

Application Note

オーディオ ハプティクスへのフィードバックを実現するための TI
DRV2605L をゲームハンドヘルドに統合

概要

このアプリケーション ノートでは、テキサス インストルメンツの DRV2605L ハプティクスドライバをオーディオハプティクスモードで使用し、ゲーム用ハンドヘルドに没入型触覚フィードバックを追加する実用的な方法を紹介します。現代のハンドヘルドでは、明示的なハプティクス イベントがなくてもゲーム オーディオが豊富に存在します。DRV2605L はこれを活用し、オーディオ信号をリアルタイムでリニア共振アクチュエータ (LRA) 用の振動駆動に自動変換します。このアプリケーション ノートでは、オーディオハプティクス変換モードの利点 (例えば閉ループ共振追跡)、評価に使用したハードウェア構成、およびさまざまな音声周波数と振幅に対する LRA の応答を示す波形結果について説明します。このアプリケーション ノートでは、ゲーム プレイ中にオーディオ駆動のハプティクスと手動ハプティクス制御 (DRV2605L のリアルタイム再生モードやエフェクト ライブラリ モードを使用) をシームレスに切り替える方法についても詳述しています。当社のテストにより、DRV2605L はゲーム オーディオから意味のある触覚効果を低遅延で生成し、システムが特定のハプティクスキューで上書きした際にもスムーズに切り替わることが確認されました。この資料は、DRV2605L をハンドヘルド デバイスに統合するためのガイドラインを提供しており、設定のポイントやハプティクス出力のスコープ波形も含まれています。このアプローチは、DRV2605L ドライバと LRA という最小限のハードウェア追加のみで済み、既存のオーディオ コンテンツを活用したハプティクス フィードバックによりユーザーの没入感を大幅に向上させます。

目次

1 はじめに.....	2
2 DRV2605L オーディオ ハプティクス モードの概要と利点.....	3
3 ハードウェア テスト設定と構成.....	5
4 波形テスト結果と分析 (オーディオハプティクス モード).....	8
5 モード スイッチング動作 (オーディオからハプティクスへの変換とリアルタイム再生の比較).....	18
6 DRV2605L における統合モードとスイッチング モード: オーディオハプティクス変換と内蔵ライブラリ モード.....	20
7 モード切り替えに関する観察と推奨事項.....	22
8 概要と今後のアプリケーション.....	23
9 参考資料.....	24

商標

Smart-Loop™ is a trademark of Keystone Technologies International, LLC.

TouchSense® is a registered trademark of Immersion Corporation.

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

最新のゲーム ハンドヘルドは、没入型の触感フィードバックを実現するよう努めています。通常、振動イベントはゲームソフトウェアによって直接トリガされます(例えば、画面上で爆発が起きた際にあらかじめ定義された振動パターンが再生されるなど)。ゲームが明示的にハプティクスフィードバックを提供しない場合、一部のデバイスでは音声出力から振動フィードバックを推測して生成しようとします。一般的な方法のひとつは、サウンドパイプラインにオーディオプロセッシングオブジェクト (APO) を組み込み、マイコン内のアルゴリズムで音声に基づいて振動モーターを駆動することです。この **APO + EC** 方式は、ゲームの音声の低音や衝撃音を監視し、それに応じてハプティクスモーターを駆動します。しかし、オーディオのみを頼りにすると限界があります。明確な低周波成分 (爆発音や重低音など) が不足している場合、振動フィードバックが弱く感じられたり、ほとんど感じられなかったりすることがあります。また、オーディオストリームのみを使ってハプティクスを生成すると、遅延が目立ったり、振動の強さが不安定になったりすることがあります。

これらの課題に対応するため、TI の DRV2605L ハプティクスドライバのオーディオ/ハプティクス変換モードがゲーム用ハンドヘルドの文脈で実装されています。オーディオ/ハプティクス変換モードでは、DRV2605L がアナログ音声入力 (例えばゲームのヘッドホン出力) を常時監視し、オーディオの周波数および振幅特性に基づいて LRA を自動的に駆動します。低周波の音声コンテンツ (ベースビート、爆発音、環境音など) がインテリジェントに振動パターンへ変換されるため、ゲームが明示的に振動をプログラムしていなくても、バックグラウンドの音声が生み出します。変換アルゴリズム (Immerision 社の TouchSense® 技術をライセンス使用) は、これらの振動が単なるランダムなビープ音ではなく、音声と自然に連動していると感じられるように調整されています。

当社の実装では、ハンドヘルドのオーディオコーデックが左右の音声チャンネルを出力し、それぞれがスピーカ (またはヘッドホン) とオーディオ/触覚モードに設定された DRV2605L に入力されています。デバイスの組み込みコントローラ (EC) は、I²C を介して各 DRV2605L と通信し、設定を行ったり、必要に応じて特定のハプティクス効果をトリガしたりできます。図 1-1 はデュアル入力のハプティクス構成を示しており、オーディオ経路 (緑線) と EC 制御経路 (青線) の両方が DRV2605L ハプティクスドライバに影響を与えています。

ゲーム用ハンドヘルドにおける、コーデックおよび EC による左右チャンネルのルーティングで、デュアル DRV2605L ドライバを用いたハプティクスフィードバック。各 DRV2605L は、組込みプロセッサからのアナログ音声入力 (緑) と I²C 制御信号 (青) を受け取り、音声駆動およびダイレクトハプティクスフィードバックの同期をサポートします。

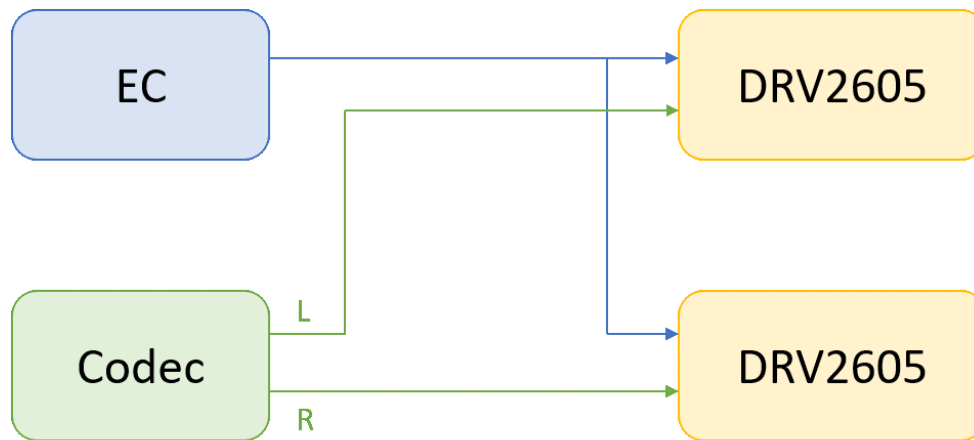


図 1-1. コーデックと EC を経由するデュアル DRV2605L ハプティクス ルーティング

このドキュメントは次のように構成されています:

- DRV2605L のオーディオ/ハプティクス変換モードとその利点の概要の紹介
- オーディオ/ハプティクス変換を使用するためのハードウェア テストの設定と主な構成手順の説明です。
- 実験室でのテスト結果の波形が提示され、異なる音声周波数および音量に対する LRA の応答が分析されています。
- オーディオ駆動型ハプティクスと手動再生モードを切り替えるなど、スイッチング モード時の動作や、スムーズな遷移を確保する方法を共有します。
- これらのモードを製品設計に統合するための推奨事項

2 DRV2605L オーディオ ハプティクス モードの概要と利点

DRV2605L は、リニア共振アクチュエータ (LRA) と偏心回転質量モーター (ERM) の両方に対応した専用のハプティクスドライバです。これには、閉ループ制御アーキテクチャと内部に組み込まれたハプティクスエフェクトのライブラリが含まれています。本書は、オーディオ入力信号を自動的に意味のあるハプティクス エフェクトに変換する機能である「オーディオ/ハプティクスへの変換」に焦点を当てています。DRV2605L オーディオ/ハプティクス変換モードを使用する主な利点は次のとおりです:

- **ハプティクスへの自動オーディオ変換:** オーディオ/ハプティクス変換モードでは、DRV2605L はアナログ オーディオ入力を継続的に監視し、LRA に対応する駆動出力を生成します。オーディオの低周波成分 (たとえば、50~200Hz のベースリズムや衝撃音) が検出され、振動に変換されます。これはリアルタイムで行われるため、ゲームが明示的に振動コマンドを発行しなくても、オーディオによって触覚応答が生成されます。変換アルゴリズムは、振動がコンテンツに適した感覚になるよう調整されています。鋭い一時的な音はキレのあるタップ音となり、持続する低音はビリビリとした振動や低いうなり音を生み出します。
- **共振トラッキングと Smart-Loop™ 閉ループ制御:** DRV2605L は、LRA 向けに共振周波数を自動追跡する閉ループ制御システムを採用しています。LRA は固有の共振周波数 (通常約 170~200Hz) を持っており、その共振周波数で駆動することで効率と振動強度が最大化されます。ただし、共振周波数は温度や経年変化、装着状態によって若干変動することがあります。DRV2605L の Smart-Loop™ アルゴリズムは、LRA の共振周波数に常に適応して調整を行い、必要に応じてアクティブ ブレーキをかけます。これにより、振動の加速度がより安定し、立ち上がり時間と立ち下がり時間が短縮されます。実際には、閉ループ制御により、オーディオ信号が停止したときの LRA のリングングやオーバーシュートを防ぎ、各パルスを鮮明にします。(対照的に、開ループ駆動では LRA が共振して長く振動が続き、収束に時間がかかることがあります。)
- **内蔵振動エフェクト ライブラリ:** オーディオ/ハプティクス変換モード以外に、DRV2605L には 100 を超える事前定義済みハプティクス波形と効果を収録した ROM ライブラリが内蔵されています (Immersion からライセンスされています)。本資料の主題ではありませんが、このライブラリはゲームが特定の触覚イベントを提供する際に非常に役立ちます。ホストプロセッサは I²C を介してライブラリ内の波形をトリガでき、例えばダブルクリックの振動や爆発の振動を再生できます。このライブラリがチップ内に搭載されているため、開発者は一般的な効果のためにカスタムの振動波形を作成する必要がありません。この設計では主に自動的なバックグラウンド フィードバックにオーディオ/ハプティクス変換が使われていますが、ライブラリ エフェクトはゲームのメニュー選択や特別なゲーム内アクションなどのオンデマンド イベントにも利用可能です。本書の後半で、オーディオ/ハプティクスとライブラリ エフェクトの切り替えについて説明します。

DRV2605L のオーディオ/ハプティクス エンジンには、入力オーディオ波形を必ずしも正確に模倣するとは限らない触感用に設計された LRA を駆動することに注意してください。目的はオーディオの周波数を文字通り再現することではなく、振動の関連性を最大化することにあります (特に LRA は非常に高い周波数にはうまく反応できないためです)。このデバイスは、オーディオの振幅エンベロープを効果的に抽出し、共振周波数で LRA を駆動して強度を調整します。これにより、オーディオ周波数が LRA の設計範囲を上回っている場合や下回っている場合でも、強力なフィードバックが保証されます。

Smart-Loop の閉ループ制御の利点を示すために、[図 2-1](#) は開ループ駆動のシナリオをスコープでキャプチャしたものを示します。ここでは、ドライバの閉ループ機能を無効にした状態で、内蔵ライブラリ波形 (ダブルクリックエフェクト) を LRA で再生しました。上側のパターンは LRA へのドライバの生の PWM 出力を示し、下側のパターンは LRA にかかる実際の電圧を示しています。適応制御がない場合、LRA の応答は厳密に制御されず、振幅の変動や各パルス後の振動の減衰が遅くなる様子が観察できます。DRV2605L の Smart-Loop 閉ループ モードを有効にすると、これらのパルスがより安定して鮮明になり (この図には示されていませんが、テストで確認されています)、振動の制御が改善されます。

(DRV2605L の内部ライブラリを使用した)ダブルクリックハプティクス効果の開ループ LRA ドライブ波形です。上の波形 (黄色/マゼンタ) はドライバからの差動出力で、下の波形 (赤) は LRA にかかる電圧を示しています。閉ループによる減衰および共振制御がない場合、LRA の動きはわずかなオーバーシュートが生じ、パルス間で振幅が不安定になります。

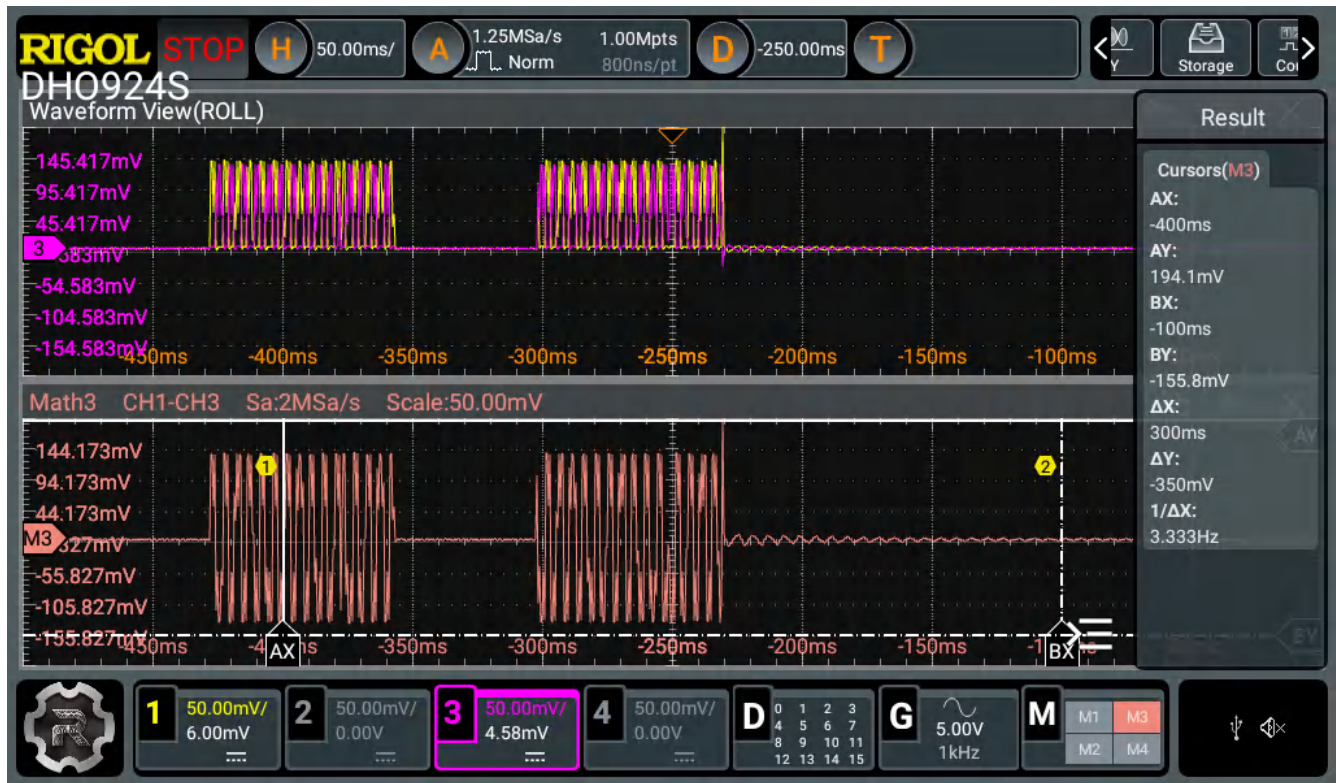


図 2-1. ダブルクリック エフェクトのオープンループ LRA 波形

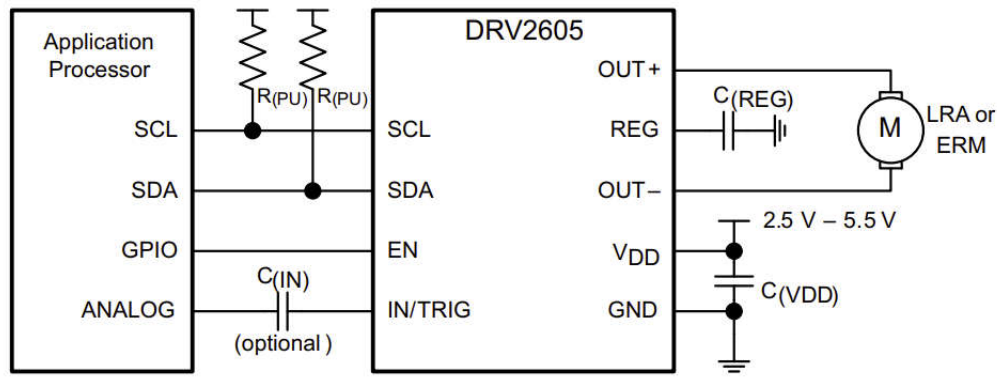
要約すると DRV2605L のオーディオハプティクス変換モードは、既存のオーディオを活用して環境ハプティクスの追加を簡素化します。また、閉ループ制御とエフェクト ライブラリにより、振動の品質を高めつつ、必要に応じて特定の触覚イベントも再生可能にしています。

3 ハードウェア テスト設定と構成

オーディオハプティクス性能を評価するために、DRV2605L と代表的な LRA アクチュエータを使用してテスト ベンチを設定しました。ハードウェアは、ホストコントローラに接続された TI DRV2605LEVM-MD 評価モジュール(DRV2605L ドライバおよび小型基板上的 LRA を含む) で構成されていました。実際の製品では、ホストは携帯コンソール内のアプリケーション プロセッサやマイコンが該当します。DRV2605L にオーディオ信号を入力し、さまざまな条件下で LRA の振動出力を観察しました。設定と構成には、次のような重要な要素が含まれます:

- オーディオ入力および結合:** オーディオ コーデックまたは信号発生器が、アナログ オーディオ信号を DRV2605L の IN ピンに入力しました。入力は、推奨されている通り、 $1\mu\text{F}$ のコンデンサを直列に接続して AC カップリングし、DC オフセットを遮断して AC オーディオ信号のみを通過させました。DRV2605L の入力インピーダンス (約 $100\text{k}\Omega$) と $1\mu\text{F}$ のコンデンサによって、カットオフ周波数が約 1.6Hz のハイパスフィルタが形成されます。これにより、関心のあるオーディオ周波数は容易に通過し、DC 成分は除去されます。オーディオ信号の振幅は、DRV2605L が許容する範囲内 (最大で約 1.8V のピークツーピーク) に保たれました。実際には、**100% 体積**のテストレベルは 1.0V RMS (約 2.8Vp-p) に相当し、そこからパーセンテージを下げるごとに振幅も縮小されました。DRV2605L の内蔵ノイズ ゲートはデフォルト設定のままとし、数ミリボルト未満のオーディオ信号を無視するようにしました。これにより、無音が期待される際にバックグラウンド ノイズやごく小さな音によってアクチュエータが誤作動するのを防ぐことができます。
- I²C 制御およびモード構成:** ホストコントローラは、DRV2605L の I²C インターフェイス (SCL、SDA) に接続されています。I²C コマンドを使用して、DRV2605L のレジスタをオーディオハプティクス モードに構成しました。重要なレジスタ設定としては、モード $0x04$ (オーディオから振動) の選択、LRA 駆動の有効化 (ERM モードではない)、AC 結合によるアナログ入力の有効化 (これには DRV2605L の制御レジスタの設定 (例: 適切な制御レジスタで $\text{AC_COUPLE} = 1$, $\text{N_PWM_ANALOG} = 1$ が含まれます))。定格電圧およびオーバードライブ クランプも LRA 用に設定しましたが、必要に応じてオートキャリブレーション (次に説明) でこれらの値を調整することもできます。図 3-1 は、ホスト (アプリケーション プロセッサ)、DRV2605L、および LRA 間の接続を示す設定の簡易回路図です。
- 自動キャリブレーション:** オーディオハプティクスへの変換モードを使用する前に、DRV2605L の LRA 用オートキャリブレーション手順を実行しました。これは一度きり (またはごくまれに実施する) 工程であり、ドライバが LRA の共振周波数や定格駆動電圧などの各種パラメータを測定するのに役立ちます。これを行うために、DRV2605L をキャリブレーション モード (モード レジスタ = $0x07$) に設定し、GO ビットを I²C 経由でトグルしました。ドライバは短時間 LRA を駆動し、応答を測定します。数百ミリ秒後、ステータス ビットがキャリブレーションの完了と成功を示していました。オートキャリブレーションによって、LRA の実効抵抗や逆起電力 (EMF) 定数などの駆動用パラメータが設定され、TI の特定のアクチュエータに対し閉ループ制御が正確に行えるようになりました。新しい LRA を初めて使用する際にはキャリブレーションが重要であり、一度キャリブレーションが完了すると、その値はレジスタに保存され、以降のオーディオハプティクスへの変換動作で使用されます。
- 測定装置:** ハプティック動作を観察するために、複数のプローブを備えたデジタル オシロスコープ (Rigol DS シリーズ) を使用しました。1 つの差動プローブを LRA の端子間に接続し、DRV2605L が LRA に印加している電圧を監視しました (この差動電圧は LRA の出力の力に相关します)。もう一つのチャンネルはオーディオ入力信号に接続し、オーディオ信号とそれによって生じる振動駆動との関係を確認できるようにしました。モード切り替えの評価のために、オシロスコープはタイムベースを遅く (1 デビジョンあたり数百ミリ秒) 設定し、モードがトグルされた瞬間をキャプチャできるようにしました。定常状態の波形 (特定の周波数や振幅での LRA の応答など) を観測する際には、より速いタイムベース (マイクロ秒〜ミリ秒スケール) を使用して、PWM 波形やエンベロープの詳細を確認しました。

DRV2605L は、I²C (SCL、SDA ラインとプルアップ抵抗付き) を介してアプリケーション プロセッサと接続されています。アナログ オーディオ入力は、カップリング コンデンサ C (IN) を介して IN/TRIG ピンに入力されます (未使用の場合はグラウンドに短絡することも可能です)。DRV2605L は、差動出力 (OUT+ および OUT-) で LRA (または ERM) を駆動します。レギュレータや電源ライン用のデカップリング コンデンサ (C(REG)、C(VDD)) も示されています。EN ピンは、ドライバのイネーブル/ディセーブルに使用できます (常時オンの場合は High に接続されます)。 $1\mu\text{F}$ の入力コンデンサは IN ピンのインピーダンスとともに、カットオフ周波数が約 1.6Hz のハイパス フィルタを形成し、DC を遮断しつつ低周波オーディオ信号を通過させます。


図 3-1. オーディオ/ハプティクス変換モードをテストするためのハードウェア設定

この設定を使用して、次の 2 つの主要な実験が行われました:

1. **定常状態のオーディオ/ハプティクス性能:** さまざまなオーディオ周波数と振幅で LRA をオーディオ/ハプティクスモードで駆動し、LRA の応答を特性評価します。
2. **モードスイッチングテスト:** DRV2605L をオーディオ/ハプティクス変換モードとリアルタイム再生モードの間で、オーディオ信号の有無を含むさまざまな条件下で切り替え、スムーズな遷移が行われることを確認しました。次のセクションでは、最初のテストセット (オーディオ/ハプティクスモードの性能評価) の波形結果を示します。

I²C の初期構成

DRV2605L を動作させる前に、**DRV2605LEVM-MD GUI** を使用して初期構成を適用する必要があります。次の手順に従います:

1. **DRV2605LEVM-MD GUI** を開き、USB 経由で EVM を接続します。
2. **Import Settings** (設定をインポート) を選択し、提供された構成ファイル (`initial table.txt`) をロードします。

適切な初期化には、以下のレジスタ設定が不可欠です:

表 3-1. インストール レジスタの設定

登録	値	説明
0x01	0x04	モード (オーディオ/ハプティクス変換)
0x03	0x06	ライブラリの選択
0x04	0x06	波形シーケンサ 1
0x0C	0x00	GO
0x11	0x00	オーディオからバイブへの制御
0x12	0x02	ATH 最小入力レベル
0x13	0x8D	ATH 最大入力レベル
0x14	0x4C	ATH 最小出力駆動
0x15	0xFF	ATH 最大出力駆動能力
0x16	0x2C	定格電圧
0x17	0x2C	オーバードライブ クランプ電圧
0x1A	0xB6	フィードバック制御 (LRA 開ループ)
0x1B	0xBB	Control1 (AC 結合有効)
0x1C	0xF5	Control2
0x1D	0xA3	Control3 (アナログ入力有効)
0x1E	0x20	Control4
0x1F	0x80	Control5
0x20	0x3F	LRA 開ループ期間

これらの設定により、オーディオ/ハプティクス変換機能に最適化された性能、適切なキャリブレーション、およびモード設定が確保されます。

モード切り替えの手順

初期化後、DRV2605L はオーディオ/ハプティクス モードと内蔵ライブラリ モードを動的に切り替えることができます。以下の I²C コマンドを、GUI のレジスタ書き込み機能またはマイコンの I²C スクリプトで使用します:

- **オーディオ/ハプティクス モードに切り替え:**

レジスタ 0x01 = 0x04 を書き込み

- **内蔵ライブラリ モード (ゲーム モード) に切り替え:**

レジスタ 0x01 = 0x00 を書き込み

レジスタ 0x0C = 0x01 を書き込み// 振動イベントをトリガ

スムーズな動作を確保し、連続トリガを防ぐため、次のタイミング推奨に従ってください:

- 振動イベントが発生した後、約 **20 ミリ秒** 待ちます。それ以上のイベントが発生しない場合:

レジスタ 0x01 = 0x04 を書き込み // オーディオ/ハプティクス モードに戻る

このタイミングにより、明示的なイベントが終了した後も、デバイスが連続的なオーディオ由来のハプティクスフィードバックへスムーズに復帰できるようになります。

GUI の使用方法 (DRV2605LEVM-MD)

1. 評価ボードを接続した後、**DRV2605LEVM-MD GUI** を開きます。
2. GUI の「**Import Settings**」(設定のインポート) ボタンを使用して、提供された初期構成(initial table.txt) をインポートします。
3. モードを手動で切り替える場合:
 - GUI の **書き込み** オプションを使用します:
 - **オーディオ/ハプティクス モード**には、レジスタ = 0x01、値 = 0x04 を入力します。
 - **内蔵ライブラリ モード**に、Reg=0x01、Val =0x00 と入力します。
 - 「**Write**」(書き込み) ボタンをクリックして確定し、実行します。

これにより、DRV2605L が正しく動作していることを簡単に確認でき、さまざまなモードでのハプティクスフィードバック性能を迅速に評価できます。

自動テスト用の I²C スクリプトの例

迅速かつ自動的にテストを行うために、ホスト マイコンで以下のスクリプト (擬似コード例) を実装できます:

```
// DRV2605L を初期化 (初期テーブルから設定をロード)
```

```
I2C_Write (0x5A, 0x01, 0x04); // デフォルトでは ATH モード
```

```
// ゲーム イベントが発生したとき (ユーザーがボタンを押す、またはゲームがイベントをトリガした場合)
```

```
I2C_Write(0x5A, 0x01, 0x00); // ライブラリ モード
```

```
I2C_Write(0x5A, 0x0C, 0x01); // ハプティクス イベントをトリガ
```

```
遅延 (20ms); // イベント バイブレーションが完了するまで待機
```

```
// これ以上イベントが発生しない場合は、ATH に戻ります
```

```
I2C_Write(0x5A, 0x01, 0x04); // オーディオ/ハプティクス変換モード
```

このスクリプトは、ゲーム用携帯機器のファームウェアに組み込むことで、効果的かつシームレスなハプティック体験の制御が可能になります。

4 波形テスト結果と分析 (オーディオハプティクス モード)

まず、オーディオハプティクス (A-V) 変換モードでの DRV2605L の出力について、制御されたオーディオ入力を使用して検討しました。目的は、ドライバがさまざまな周波数のオーディオ信号をどれだけ効果的に LRA の振動に変換できるか、また振動の振幅がオーディオ信号の振幅にどのように比例するかを確認することでした。テストでは 3 種類のトーン (100Hz、200Hz、300Hz) を使用しました。これらは、一般的な LRA の共振周波数 (約 180Hz) より低い、近い、そして高い音声信号をそれぞれ表しています。これらは、それぞれ低域の重低音 (100Hz)、共振周波数付近のバズ音 (200Hz)、より高音域のハム音 (300Hz) と考えることができます。各トーンは、次の 4 つの振幅レベルでテストされました: 25%、50%、75%、および 100% (100% はシステム ボリュームが最大に設定されていることに相当します)。例えば、25% はシステムの音量を 25 に設定すること、50% は音量レベル 50 に設定すること、というように対応します。この構成により、入力音量レベルごとの DRV2605L 出力の直線性を観察し、振動応答において飽和が発生するかどうかを確認できます。

各テストでは、A-V モードでオーディオを再生し、LRA 駆動 (差動出力) とオーディオ入力の定常波形を取得しました。オシロスコープのスクリーンショット (図 4-1 からまで図 4-12) に結果が示されています。これらすべての図において、青のトレース (C2) はオーディオ入力電圧を示し、マゼンタまたは黄色のトレース (C1 および C3、あるいはその差分 M3) は DRV2605L によって LRA に印加される差動電圧を表しています。基本的に、各グラフに表示されている色付きの PWM 波形がドライバの出力であり、エンベロップや振幅が振動の強さに対応しています。各ケースのオーディオ入力の実測振幅 (mV RMS) は、参考として図のキャプションに記載されています。

100Hz 入力 (共振より低い場合): 100Hz では、LRA は共振周波数より低い周波数で駆動されています。共振時と比べて、同じ電圧の場合の振動は弱くなると予想されますが、DRV2605L はそれでもオーディオの振幅に比例して駆動することができます。

DRV2605L の出力 (100Hz サイン波入力、音量 25%、2.1mV)。この低いオーディオレベルでは、LRA に印加される差動電圧が小さく、ごくわずかな振動しか発生しません。波形には、ドライバ出力の PWM パルス (ピンクまたは黄色) が示されており、これらのパルスの振幅は低く、かろうじて感じられる程度のバズ音を生じさせるのに十分なレベルです。



図 4-1. 100Hz 入力、音量 25% — 最小限の振動

DRV2605L の出力 (100Hz 入力、音量 50%、7.1mV)。中程度のオーディオレベルでは、ドライバは LRA により高い電圧を印加します (25% の場合のおよそ 2 倍の振幅となります)。LRA の振動が体感できるようになります。オシロスコープの波形には、LRA 駆動電圧の 100Hz エンベロープが明確に示されています (青いトレースが 100Hz で振動し、PWM 出力もエンベロープに追従しています)。振動の振幅は 25% の場合と比べておよそ 2 倍となっており、この範囲ではおおむね直線的な応答が見られることを示しています。



図 4-2. 100Hz 入力、音量 50% — 体感できる振動

DRV2605L の出力 (100Hz 入力、音量 75%、14.1mV) このオーディオレベルが高くなると、ドライバの出力 PWM スイングが大きくなり、LRA をより大きな力で駆動します。振動は強くなり、引き続き 100Hz のオーディオ波形エンベロープに従っています。



図 4-3. 100Hz 入力、音量 75% - 強い振動

DRV2605L の出力 (100Hz 入力、音量 100%、21.8mV)最大のオーディオ入力では、ドライバはフルスケールの差動電圧 (黄色またはマゼンタの PWM 波形) を出力します。LRA は、100Hz 駆動の強い振動を受けます。ドライバはクリッピングなしで LRA を正常に駆動します。



図 4-4. 100Hz 入力、音量 100% — フルスケールの振動

200Hz 入力 (近接共振): 200Hz は、テスト用 LRA の共振周波数付近に位置しています。LRA はこの周波数付近で最も強く応答し、より小さい入力電圧でも大きな振動を生じると予想されます。

DRV2605L の出力 (200Hz サイン波入力、音量 25%、2.1mV)M3トレースには PWM 出力はありません。

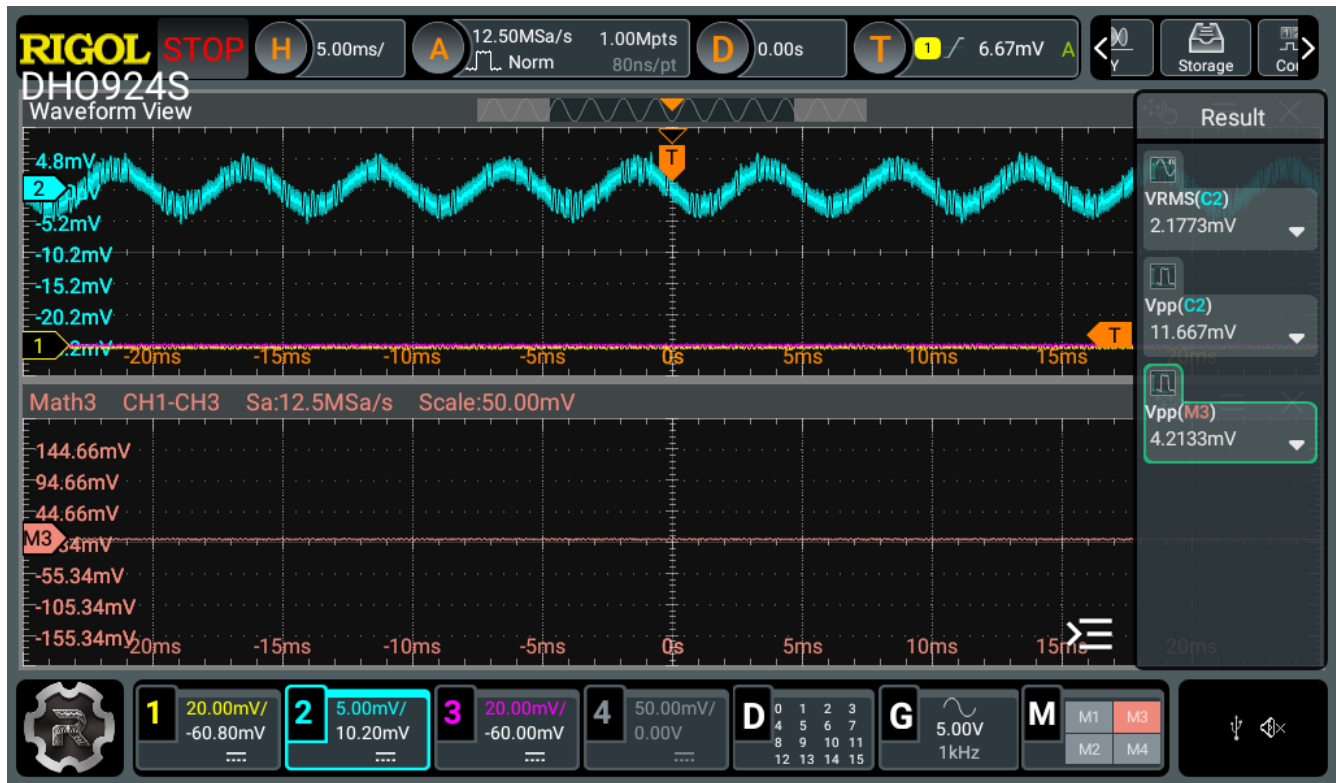


図 4-5. 200Hz 入力、音量 25% — PWM 出力なし

DRV2605L の出力 (200Hz 入力、音量 50%、7.1mV) 共振周波数付近でオーディオ入力 halves の場合、LRA 駆動 (黄色またはマゼンタの波形) がより顕著になります。青いトレースは、200Hz のオーディオ波形を示します。

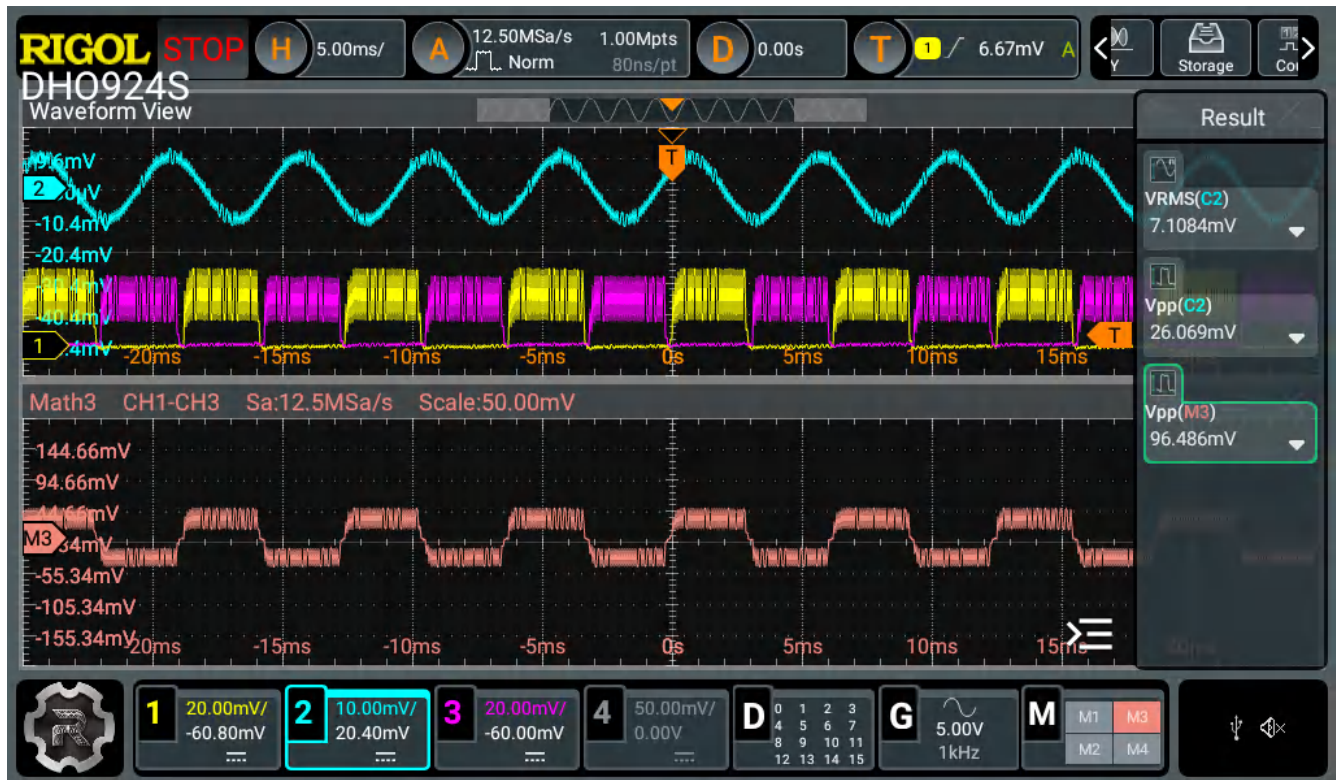


図 4-6. 200Hz 入力、音量 50% — 中程度の振動

DRV2605L の出力 (200Hz 入力、音量 75%、14.1mV)オーディオ レベルが 75% になると、出力波形には大きな PWM の振幅変動が見られます。

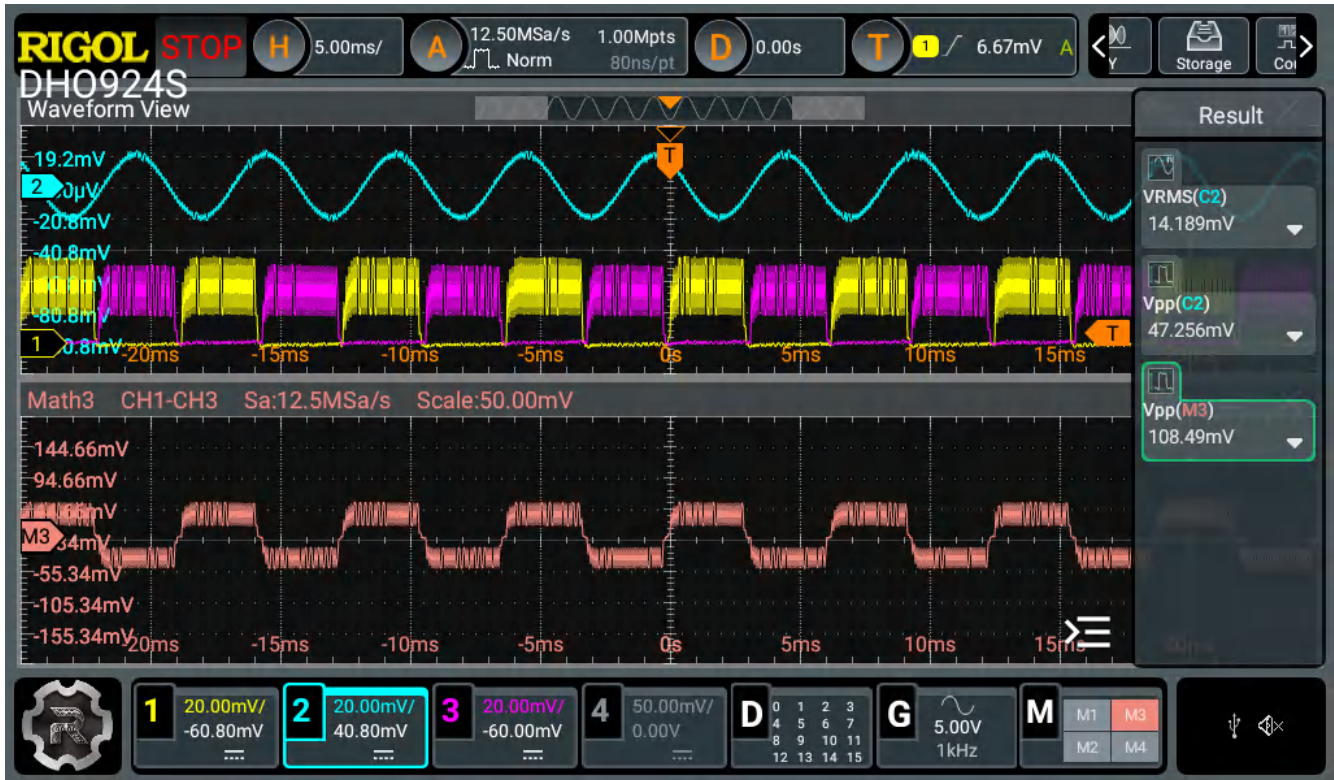


図 4-7. 200Hz 入力、音量 75% — 高い PWM アクティビティ

DRV2605L の出力 (200Hz 入力、音量 100%、21.8mV)共振周波数でのフルスケール入力では、LRA が最大強度で駆動されます。出力波形 (マゼンタまたは黄色) は、これまでで最も高い振幅のパルスを示しており、青のトレースは 200Hz のオーディオが連続していることを確認できます。LRA の動きはピークに達しており、これは非常に強い振動 (深いバズ音) に相当します。

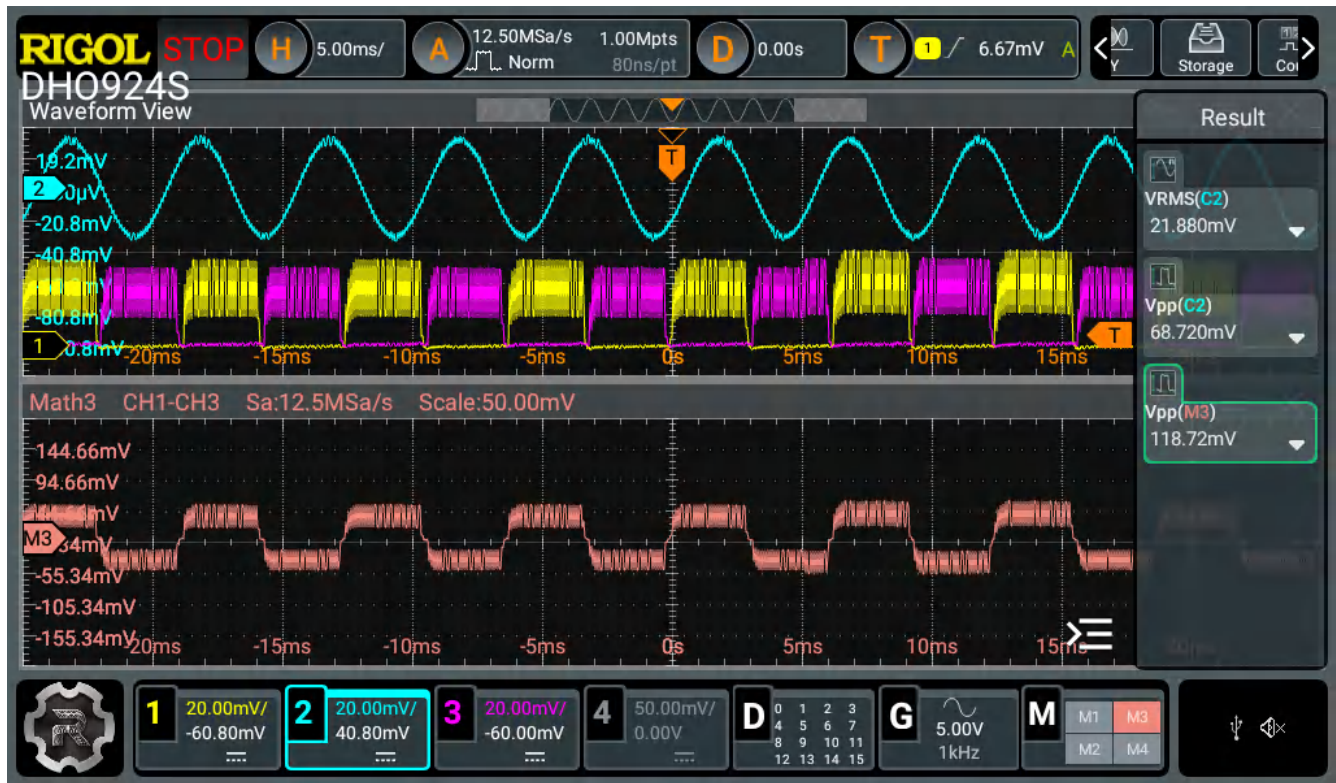


図 4-8. 200Hz 入力、音量 100% — 最大振動

共振周波数において、DRV2605L の閉ループ制御は特に有効でした。LRA の動きが激しくなると、LRA からの逆起電力 (back-EMF) も増加します (LRA は、LRA が動くことで電圧を発生させます)。

300Hz 入力 (共振周波数以上): 300Hz は高い周波数です。この領域では、ドライバが LRA をそれほど強く駆動しないため、振動出力は減少すると予想されます。

DRV2605L の出力 (300Hz 入力、音量 25%、2.1mV)。音量が 4 分の 1 の場合、オーディオは 300Hz のトーンですが、LRA に印加される差動電圧 (M3、赤のトレース) はゼロです。

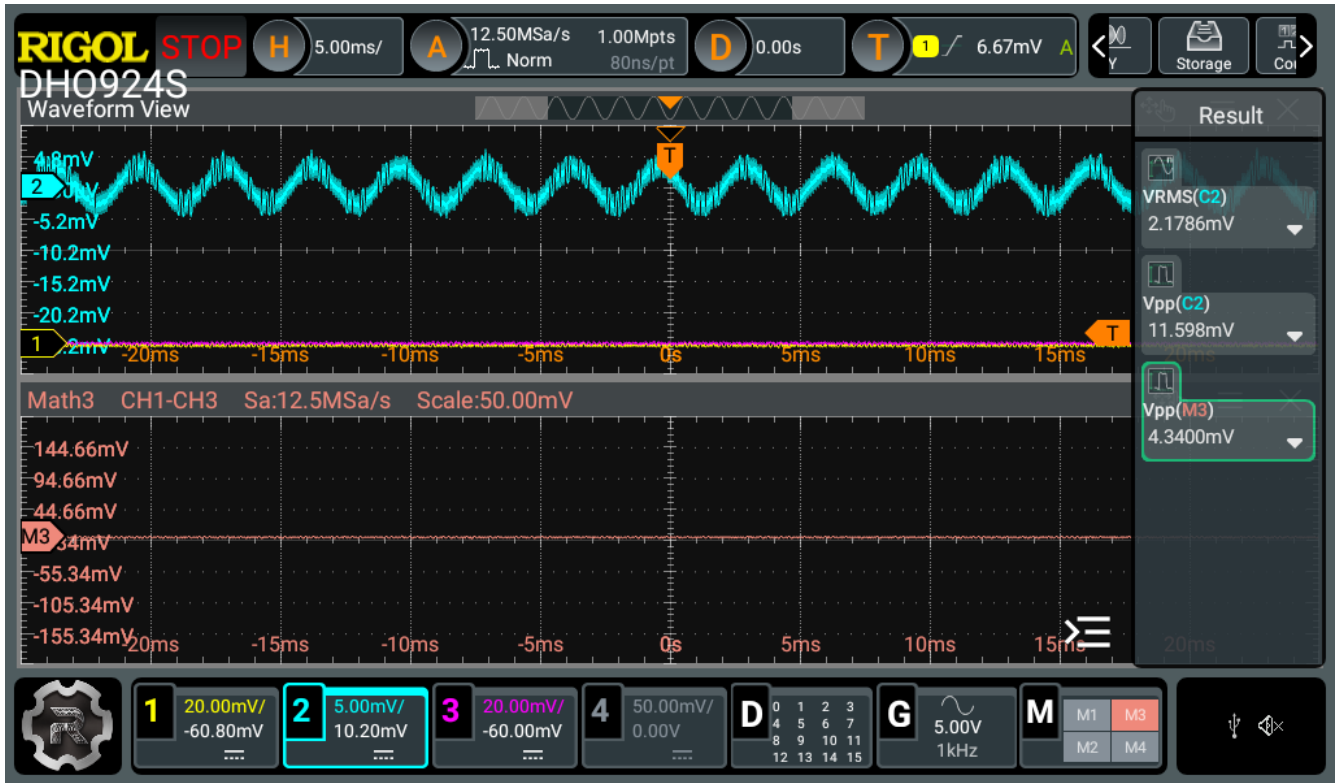


図 4-9. 300Hz 入力 (25% 音量) - 振動なし

DRV2605L の出力 (300Hz 入力、音量 50%、7.0mV) 中程度の 300Hz 入力でも、ドライバは振動を出力しません。

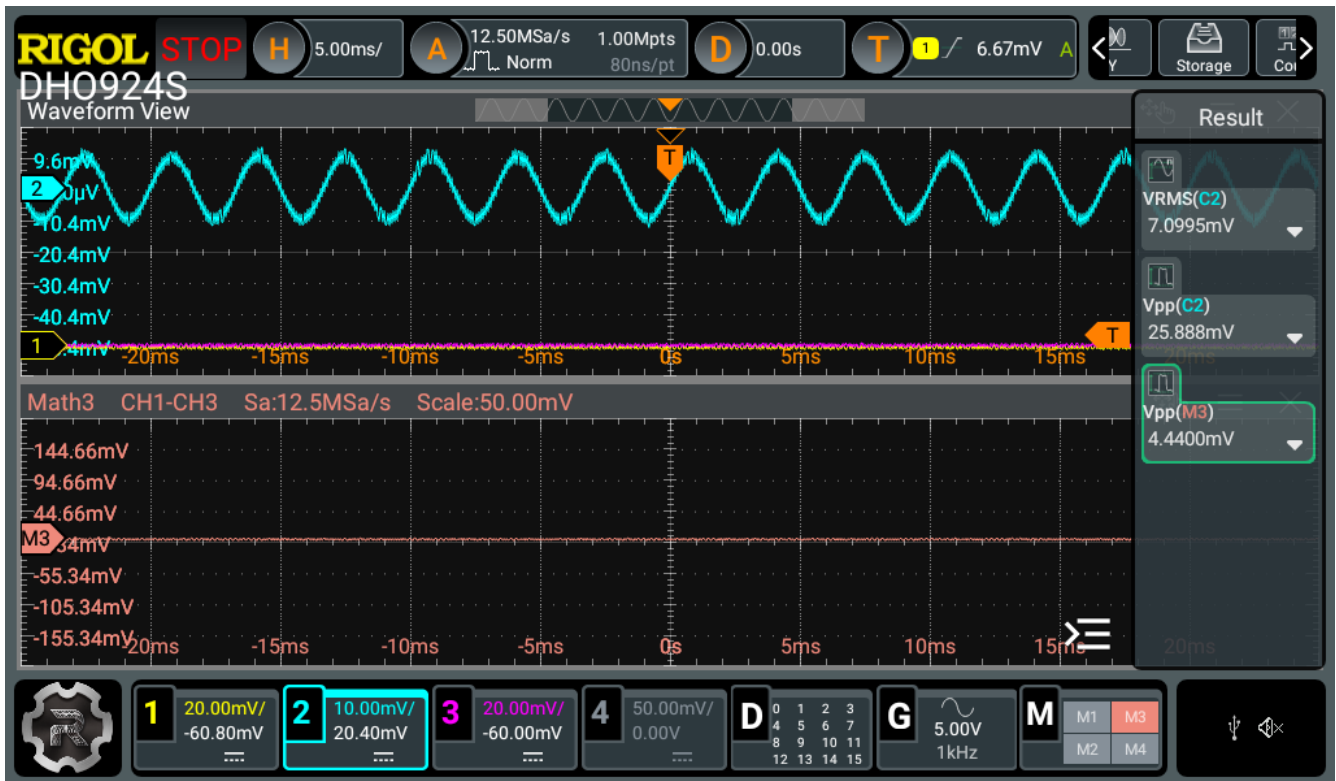


図 4-10. 300Hz 入力 (50% 音量) - 振動なし

実際、300Hz では振動がかなり弱くなりました。DRV2605L はこの入力信号をより低い周波数の振動に変換していますが、振幅は 300Hz の励起が難しいことを反映しています。振幅を大きくすると、次のようになります：

DRV2605L の出力 (300Hz 入力、音量 75%、14.1mV) 音量 75% では、オシロスコープに大きな PWM 動作が示されています。LRA は振動しますが、その振動は 200Hz での同じ 75% 音量時よりも柔らかく感じられます。出力波形は安定しており (不規則な動作は見られません)、ドライバが正常に制御していることを示しています。ただし、その周波数では強い振動を生成できません。



図 4-11. 300Hz 入力 (75% 音量) - ソフトな振動

DRV2605L の出力 (300Hz 入力、音量 100%、21.0mV) 300Hz で最大のオーディオ振幅の場合、ドライバは可能な限りの出力を行います。オシロスコープの波形では、オーディオ信号 (青) に高周波成分が含まれていますが、LRA 駆動波形 (マゼンタまたは黄色) は主に LRA の共振周波数で振幅変調された形で現れています。その結果としての振動は存在し、オーディオの強度とおおよそ関連していますが、100Hz や 200Hz のフルボリュームの場合に比べて明らかに弱くなっています。

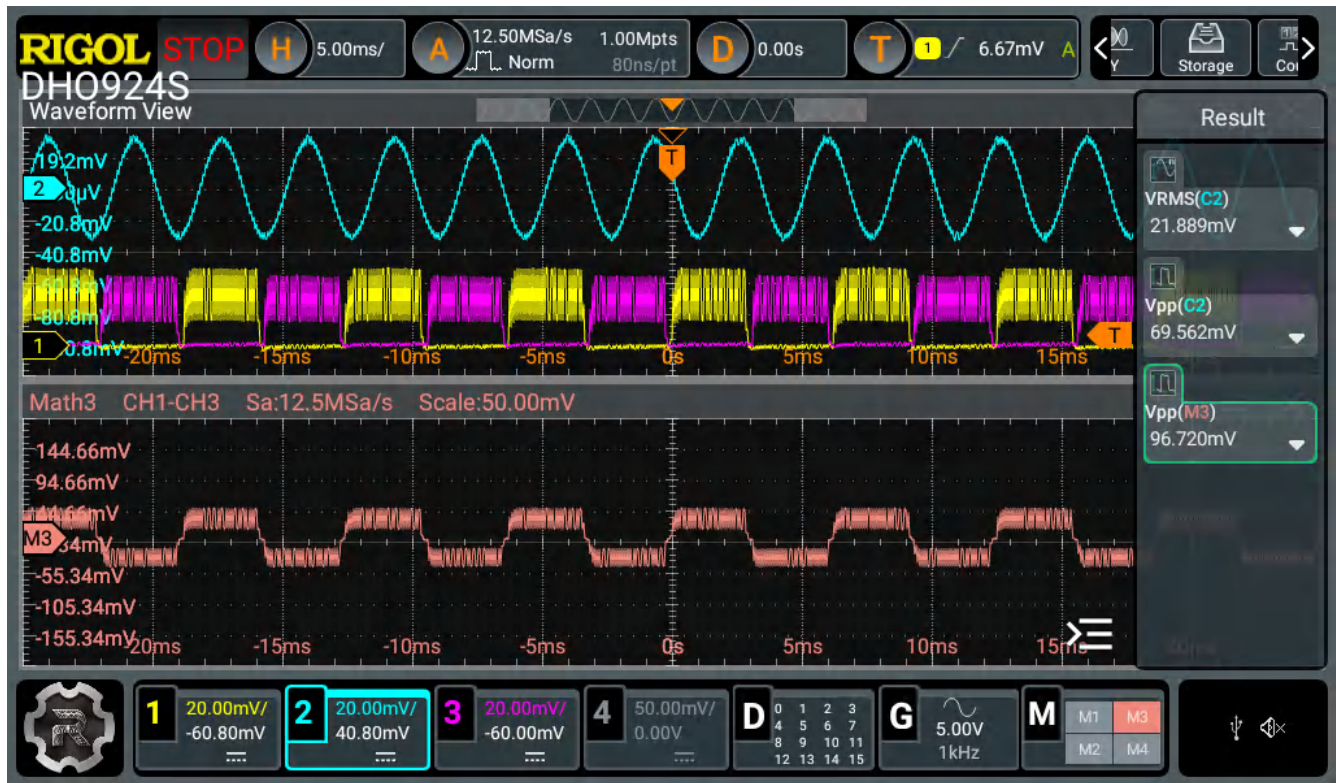


図 4-12. 300Hz 入力、音量 100% — 弱い振動応答

高周波数でもいくらかの触覚フィードバックは生成されており、制御によりすべての場合で波形は安定していて(意図しない歪みや長時間のリングングが発生しないよう) 保たれています。なお、非常に短いオーディオ バースト (約 10~20ms 未満) は、人間の触覚閾値以下であればほとんど触覚を感じさせません。DRV2605L のアルゴリズムには、極めて短いオーディオのノイズを無視して誤動作を防ぐためのフィルタリングが組み込まれている可能性があります。

全体として、これらの定常状態テストにより、DRV2605L は特に LRA の共振周波数付近で、オーディオ入力を効果的に LRA の振動へ変換できることが示されました。このデバイスは、安定性を維持しながら、制限範囲内でオーディオ振幅にほぼ比例した振動応答を提供しました。

5 モードスイッチング動作 (オーディオからハプティクスへの変換とリアルタイム再生の比較)

オーディオ/ハプティクス変換モードのみを特性評価してから、オーディオ/ハプティクス変換 (A-V) モードと手動駆動モードを切り替えるときの動作を検討しました。多くのアプリケーションでは、システムは通常、環境フィードバックのためにオーディオ/ハプティクス変換で動作しますが、特定のイベントが発生し専用の振動パターンがある場合には、一時的にダイレクトハプティクスモード (リアルタイム再生やライブラリエフェクトの再生など) に切り替わります。DRV2605L はモードレジスタを使ったオンザフライのモード切替に対応していますが、振動の一時的な衝撃や停止といった望ましくないノイズを避けるために、切り替えの際の移行を適切に管理することが重要です。

いくつかのシナリオがテストされました: A-V モードからリアルタイム再生 (RTP) モードへの切り替え、およびその逆の切り替えで、音声入力がある場合とない場合の両方の条件で行われました。主な観察結果は次のとおりです:

モードについて: オーディオ/ハプティクス変換 (A-V) モードでは、DRV2605L は音声入力から自律的に LRA を駆動します。音声がある限り、振動を発生させるための明示的な I²C コマンドは不要です。リアルタイム再生 (RTP) モードでは、DRV2605L は直接コマンドを受け取ります。ホストは任意のタイミングで RTP 入力レジスタ (0x02) に 8 ビットの値を書き込み、希望する駆動強度を指定します (これは実質的に LRA の PWM 出力を制御するコマンドとなります)。RTP モードは、任意の波形を生成したり、ホストの制御下でエフェクトを再生したりするのに便利です。また、ホストが事前定義されたエフェクトシーケンスをトリガできる波形シーケンサ/ライブラリモードもあります (レジスタ 0x04~0x0B に書き込み、モードを 0x00 に設定)。しかし、モード切替の観点からは、これは RTP モードと概念的に似ており、その場合ドライバは音声入力を使用しません。

- **オーディオなしで A-V から RTP に切り替え:** 切り替え時に音声入力が無音の場合、実質的に何も起こりません (ドライバは A-V モードに移行しますが、音声がないため振動は発生しません)。システムが A-V モードから RTP モードに切り替わった際に、手動での駆動コマンドが与えられなければ、振動はオフのままになります。このシナリオは単純で、競合がありません。音声が始まるか、RTP 値が書き込まれた時点で、それに応じた出力が即座に反映されます。
- **進行中のオーディオによる A-V から RTP への切り替え:** これはもっと興味深いケースです。デバイスが連続的なバックグラウンドオーディオを使用して A-V モードになっているとき、システムが RTP またはライブラリを使用して特定のハプティクスエフェクトを引き継ぎ、再生しようとする場合が考えられます。A-V モードでは、DRV2605L は音声に基づいて積極的に LRA を駆動しています。RTP モードに切り替わる瞬間に、ドライバが即座に駆動を停止すると (まだ RTP 値が設定されていないため)、LRA が突然停止し、不連続な振動が発生する可能性があります。突然の停止を避けるために、移行を慎重に処理する必要があります。

例えば、あるシナリオ [図 5-1](#) では、デバイスが最初 RTP モード (振動出力が指示されていない状態) にあり、その後 50% の音量で 100Hz のオーディオトーンがすでに DRV2605L に入力されている状態で、オーディオ/ハプティクス変換モードに切り替えた場合を示しています。スコープの上半分のパターンは、切り替えを通じて青いオーディオ波形が継続している様子を示しています。下部 (赤) のパターンは LRA 出力です。切り替えの瞬間付近で A-V モードが有効になると、出力が振動を始め、1 サイクル内にその音声入力に応じた期待される振幅に達する様子が確認できます。これは、デバイスがスムーズに音声駆動の動作を開始したことを確認しており (アルゴリズムの安定化に伴うわずかな初期の振幅低下はありますが)、問題なく切り替わったことを示しています。

100Hz オーディオトーンの再生中に、RTP モードからオーディオ/ハプティクスモードへの切り替えをスコープでキャプチャします。水平軸の時間 0 はモード切り替えの瞬間です。青のパターン (CH2) は音声入力を示しており (14.2mV RMS、約 50% の音量)、切り替え前後で連続しています。マゼンタ/黄色パターン (LRA 差動出力) は、RTP モード中は (駆動が指示されていなかったため) フラットでしたが、オーディオ/ハプティクス変換モードに切り替わると振動を始めました。t=0 の直後に、DRV2605L のオーディオアルゴリズムが制御を引き継ぐため、振幅が短時間で徐々に増加する様子が観察されます。切り替えから約 40~50 ミリ秒後には、振動出力が定常状態に達し、音声の振幅と一致しています。切り替えはスムーズで、大きなスパイクや不連続は発生していません。

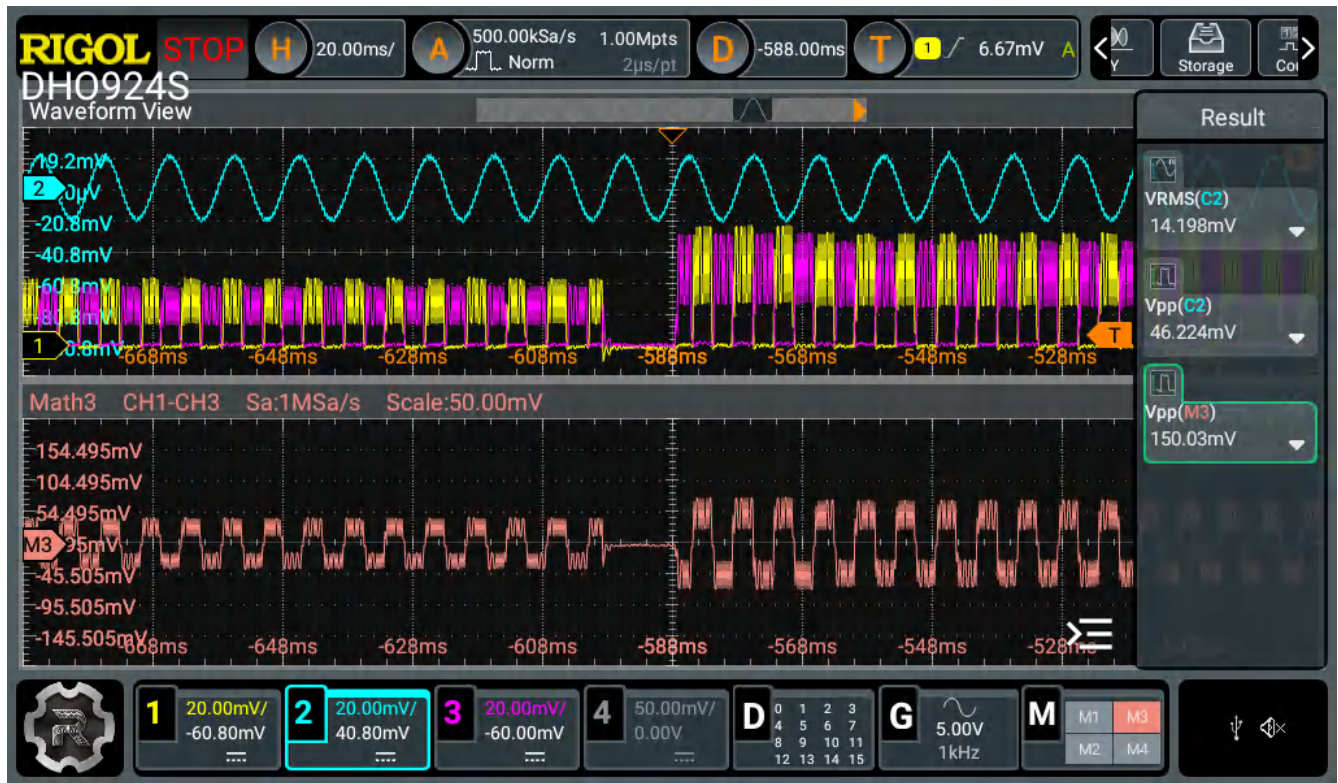


図 5-1. 100Hz オーディオトーンの再生中に RTP モードからオーディオ/ハプティクス モードに切り替え

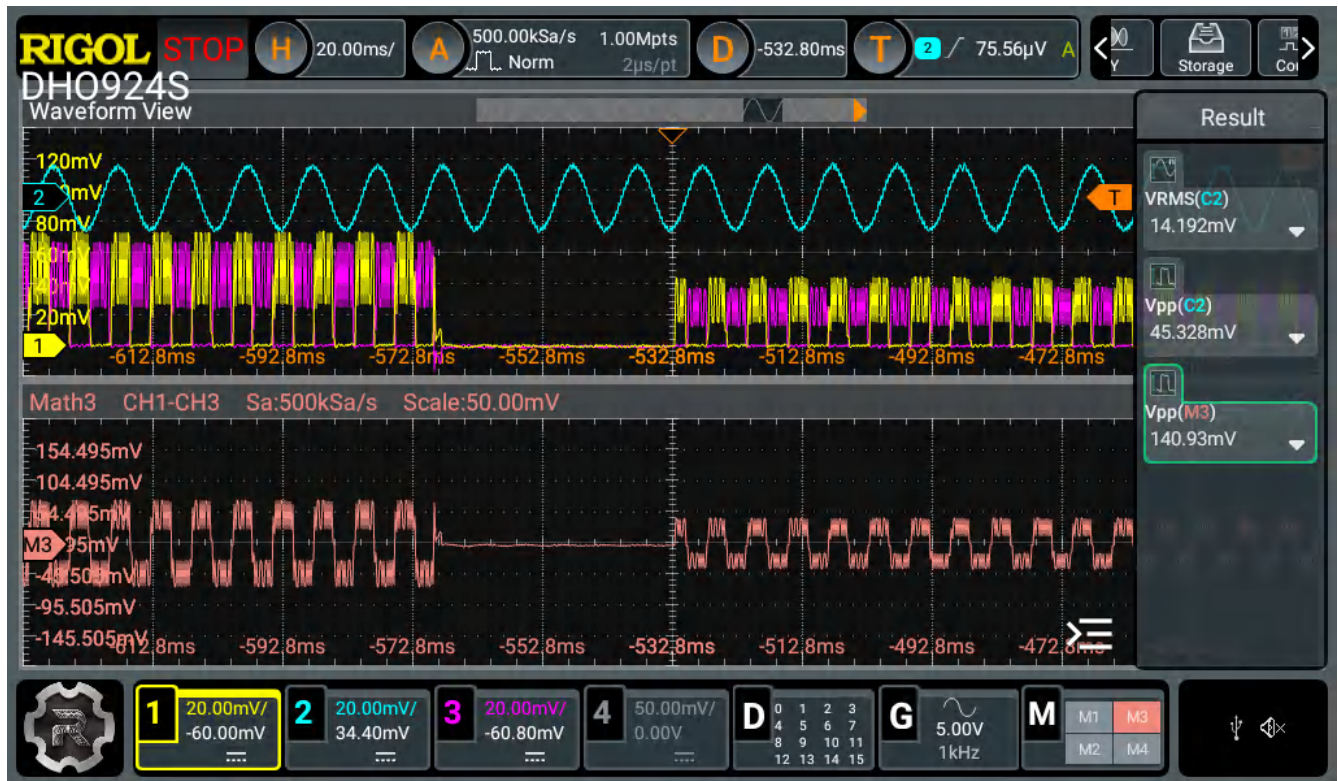


図 5-2. オーディオ/ハプティクス変換モードから RTP モードへの切り替え時に、切り替え時の駆動信号をゼロにする手法を用いた切り替え

まとめると、自動オーディオハプティクス変換モードと手動制御モード間のノイズのない切り替えを実現するには、ホスト側が切り替え時に RTP レジスタの値を適切に管理する必要があります (現在のレベルに合わせるか、一時停止のためにゼロに設定するなど)。また、短いモード切替遅延にも注意を払うことが重要です。これらの方法を用いることで、DRV2605L はユーザーが振動の途切れを感じることなく、スムーズに制御を引き継ぐことができます。

6 DRV2605L における統合モードとスイッチング モード: オーディオハプティクス変換と内蔵ライブラリ モード

上記の検討を踏まえ、DRV2605L のオーディオハプティクス変換モードを他のモードと併用する際には、以下の点を考慮する必要があります:

1. **初期デバイス構成:** 起動時に、DRV2605L は (新しい LRA を使用する場合や環境条件が大きく変わった場合に) 自動キャリブレーションを行い、その後オーディオハプティクス変換モード (モード 0x04) に設定できます。一方で、ホストは必要に応じて I²C 経由でモード切替を行う準備を整えておく必要があります。これは、予想される音声に合わせて DRV2605L の制御レジスタ (ノイズ ゲートやフィルタなど) を適切に設定するのにも役立ちます。この設計ではデフォルト値で十分に機能しましたが、これらのレジスタは音声のフィルタリングやスケーリング方法をカスタマイズするためのものです。
2. **手動モードへの切り替え:** 特定のハプティクス効果が必要な場合 (武器の反動、ゲームで明らかに知っている爆発など)、システムは DRV2605L を手動モードに切り替えることで、オーディオ駆動の振動をオーバーライドできます。例えば、ROM ライブラリ エフェクトを再生するには、デバイスを波形シーケンサ モード (モード 0x00) に設定し、再生したいエフェクトのインデックスをシーケンサ レジスタに読み込ませます。また、カスタム エフェクトの場合はリアルタイム再生モード (モード 0x05) を使用し、ホストが RTP レジスタに波形データを書き込むことでストリーミング再生が可能です。
3. **オーディオ モードに戻る:** イベント ハプティクスが完了した後 (エフェクトの再生完了やカスタム コマンドの終了後)、モードを 0x04 (オーディオハプティクス変換) に戻し、継続中のゲーム オーディオによる制御を再開させます。オーディオがバックグラウンドで継続的に再生されている場合、振動は自動的に元に戻されます。テストにより、この方法が効果的に機能することが確認されました。DRV2605L はモード間の切り替えを安定して行うことができ、ユーザーには常に何らかの信号がハプティクス モーターを駆動しているように感じられます。つまり、ゲームのオーディオが明示的なハプティクス コマンドのいずれかが振動を制御しています。ライブラリ エフェクトを使用すると、一般的なイベント (クリック、ダブルクリック、ランプ ブザーなど) の波形を調整できるので便利です。例えば、一般的な雰囲気づくりにはオーディオから振動への変換を使用しつつ、プレイヤーが武器を発射したり爆発がゲームで明示的に発生した場合には、より強力なライブラリ エフェクトを再生できます (必要に応じて DRV2605L へオーディオの入力を一時的にミュートすることもあります)。多くの場合ミュートせずとも、モード切替時に自動的にオーディオ入力が無視されます。

可能であれば、オーディオ イベントとハプティクス イベントを調整することが重要です。ゲーム イベントに音 (例えば爆発音) が伴い、同時にライブラリ エフェクトも再生される場合、その瞬間に DRV2605L へのオーディオ入力をミュートまたは音量を下げて、LRA の二重駆動を避けることを検討してください。実際には、上述の方法ではモードを切り替えているため、ライブラリ エフェクト再生中オーディオ入力を使用されず、競合は発生しません。ただし、複数の DRV2605L ドライバ (例えば、1 台は連続的なオーディオハプティクス用、もう 1 台はイベント効果用) を使用する場合は、オーディオ駆動のドライバと明示的な効果用ドライバが同時に振動しないようにし、振動の重複を防ぐ必要があります。説明したシングルドライバ方式では、この状況を回避します。

開発をさらに効率化するため、TI の PC GUI (USB 接続のコンソール) を使用して、モード切替の動作確認やパラメータ調整を行い、その後コーディングを行いました。強く推奨: EVM や同様のツールを初期開発で使用することで、理解が早まり、より充実した開発プロセスが実現できます。例えば、GUI を使えばファームウェアの再コンパイルなしでモード切替や設定調整が迅速に行えるため、動作の微調整が容易になります。

このツールには、[図 6-1](#) に示すように、レジスタ マップと、DRV2605L の設定を構成するためのボタンが含まれます。

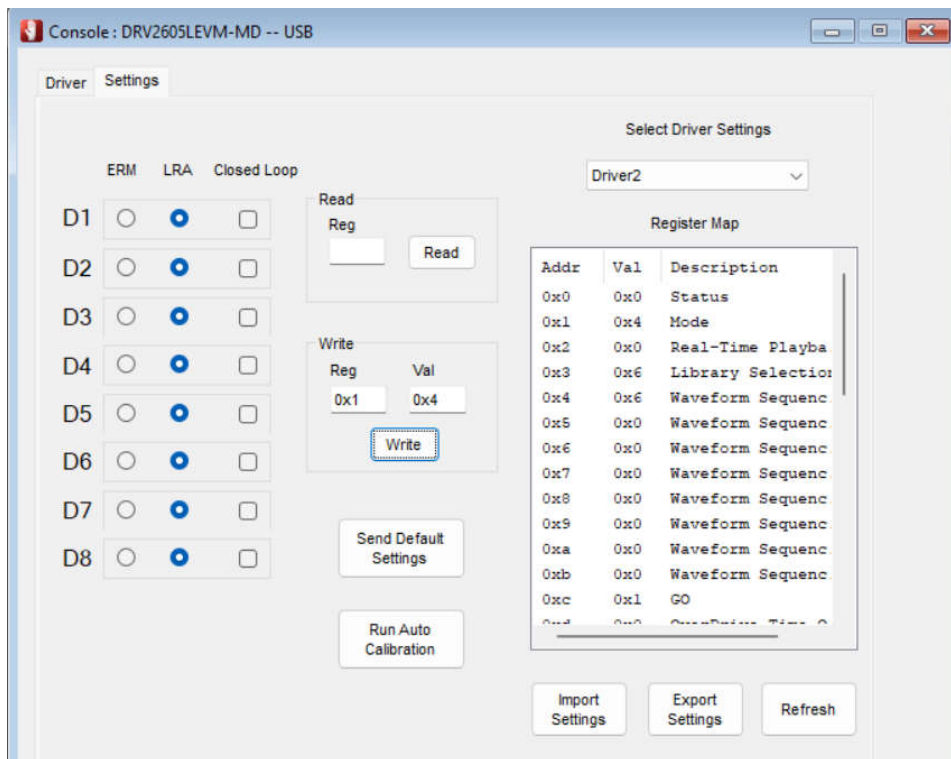


図 6-1. 開発に使用された DRV2605LEVM-MD コンソール GUI (USB キット)

7 モード切り替えに関する観察と推奨事項

これらの経験から、いくつかの重要な教訓が得られました。これを実施するための主な観察事項と推奨事項は次のとおりです:

- 閉ループ (LRA) モードを使用:** LRA を使用する場合、常に DRV2605L を閉ループ LRA ドライブ用に構成します。優れた性能を実現するには、Smart-Loop 制御が不可欠です。閉ループ モードでのテストでは、振動が弱く、一貫性が低くなりました。閉ループ制御により、LRA は共振周波数で駆動され、0 が指示された時には素早く停止します。これは特にモード切替時に役立ち、振動の残留を防ぎます。
- 最小化モード スイッチ:** モード切り替えを頻繁に行う必要があり、意図的に行う必要があります。モード切替時には、DRV2605L が安定するまで数ミリ秒の遅延があります。モード変更が頻繁すぎる場合 (例えば、オーディオモードと手動モードを急速に切り替えるなど)、LRA が安定する時間がなくなり、期待した性能が得られないことがあります。実際には、ゲーム イベントごとに 1 回の切り替えでも問題ありませんが、不必要な頻繁な切り替えは避けるようにしましょう。
- ハプティクス アクションのグループ化:** 一般的には、非常に低レベルのオーディオによる意図しない振動を防ぐために、ノイズ ゲートはデフォルト設定 (およそ数 mV のスレッシュホールド) のままにしておくことが推奨されます。ハプティクス フィードバックを計画するときは、可能であればハプティクス アクションをグループ化します。例えば、ゲームプレイがないカットシーン中はバックグラウンド ミュージックに対してオーディオ/ハプティクス変換モードを使用します。カットシーンが終了してゲームプレイが再開されて明示的なイベントが発生する場合は、手動モードに切り替えることが推奨されます。ゲームプレイの論理的な区切りに合わせてモード切替をまとめることで、頻繁な切り替えを避け、ハプティクスの予測可能性を高めることができます。
- 自動キャリブレーションの適切な使用:** ドライバの閉ループ パラメータの精度を確保します。この設計では、一度キャリブレーションを行えば、起動のたびに再キャリブレーションを行う必要はありません (値は保存可能であり、電源が切断されない限りドライバ内に保持されます)。ただし、環境条件が変化した場合などに備え、少なくとも一度は自動キャリブレーションを行う、あるいは時折実施することが、設計通りの性能を維持するために推奨されます。キャリブレーションを行わずにデバイスを使用すると、触覚フィードバックの品質が低下する可能性が確認されているため、キャリブレーションを行うことが推奨されます。
- ステータス フラグのモニタリング:** テスト中、故障フラグを含むステータス レジスタを監視し、異常状態が発生していないことを確認しました。これらのテストでは異常は検出されませんでした。特に LRA を強力に駆動する場合は、過電流などの故障状態を検知するために、このような監視機能を最終設計に組み込むことが推奨されます。

上述の推奨事項、特に切り替え時の慎重な処理を取り入れることで、エンジニアはゲーム用ハンドヘルド デバイスにおいて、オーディオ/ハプティクス変換と手動ハプティクス制御のシームレスな統合を実現できます。このアプローチは、ゲームの既存のオーディオ出力を活用してリアルタイムに没入感のある振動を生成するとともに、必要に応じて明示的なハプティクス エフェクトの再生も可能にします。DRV2605L は、オーディオ信号を自動的に触覚フィードバックに変換する強力な方法を提供し、閉ループ制御によりその振動を鮮明かつ的確に維持します。さまざまオーディオな周波数と音量でのテストにより、デバイスは音声入力を効果的に意味のある振動に変換できることが示されました。特に、LRA の共振周波数付近で最も強いフィードバックが得られました。また、特定のイベントで独自のハプティクス応答が必要な場合でも、システムは一時的にモードを切り替えて、ユーザーに違和感を与えたり遅延を生じさせたりすることなく、望ましい効果を提供できます。

この具体的なテスト シナリオ以外に注目すると、オーディオ/ハプティクス変換フィードバックという概念は適用可能性が広い範囲に対応できることがわかります。オーディオ出力を搭載したあらゆるコンシューマ デバイスで、この技術を活用してユーザー体験を向上させることができます。例えば、VR コントローラは、ゲームのオーディオから環境音 (風や遠くの爆発音など) をオーディオ/ハプティクス変換を使用して振動を生成し、没入感を高めることができます。ホームシアター チェアやウェアラブル ベストは、映画やゲームの音声サウンドトラックを振動に変換し、手軽に 4D 体験を提供できます。小型かつ柔軟性に優れた DRV2605L は、これらの用途に最適な設計となっています。将来的には、スマートフォンやタブレット、カー エンターテインメント システムなどのデバイスが、オーディオ駆動のハプティクスを活用して、開発者がすべてのメディアに対して明示的にハプティクストラックをコーディングしなくてもコンテンツを豊かにすることが想像できます。

8 概要と今後のアプリケーション

本アプリケーション ノートでは、ゲーム用ハンドヘルド デバイスにおける TI 製 DRV2605L ハプティクスドライバのオーディオ/ハプティクス変換モードの統合および使用方法を示しました。当社のアプローチは、ゲームの既存のオーディオ出力を活用してリアルタイムに没入感のある振動を生成しつつ、必要に応じて明示的な触覚効果も再生できるようにすることでした。DRV2605L は、オーディオ信号を自動的に触覚フィードバックに変換する強力な設計を提供し、閉ループ制御により振動を鮮明かつ的確に維持します。さまざまな音声周波数と音量でのテストにより、デバイスは音声入力を効果的に意味のある振動に変換できることが示されました。特に LRA の共振周波数付近で最も強いフィードバックが得られました。実験ではまた、デバイスが音声駆動のハプティクスと直接コマンド駆動のハプティクス (RTP またはライブラリ モード) 間をスムーズに切り替えられることも示されました。これは、環境的なハプティクス イベントとスクリプト化されたハプティクス イベントが混在するゲームでの実用に不可欠な機能です。提供された制御スキーム (I²C コマンドおよびモード切替戦略を含む) は、エンジニアがプロジェクトを再現し微調整するための参考となります。

今回の特定のテスト シナリオを超えて、オーディオ/ハプティクス変換フィードバックのコンセプトは幅広い応用の可能性を持っています。オーディオ出力を搭載したあらゆるコンシューマ デバイスで、この技術を活用してユーザー体験を向上させることができます。例えば、VR コントローラはゲームのオーディオから環境音 (風や遠くの爆発音など) をオーディオ/ハプティクス変換を行って、振動を生成しつつ、直接的な操作には特定のハプティクス キューを使用できます。同様に、ゲーミング チェアやウェアラブル ベストは、映画やゲームの音声サウンドトラックを振動に変換し、手軽に 4D 体験を提供できます。小型かつ柔軟性に優れた DRV2605L は、これらの用途に最適な設計となっています。それでも、現在の技術で説明したように DRV2605L を実装することで、明示的なハプティクスコンテンツが不足している場合でも、そのギャップを大幅に埋め、ソフトウェアの負担を最小限に抑えながらユーザーの没入体験を豊かにすることができます。

結論として、DRV2605L をゲーム用ハンドヘルドに統合し、オーディオ/ハプティクス変換フィードバックを実現することは、実現可能で効果的な設計です。これにより、ゲームのオーディオを活用した連続的かつコンテキストに応じた振動が可能となり、ハードウェアの変更は最小限で済み、望ましい触覚感覚に柔軟に調整できます。このノートに記載されているガイドラインと例に従うことで、エンジニアやフィールド アプリケーション チームは、開発を迅速化し、より魅力的な製品を実現することができます。リアルタイムのオーディオ駆動触覚とオンデマンドのカスタム エフェクトの組み合わせは、DRV2605L によって実現され、ゲーマーはもちろん、さまざまな分野で新たな次元のインタラクティブなフィードバックを提供します。

9 参考資料

1. テキサス インスツルメンツ、『[MSP430FR573x ミックスド シグナル マイクロコントローラ](#)』、データシート
2. テキサス インスツルメンツ、『[DRV2605L ERM および LRA ハプティクスドライバ評価キット](#)』データシート
3. 米国国立医学図書館、『[Temporal Summation in Vibrotactile Sensitivity](#)』、R T Verrillo、1965 年

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 © 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated