーターの構造内の物理的部品によって発生します。騒音の原因となる一般的な例としては、しっかりと固定されていない取り付け構造、曲がったシャフト、ベアリングのがたつきやベアリングがないことなどがあります。これらの例すべてが、不要な振動や共振周波数を発生させます。その他の機械ノイズ要因としては、モーターハウジング、ローターのバランス、ベアリングの選択などがあります。

モーターハウジング構造は、高速モーターアプリケーションに大きな影響を与えます。回転子のバランスが悪い場合、モーターの速度に直接関係する周波数にスパイクが発生します。電動モーターには、スライディングスリーブベアリングまたはローリングベアリングなど、いくつかの種類ベアリングが使用されています。一般的にスリーブベアリングは静かなベアリングと考えられています。適切に潤滑されたスリーブベアリングは、ベアリングとシャフトの仕上げに起因する非常に高い周波数のノイズしか発生しません。ローリングベアリングは、一般的にノイズが大きく、モーターノイズの多くの要因を有していると考えられています。

ほとんどの機械ノイズは、モーターをゴムなどの吸音材に取り付けたり、ローターのバランスを取ったり、適切に維持されたベアリングを使用したりするなど、取り付け構造を補強し、ノイズ減衰材料を選択することにより、最小限に抑えることができます。

3.3 電気ノイズ

ステップ モーターの可聴ノイズにはさまざまな電氣的要因があります。詳細については、以後のセクションで説明します。磁気ノイズや機械ノイズとは異なり、ステッピング モーター ドライバを適切に選択すると、電気ノイズが低減される可能性があります。

3.3.1 電流リップルの影響と減衰モード

テキサス インストルメンツのステップ モーター ドライバの電流レギュレーションは、ドライバの機能に応じ複数の減衰モードを使用して構成できます。減衰モードは、スロー ディケイ、ミックス ディケイ、スマート チューン減衰、サイレント ステップ減衰の各モードとして選択できます。ステップ モーターの最も滑らかで最も静かな動作が生じるのは、正弦波電流波形を巻線に印加した場合です。電流波形のリップルは、目的の形状からの偏差であり、モーターに不均等なトルクを発生させる原因となり、動作中に振動やノイズとして現れます。リップルおよびそれによる可聴ノイズを低減するために、ファースト ディケイやミックス ディケイではなく、可能な限りスロー ディケイ モードでステップ モーターを動作させることを推奨します。

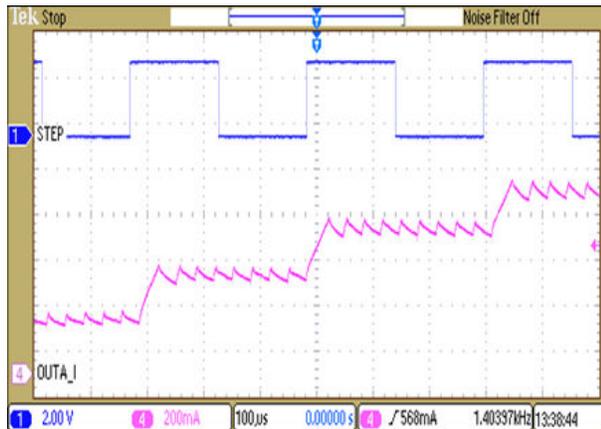


図 3-2. マイクロステッピング電流とステップ入力の関係、スロー ディケイの場合

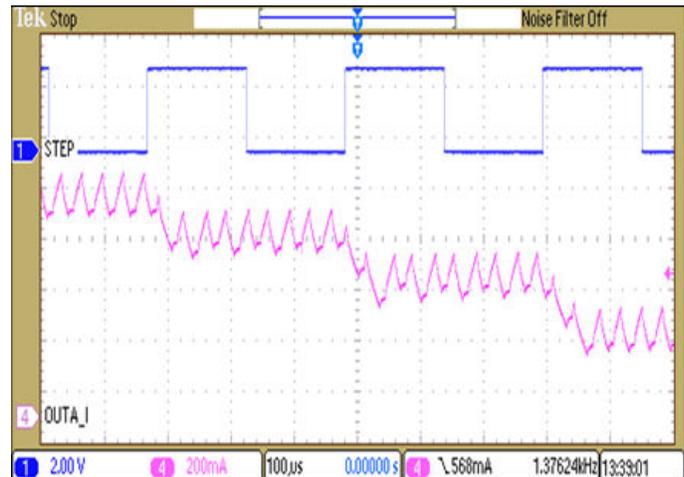


図 3-3. マイクロステッピング電流とステップ入力の関係、ミックス ディケイの場合

図 3-2 および図 3-3 に、同じ動作条件におけるスロー ディケイと一定割合のミックス ディケイでの電流リップルをそれぞれ示します。スロー ディケイを使用する場合の電流リップルは、およそ 50mA ですが、30% をファースト ディケイとする従来のミックス ディケイに減衰モードを変更すると、200mA に近くなります。

しかし、図 3-4 および図 3-5 にそれぞれミックス ディケイおよびスロー ディケイについて示すように、理想的な正弦波電流波形に追従する場合、特に、高速かつ減少ステップの場合には、逆起電力が原因で、スロー ディケイに比べてミックス ディケイ モードの方が優れています。そのため、あらゆる条件で理想的な波形に追従できるスロー ディケイ モードが、ステップ モーターからの可聴ノイズを低減するための理想的な選択肢です。

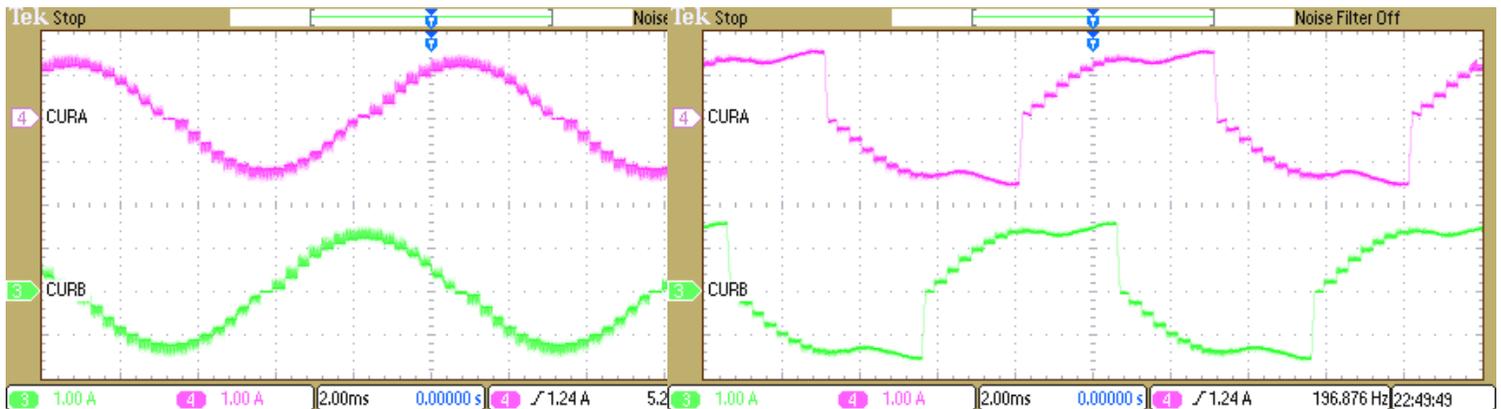


図 3-4. 増加ステップおよび減少ステップでの 30% ミックスディケイ 図 3-5. 増加ステップおよび減少ステップでのスローディケイ

テキサス インストルメンツのいくつかのステップモータードライバが搭載しているスマートチューンリップル制御 (STRC) モードは、このようなスローディケイ方式の 1 つです。図 3-6 に示すように、スマートチューンリップル制御は、 I_{VALLEY} レベルと I_{TRIP} レベルを設定することにより動作します。電流レベルが I_{TRIP} に達すると、ドライバは t_{OFF} 時間が経過するまでスローディケイに移行する代わりに、 I_{VALLEY} に達するまでスローディケイに移行します。

したがって、このモードでは、従来のミックスディケイ方式よりもはるかに厳密にリップル電流をレギュレーションできます。このモードでは、電流レベルと動作条件に応じて、 t_{OFF} が変化します。減少ステップでは、スマートチューンリップル制御は自動的にファーストディケイに切り替わり、次のステップに素早く達することができます。これにより、あらゆる速度で理想的な正弦波電流波形に追従できます。

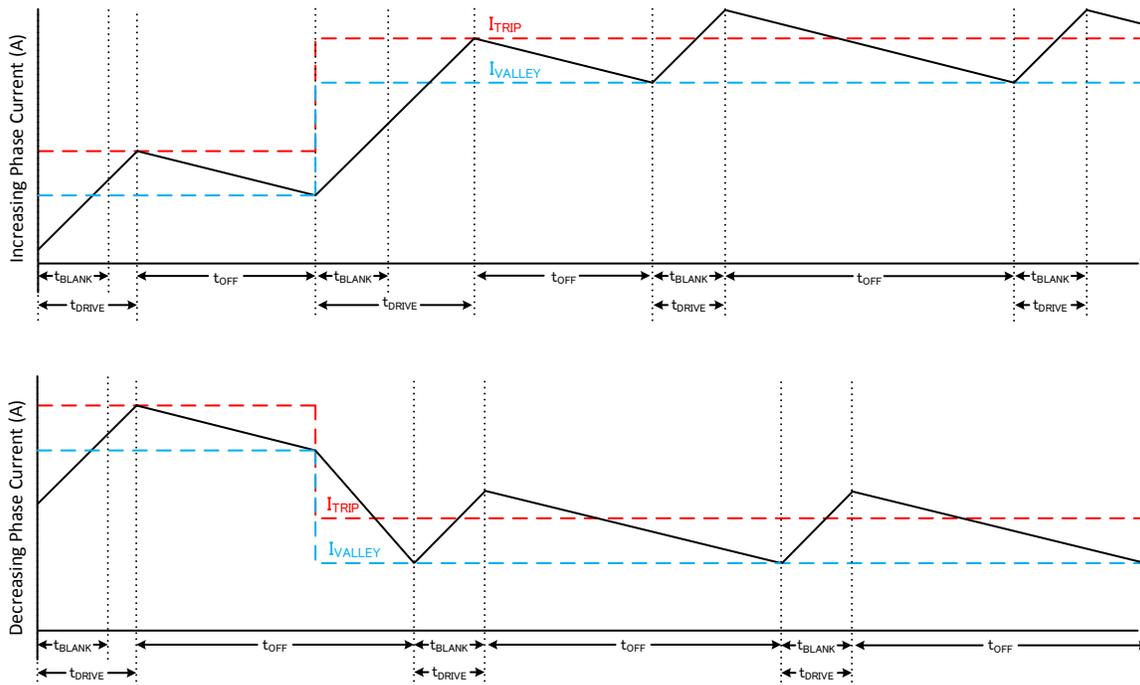


図 3-6. スマートチューンリップルコントロール減衰モード

表 3-1 に、スマートチューンリップルコントロール減衰モードを備えた各種ステップモータードライバを示します。

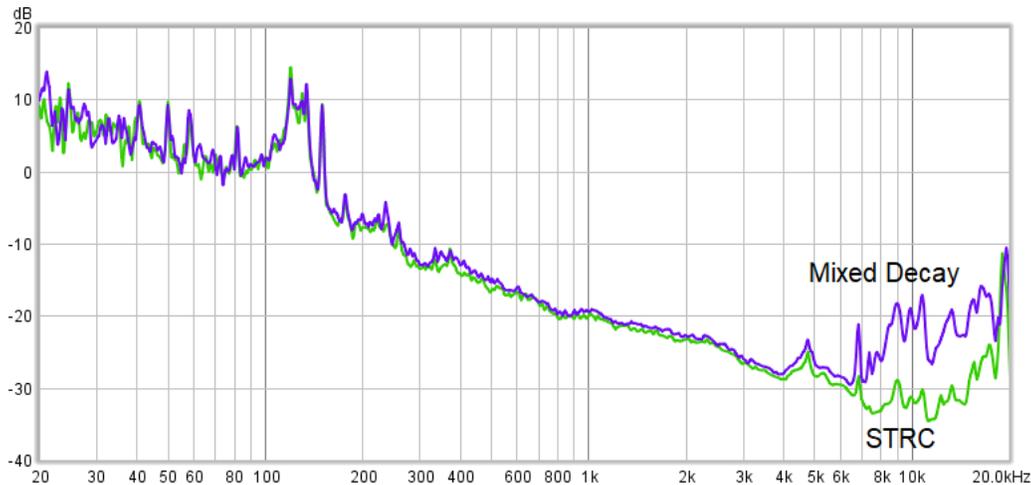
表 3-1. スマートチューンリップル制御機能付きステップモータードライバ

デバイス	フルスケール電流	動作電源電圧範囲	$R_{DS(ON)}$ (HS + LS)	マイクロステップ
DRV8428	1A	4.2 ~ 33V	1500mΩ	1/256

表 3-1. スマート チューン リップル制御機能付きステップ モーター ドライバ (続き)

デバイス	フルスケール電流	動作電源電圧範囲	$R_{DS(ON)}$ (HS + LS)	マイクロステップ
DRV8899-Q1	1A	4.5 ~ 45 V	1200mΩ	1/256
DRV8849	1.5A	4.5 ~ 40 V	900mΩ	1/256
DRV8426	1.5A	4.5 ~ 33 V	900mΩ	1/256
DRV8436	1.5A	4.5 ~ 48 V	900mΩ	1/256
DRV8889-Q1	1.5A	4.5 ~ 45 V	900mΩ	1/256
DRV8425	2A	4.5 ~ 33 V	550mΩ	1/256
DRV8434A-Q1	2.5A	4.5 ~ 48 V	330mΩ	1/256
DRV8434S/A	2.5A	4.5 ~ 48 V	330mΩ	1/256
DRV8424	2.5A	4.5 ~ 33 V	330mΩ	1/256
DRV8461	3A	4.5 ~ 70 V	300mΩ	1/256
DRV8452	5A	4.5 ~ 60 V	100mΩ	1/256
DRV8462	10A	4.5 ~ 65 V	100mΩ	1/256

スマート チューン リップル制御はリップル電流を厳密に制御できるため、ミックス ディケイ方式よりもオーディオ性能を向上できます。図 3-7 に、1/256 マイクロステップでの DRV8424 スマート チューン リップル制御とミックス ディケイの SPL プロットの比較を示します。このグラフからわかるように、スマート チューン リップル制御 (緑) は、ミックス ディケイ (紫) に比べて、4kHz を超える周波数範囲でノイズが最大 10dB 低くなっています。スマート チューン リップル制御は、ほぼ非可聴のヒス ノイズの原因になるだけですが、ミックス ディケイでモーターを動作させる場合は、ヒュー音が発生します。よく知られているように、デシベル レベルで 3dB の減少は音エネルギーが半分減少することに相当し、10dB の減少は音エネルギーが 1/10 に減少することに相当します。したがって、特定の周波数では、スマート チューン リップル制御では、ミックス ディケイモードによって生成されるノイズの 10% しか生成されません。


図 3-7. ミックス ディケイとスマート チューン リップル制御 (STRC) の関係 (1/256 マイクロステップ)

リップル電流の低減による影響は、さらに、図 3-8 で示されます。DRV8424、DRV8425、DRV8426 の場合、スマート チューン リップル制御モードのリップル電流レベルは TOFF ピンにより調整できます。図 3-8 の SPL プロットは、さまざまなリップル電流設定での可聴ノイズを比較しています。1% と 2% のリップル電流設定では、コンパレータのオフセットなどが原因で、リップル電流はほぼ同じであり、正弦波のピーク時に約 50mA です。グラフに基づき、1% (緑) と 2% (青) のリップル設定で最高のオーディオ性能が示され、6% のリップル (オレンジ) はスペクトル全体で最も低いオーディオ性能を示します。

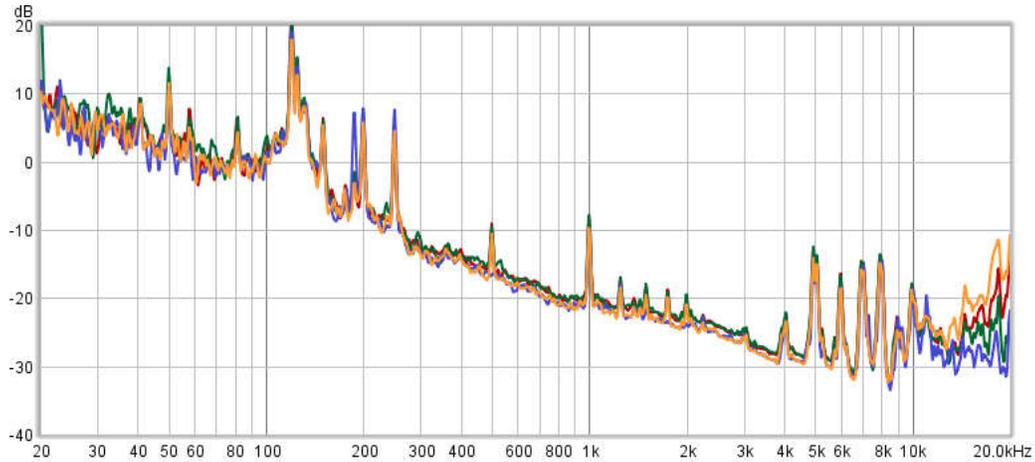


図 3-8. 電流リップルの変化の影響

スマート チューン減衰モードに加えて、DRV8461、DRV8462、DRV8452 は静止時と低速回転時にきわめて静かな動作を実現するためのサイレント ステップ減衰モードも備えています。従来のピーク電流モード制御は、検出 MOSFET の瞬間的な電流を調べて、駆動時間と減衰時間を決定します。そのため、モータードライバはシステムの瞬間的な誤差に反応します。このような電流の急激な変化により、モーターから可聴ノイズが発生します。サイレント ステップは、ノイズのないステップ モーター動作を確実に実現するために、静止時と低速時に PWM スwitching を行うことによりノイズを除去する、電圧モードの PWM レギュレーション方式です。そのため、サイレント ステップで動作するステップ モーター アプリケーションは、低ノイズでの動作が重要な 3D プリンタ、医療機器、工場オートメーションなどのアプリケーションに最適です。図 3-8 に、サイレント ステップ減衰モードの実装のブロック図を示します。

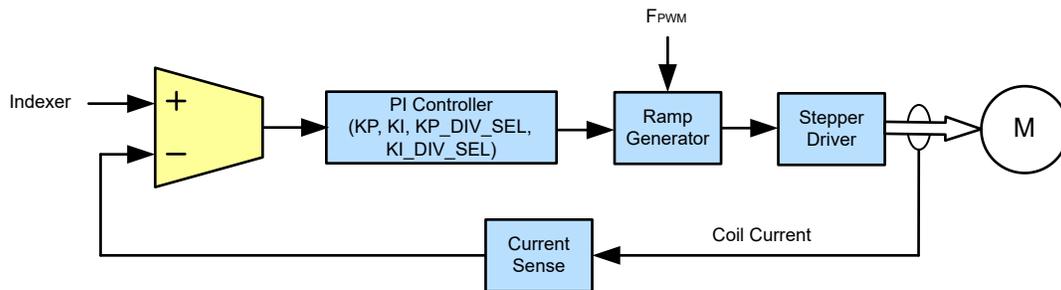


図 3-9. サイレント ステップのブロック図

図 3-8 に、モーターがサイレント ステップ減衰モードで動作しているときの滑らかな正弦波コイル電流の波形を示します。

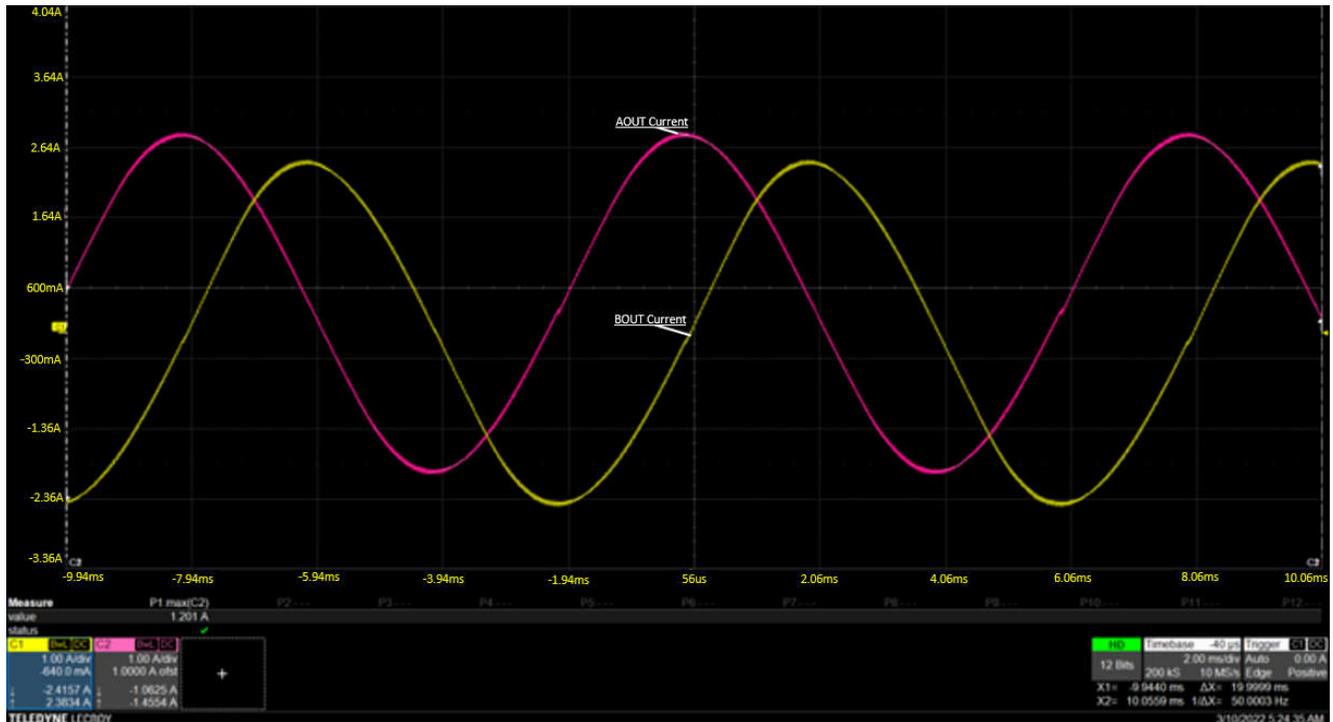


図 3-10. サイレント ステップ減衰のコイル電流波形

表 3-1 に、サイレント ステップ減衰モードを備えた各種ステッパ モーター ドライバを示します。

表 3-2. サイレント ステップ減衰モードを備えたステッパ モーター ドライバ

DRV8461	3A	4.5 ~ 70 V	300mΩ	1/256
DRV8452	5A	4.5 ~ 60 V	100mΩ	1/256
DRV8462	10A	4.5 ~ 65 V	100mΩ	1/256

図 3-11 は、1/256 マイクロステッピング時の DRV8462 のサイレント ステップ減衰モード (緑色のトレース) の SPL プロットをスマート チューンリップル コントロール減衰モード (青色のトレース) と比較したものです。この図からわかるように、サイレント ステップ減衰モードでは、スマート チューンリップル コントロール減衰モード (STRC) に比べて、10 ~ 20kHz の範囲で可聴ノイズが約 10dB ~ 20dB 低減されます。10dB 減少するごとに音エネルギーが 1/10 に減少することに相当するため、特定の周波数において、サイレント ステップ減衰モードで生成されるノイズは、スマート チューンリップル コントロール減衰モードによって生成されるノイズの 5% でしかありません。



図 3-11. 1/256 マイクロステッピング時のサイレント ステップ減衰モード (SS) とスマート チューンリップル コントロール (STRC) の関係

3.3.2 PWM チョッピング周波数の影響

PWM 周波数が可聴帯域内に入った場合、ステッパモーターから流れ出すヒュー音として現れることがあります。モーターを停止してその位置を維持している場合でも、PWM 周波数に関連するノイズは可聴周波数になります。チョッピング周波数が超音波の場合は、ヒス音が聞こえます。

従来型のステッパドライバには、多くの場合、2 個の R-C 受動部品を使用して PWM の OFF オフ時間を制御するピンがあります。50µs の OFF 時間を持つ設計が一般的です。OFF 時間に ON 時間が加わると、結果として得られる PWM 周波数は 20kHz 未満になり、可聴ノイズが発生します。したがって、PWM 周波数を高くすることによりノイズを低減できると結論できます。PWM 周波数が高すぎるとスイッチング損失の増大にもつながるため、可聴範囲を大きく上回るほど周波数を高くすることは望ましくない場合があります。適切な PWM 周波数値は 30kHz ~ 50kHz です。

式 1 に、スマート チューンリップルコントロール減衰モードの PWM 周波数と電流リップルの近似的な関係を示します。 V_M は電源電圧、 V_{BEMF} は逆起電力電圧、 L はモーターコイルのインダクタンス、 ΔI はリップル電流です。明らかに、リップル電流が低い場合、PWM 周波数は高くなります。

$$f_{PWM} = \frac{V_{BEMF} \times (V_M - V_{BEMF})}{V_M \times L \times \Delta I} \quad (1)$$

図 3-12 ~ 図 3-15 に、DRV8424 のスマート チューンリップル制御および 1/4 マイクロステッピングのさまざまな電流レベルでの PWM 周波数を示します。PWM 周波数の範囲は 25kHz ~ 55kHz であり、可聴範囲を十分超えています。一般に、電流リップルを最小限に抑えると、PWM 周波数は 20kHz を超えます。そのため、ステッパモーターからの可聴ノイズレベルには影響を与えません。



図 3-12. 38% レベルの PWM、PWM 周波数は 55kHz

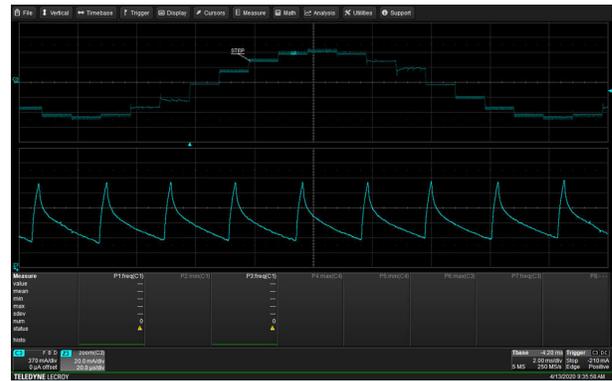


図 3-13. 92% レベルの PWM (増加)、PWM 周波数は 44kHz

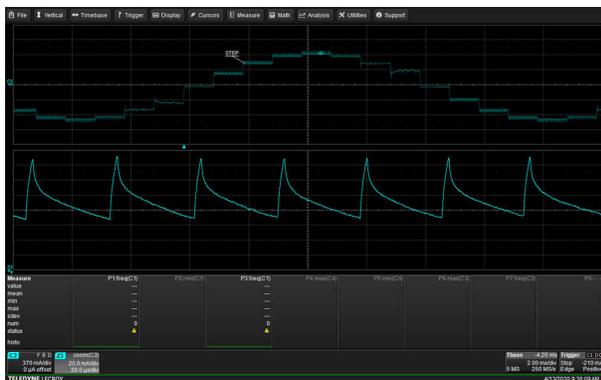


図 3-14. 100% レベルの PWM、PWM 周波数は 35kHz

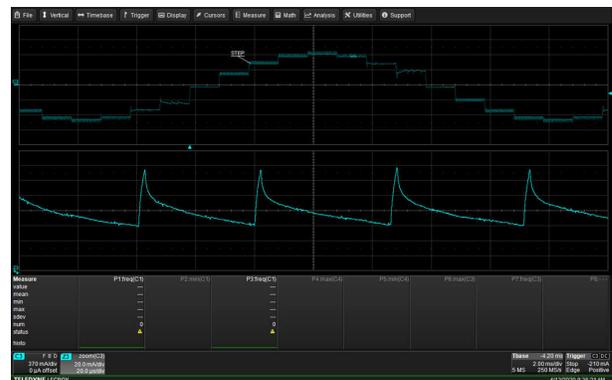


図 3-15. 92% レベルの PWM (減少)、PWM 周波数は 25kHz

3.3.3 電流ゼロ交差誤差の影響

可聴ノイズの原因としてもう 1 つ可能性があるのは、ゼロ電流交差付近の平滑性です。従来型のほとんどのステッパモータードライバは、[図 3-16](#) に示すように、電流の位相が変化するとき、ゼロ電流交差付近での電流波形を歪めます。この歪みの背後にある理由は、電流センスブランキング時間が $2\mu\text{s}$ 以上などと長いことであり、それによって、ステップの平均電流が目的の値よりも大幅に大きくなります。ゼロ交差付近での歪みのもう 1 つの理由は、OFF 時間が長すぎることであり、それによって、[図 3-17](#) に示すように、平均電流が目的の値よりも大幅に小さくなります。この歪みが及ぼす影響は滑らかでない電流波形が発生することであり、それが揺動、振動、可聴ノイズの原因になります。

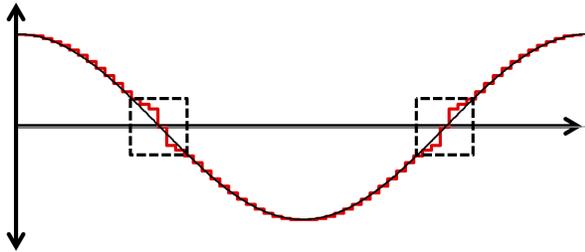


図 3-16. 長いブランキング時間による電流歪み

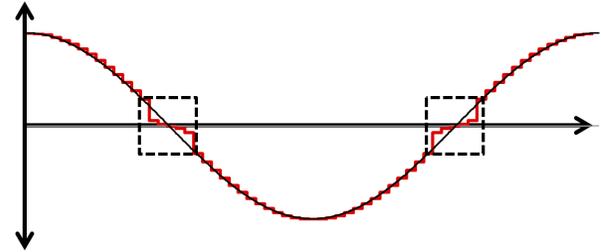


図 3-17. 長い OFF 時間による電流歪み

[表 3-1](#) に示すドライバのブランキング時間は $1\mu\text{s}$ でしかないため、コイル電流のゼロ交差領域付近に歪みは発生しません。これにより、電流とトルクのリップルが低減し真のサイン波形に近付くため、モーター動作がはるかに円滑になります。[図 3-18](#) および [図 3-19](#) に、それぞれ $1/16$ および $1/64$ マイクロステップでの DRV8424 の電流ゼロ交差を示します。これらは、ゼロ交差付近の平滑性を示しています。

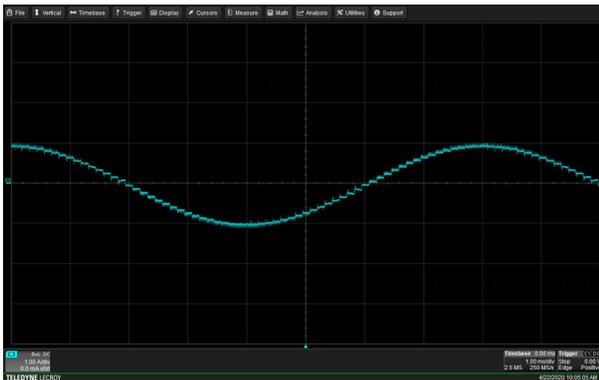


図 3-18. $1/16$ マイクロステップでのゼロ交差の平滑性

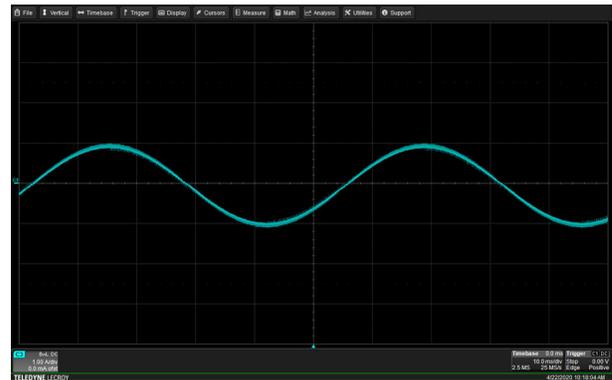


図 3-19. $1/64$ マイクロステップでのゼロ交差の平滑性

3.3.4 ステップ分解能とステップ周波数の影響

フルステップまたはハーフステップのような低分解能のステップモードでは、特に低速の場合に、ステッパモーターの構造全体を通じて多くの振動が伝播します。ドライバが新しいステップを指示すると、パルス応答と同様に、回転子はオーバーシュートして次の位置を中心として振動し、機械的な振動とノイズを引き起こします。

このような発振を低減するために、最新のステッパドライバはマイクロステップを採用し、1 つのフルステップをより小さなマイクロステップに分割しています。これにより、回転子は以後の 2 つのフルステップの間の中間位置に配置されます。その結果、ローターはよりはるかに小さな角度または短い距離にステップされるようになります。新しい位置に切り替えると、オーバーシュートおよびアンダーシュートは大幅に減少します。

ステップ周波数は、ステッピングモーターの SPL プロットに大きなスパイクとして現れます。さらに、ステップ周波数の高調波は、スペクトル全体にわたって発生し続けます。ステップ周波数が 20Hz と 20kHz の間である場合、 2kHz ステップ周波数と $1/4$ マイクロステップを使用したミックスディケイについて示した [図 3-20](#) のように、ステップ周波数とそのすべての高調波が可聴範囲内に現れます。

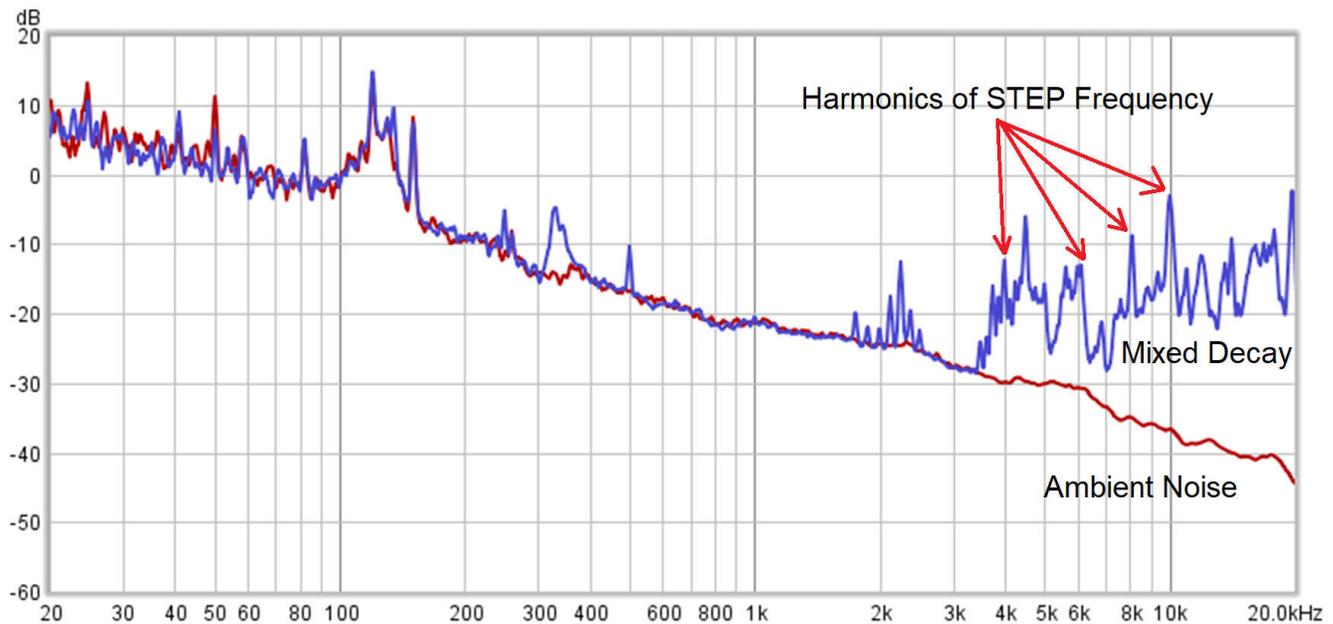


図 3-20. 1/4 マイクロステップング、ミックス ディケイ、ステップ周波数 = 2000pps (パルス / 秒) での SPL プロット

可聴ノイズを低減するための 1 つのコツは、同じモーター速度を維持しながら、マイクロステップング レベルとステップ周波数を一緒に上げることです。ステップ周波数をオーディオ帯域より外側に配置するようマイクロステップング レベルを選択することにより、モーターの静音動作が実現されます。表 3-1 に示したドライバのほとんどは、従来のステップ モータードライバよりもはるかに多い 1/256 までマイクロステップングを上げることによりそれを実現します。

図 3-21 は、1/8 (青色のトレース)、1/64 (オレンジのトレース)、1/256 (緑色のトレース) のマイクロステップでの SPL プロットを比較したものです。ステップ周波数はそれぞれ 600pps、4800pps、19200pps でした。1/256 (緑) のマイクロステップングが最高のオーディオ性能を示し、1/8 (青) が最も低い性能を示しています。1/8 のステップでは、明確なヒュー音が発生します。マイクロステップを 1/64 に増やすと、音は和らぎますが、それでも聞こえます。マイクロステップを 1/256 マイクロステップに増やすと、音は消え、ホワイト ノイズのみが残ります。マイクロステップ周波数を可聴範囲を超えて高くすることによりオーディオ ノイズが小さくなり、同時に、全体的に滑らかな回転が達成されます。

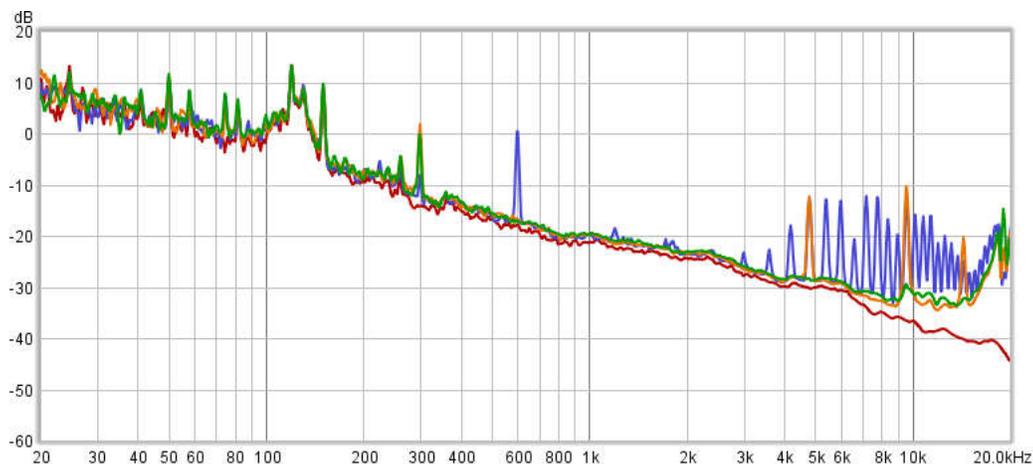


図 3-21. さまざまなマイクロステップング レベルでの SPL プロット

1/8 マイクロステッピング時の電流波形を図 3-22 に、1/256 マイクロステッピング時の電流波形を図 3-23 に示します。これらは、マイクロステッピングが増加するにつれて電流波形がより理想的になることを示しています。

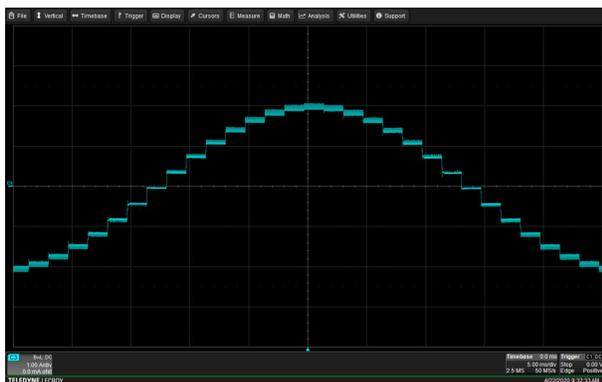


図 3-22. 1/8 マイクロステッピングでの電流波形 (スマートチューンリップル制御)



図 3-23. 1/256 マイクロステッピングでの電流波形 (スマートチューンリップル制御)

ステッパモーターアプリケーションで使用される標準的なマイコンであれば、20,000pps のステップ周波数に容易に対応できます。ただし、ステップ周波数が高いと、ドライバがモーターを駆動するためにより多くのマイコンリソースを必要とすることにもなります。そのため、必ずしもあらゆるアプリケーションでマイクロステッピングを 1/256 に増やす必要はありません。ステップ周波数をおおむね 15kHz より高くするようなマイクロステッピングレベルで、ほとんどの実用的な目的に十分な低いノイズで動作します。アプリケーションにおいて広い範囲の速度での動作が予想される場合、速度に応じてマイクロステッピングレベルを変更することにより範囲全体にわたってノイズのない動作を実現できます。

ただし、マイクロステッピングのレベルが高いほど分解能が向上し可聴ノイズは減少しますが、精度は向上しません。これは、マイクロステッピングにより、モーターのトルクの増分が大幅に制限されるためです。つまり、マイクロステップのトルクが実際にシャフトを回転させるには十分でない可能性があります。また、トルクが大きい状況では、モーターが最終的にマイクロステップの一部をスキップすることがあります。

3.3.5 共振周波数の影響

各ステッパモーターには共振周波数があります。このため、ステッパモーターはステップを実行してもすぐには停止せず、わずかに前後に移動し続けます。モーターが共振している時間の長さをセトリングタイムと呼びます。共振速度は、共振周波数と一致しています。その結果、モーターが振動し、ジッタとノイズが発生します。システムのダンピングが低い場合、共振が固定子と回転子の間の磁界を凌駕し、ステップ損失や可聴ノイズが発生する可能性があります。

マイクロステッピングでは、共振を除去するためのシンプルで安全な方法が提供されます。マイクロステッピングのレベルを高くすることにより、ステップ周波数を共振周波数よりも高くできるからです。ダンパーも、共振および可聴ノイズを低減する目的で使用しています。ダンパーは衝撃を吸収して力積を低減し、共振の運動エネルギーを消費することによって機能します。これにより、ノイズの除去、システムの過渡応答の強化、セトリングタイムの短縮を実現できます。

4 まとめ

ステップモーターのノイズは、設計者にとって克服すべき大きな懸念材料であり困難な課題です。ただし、適切なモータードライバを使用すれば、多数の各種機能を使用することにより電氣的可聴ノイズを大幅に低減できます。テキサスインスツルメンツのモータードライバは、ステップ周波数の高速化が可能であることに加え、スマートチューンテクノロジーによる自動減衰モード制御、最大 1/256 のマイクロステッピング、プログラマブルなリップル電流振幅ターゲットといった機能を搭載しており、可聴範囲外の周波数でのスムーズな動作を実証します。この結果は、レベルを最大 10dB 下げるといって驚くべきものになります。TI のステップモーター製品の詳細については、TI.com を参照してください。

5 参考資料

- James R. Hendershot, Jr. 『[Causes and Sources of Audible Noise in Electric Motors](#)』
- [磁気歪みに関するオンライン記事](#)
- Gibbs, M. R. J. 『[Modern Trends in Magnetostriction Study and Application](#)』Springer Science+Business Media, B.V. (2000 年)。印刷。
- テキサスインスツルメンツ、『[DRV8889-Q1 内蔵電流検出およびストール検出機能付き、1/256 マイクロステッピング対応、車載対応ステッピングモータードライバ](#)』、データシート。

6 改訂履歴

Changes from Revision * (January 2020) to Revision A (February 2026)	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	1
• 電流リップルの影響と減衰モード のサイレント ステップ減衰モードの結果を更新.....	6

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