



## 制御パラメータ最適化のための 組込み設計の検証手法

### はじめに

制御機能を最適化し、マイクロコントローラのファームウェアを微調整することで、組込みシステム性能を大幅に改善できることがあります。ゲイン、オフセット、ディレイ、ヒステリシス、PWMのパラメータなどの最適値を見つけるのは時間のかかる作業ですが、適切なツールを使用することでこのプロセスを簡単に行えます。

計算やモデリングによって制御システムを最適化することもできますが、最新の設計ツールでは実際の測定をすばやく実行でき、設計において最適な設定を簡単に見つけられます。フラッシュ・メモリ、柔軟性の高い開発環境、最新のログ・メモリ、複数のポイントを同時に監視できるミックスド・シグナル・オシロスコープを組合せることにより、強力なソリューション・ツールキットが実現します。

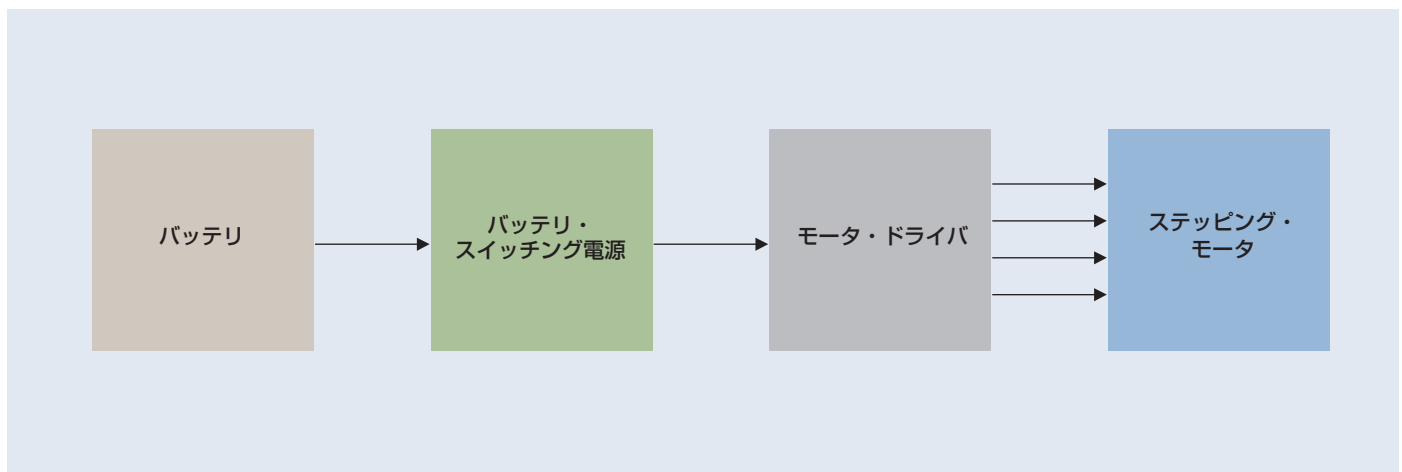


図1.1. モータ・ドライブ回路のブロック図

リアルタイムな制御アプリケーションでは、ファームウェア・アルゴリズム、アナログ・センサ、フィードバック・メカニズムの正確なやりとりが必要になります。従来からある4チャンネル・オシロスコープではチャンネル数が不足してしまい、設計を効率良く解析できません。ミックスド・シグナル・オシロスコープ、特にロング・メモリを装備したものを使用することで、センサ信号、フィードバック信号、ファームウェア・タイミングの効率的な解析が可能になります。

このアプリケーション・ノートでは、3種類のアプリケーションを紹介し、マイクロコントローラ・ベースのシステムをすばやく最適化するためのテクニックを説明します。

## アプリケーション1：スイッチング電源によるバッテリー駆動のステッピング・モータ制御

このアプリケーションでは、シングル・リチウム・セルで駆動する低電力ステッピング・モータを観測します。セル電圧は、ブースト・コンバータによって公称の2.5Vから6Vに昇圧されています。このアプリケーションでは、問題点が2つあります。一つは、バッテリーの平均電流を120mAに制限しなければならないことです。も

う一つは、ブースト・コンバータで昇圧された電圧は、大きな電流が引き出されると低下することです。ステッピング・モータによって引き出される平均電流は、モータ駆動回路のステップ間に遅延を持たせることで抑えられます。いくつかの静止電流も消費されます。これは、モータが回転する間に消費されるトータル・エネルギーは、モータがゆっくりと回るほど増加することを意味します。図1.1に、システムのブロック図を示します。

このアプリケーション例では、引き出される電流と静止電流を考慮しながら、バッテリー電流を安全レベルに抑える、最も効率的なモータ駆動回路の動作モードを求めます。また、バッテリーの残量がなくなりつつある場合のバッテリー電流を60mAに制限する、低電流モードを確認する必要があります。

この例では、MSO4000シリーズ・ミックスド・シグナル・オシロスコープのロング・メモリの利点を活用し、複数の動作状態におけるデータを同時に取込みます。カーソル機能を使用し、カーソルで囲まれた領域の特定の期間の電圧と電流を測定するように設定します。カーソル機能では、特定のイベント間の時間測定が可能です。

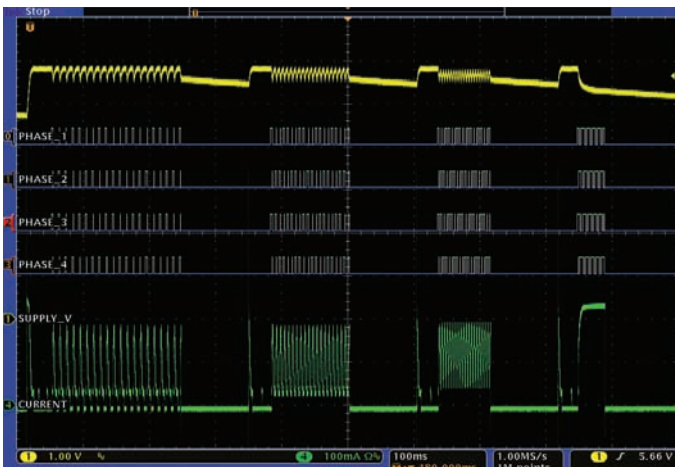


図1.2. モータ駆動ステップ間の遅延を4種類変化させて取込んだ例

図1.2は、モータ駆動ステップ間に異なった4種類の遅延を設定した場合の波形を示しています。右から、遅延なしの他に、2ms、4ms、8msの遅延でテストしており、さまざまな遅延条件を試しています。何種類かの設定から推定し、必要に応じてテストを繰り返せば最良の遅延値を見つけることができます。SUPPLY\_Vの黄色の波形は、電源電圧です。公称6Vですが、モータ負荷により低下します。CURRENTの緑色の波形は、バッテリー電流です。バッテリー電流の測定には、当社の電流プローブを使用し、バッテリーからバッテリー・スイッチング電源への電流を測定しています。ステップ・モータの4相ラインは、PHASE\_1からPHASE\_4までのデジタル波形で表示されています。低電圧モータのため、モータの電圧はオシロスコープのデジタル・ラインに直接接続できます。観測したモータ信号から、モータの各位相は正しく駆動されていることがわかります。アナログ信号で観測できることが望ましいのですが、ほとんどのオシロスコープのチャンネル数は4以下です。また、デジタル信号として表示できれば、モータ動作のタイミング情報が適切に表示できます。

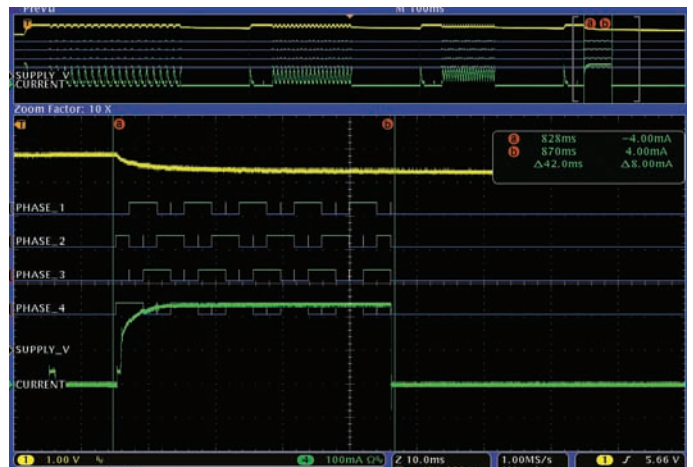


図1.3. ステップ間に遅延がない例

図1.2に示すように、波形の右に行くほどモータ動作の単位時間当たりの電流は大きくなっていきますが、電流の流れる時間は短くなっています。バッテリーで使用されるエネルギーはmA×msで表され、電流と時間の積になります。したがって、大きな電流で短時間バッテリーを使用するよりも、小さな電流で長時間バッテリーを使用の方が、より大きなバッテリー・エネルギーを消費することになります。この4種類の波形取込みから、平均電流と駆動時間を測定し、ベストな動作ポイントを決定します。当然のことながら、バッテリーの最大動作電流は、適切な遅延を決定するための重要な要素となります。

図1.3は、モータ駆動ステップに遅延がない状態（2ms幅のステップ・パルス2個が合体）のモータ動作をズーム表示しています。ズーム表示されている取込波形は、画面右上のカギカッコで囲まれた部分になります。トータル駆動時間約42msにおいて20ステップの駆動が行われ、その平均電流は224mA、トータル・エネルギーは9408mA×msになります。電圧は5.20Vに低下しており、モータの適正電圧以下になっています。バッテリーの平均電流は、目標である120mAを大きく超えています。



図1.4では、2ms幅の駆動ステップ間において2msの遅延が設定されています。平均電流はわずかに132mAですが、80ms続いているため、トータル・エネルギーは10,560mA×msとなります。消費されるエネルギーは大きいのですが、最大電流は小さくなります。モータ回転の終わりにおける電圧は5.48Vで、最初の遅延なしの場合に比べてかなり良くなっています。平均電流は望ましいレベルに近づいていますが、それでもまだ高い状態です。

図1.5では、2ms幅の駆動ステップ間の遅延が4msに伸びています。平均電流はわずかに93mAですが、120ms続いているため、トータル・エネルギーは11,160mA×msとなります。消費されるエネルギーは前の例よりも大きくなっていますが、最大電流は小さくなっています。モータ回転の終わりにおける電圧は、ステップ間の遅延が2msの図1.4の例と同じで、5.48Vとなっています。パルス間の遅延が2msの場合の電流は大きくなりましたが、4msの遅延では、バッテリーの平均電流の目標である120mAよりも大幅に下がっています。以上の結果から推定すると、遅延を3msにすることで、4msの遅延に比べてエネルギーは小さくなり、バッテリーの平均電流もわずかに目標を下回るので、最良の妥協点を見つけれられると考えられます。

ここでは、バッテリーをほぼ使い切り、60mAしか供給できない場合の遅延も決定する必要があります。図1.6では、ステップ間の遅延を8msにした場合の波形と測定結果を示しています。平均電流はわずかに57mAですが、200ms続いているため、トータル・エネルギーは11,400mA×msとなります。エネルギーは図1.5の場合に比べてわずかに大きくなっていますが、バッテリーの平均電流は60mAの目標をクリアしています。モータ回転の終わりにおける電圧は図1.5に比べて変化なく、許容範囲内です。

ここでは、オシロスコープのロング・メモリと測定機能により、複雑なステップング・モータと電圧レギュレータ・システムの最良の動作ポイントをすばやく見つけることができました。たった1回の波形取込みから、ズーム箇所においてカーソルを移動することでさまざまな動作状態を測定できました。カーソル間の波形パラメータを測定できるため、すばやく設計を決定することが可能になります。モータの位相駆動信号を取込むことにより、モータ駆動ステップ間の遅延時間と、モータの適切な動作確認ができます。



図1.4. 2msのステップ間遅延

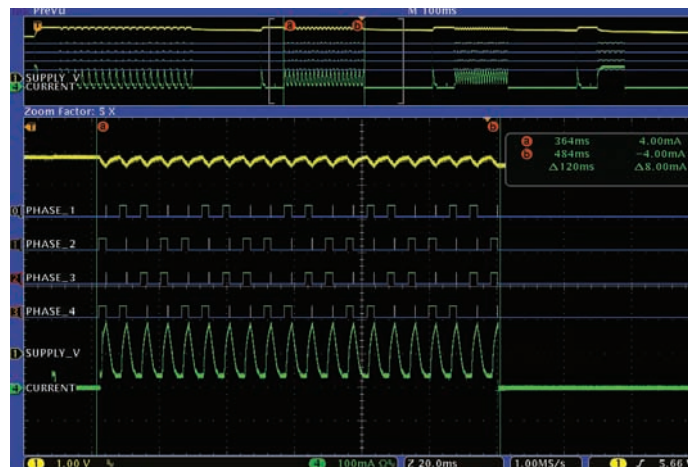


図1.5. 4msのステップ間遅延

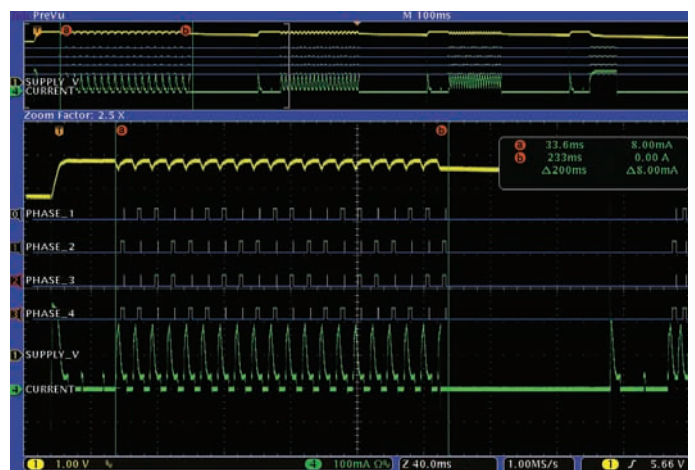


図1.6. 8msのステップ間遅延

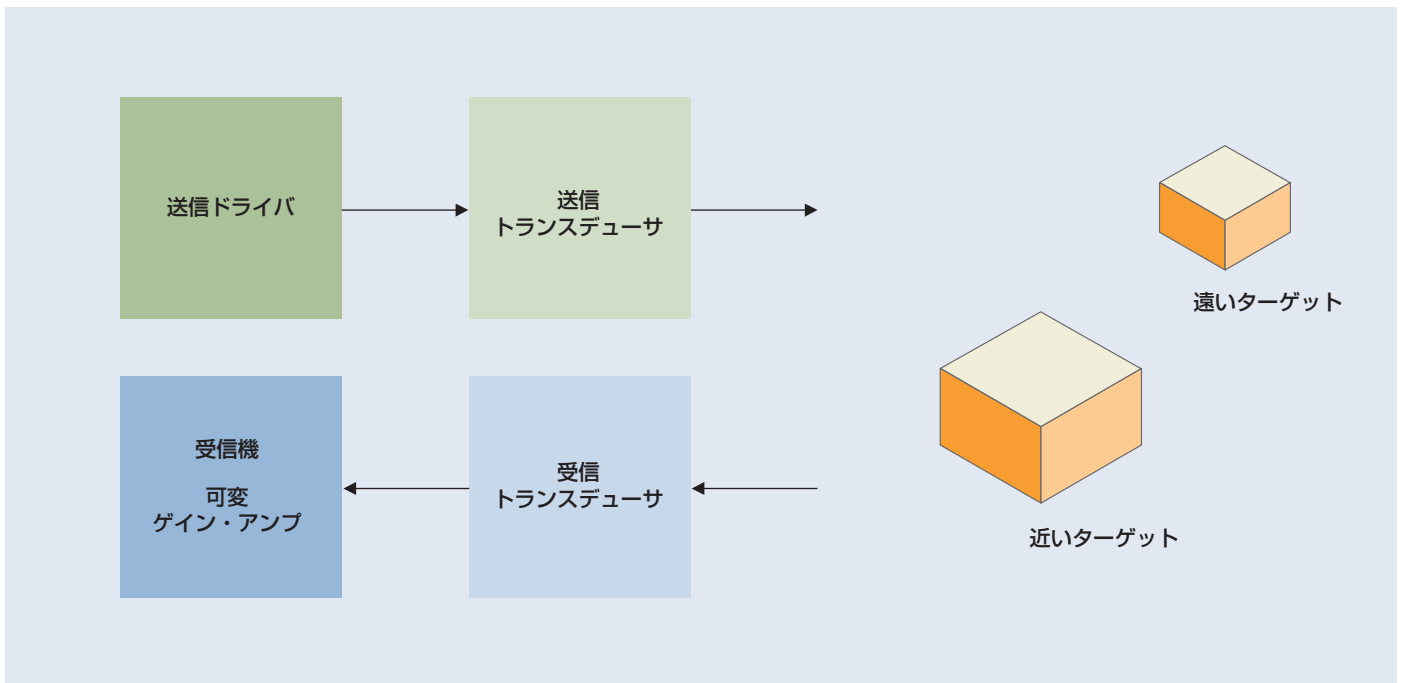


図2.1. 超音波距離測定器のブロック図

## アプリケーション2：超音波距離測定器

この例では、さまざまな物体までの距離を測定するときの、超音波距離測定器の動作を観測します。検出器から近い距離と遠い距離における、最適なゲイン設定を見つけることが課題となります。反射信号がクリッピングせず、できる限り大きく反射された場合、超音波距離測定器は最良の性能を発揮します。また、送信トランスデューサが正しい電圧、周波数でドライブされていることも確認しなければなりません。図2.1に、システムのブロック図を示します。

超音波受信トランスデューサに戻ったリターン信号の振幅は非常に小さいため、受信機は固定および可変ゲイン・アンプで構成されています。図2.2は、可変ゲイン・アンプのゲイン8の設定における性能を示しています。RECEIVERの黄色のアナログ波形は受信トランスデューサにより検出された信号で、送信トランスデューサからの大きなパルスと反射されたリターン信号から成ります。距離計測の処理のため、マイクロコントローラのA/Dコンバータに送られます。2つのターゲットからのリターン信号は、AとBでマーキングされ、スタートから約14msと24ms遅れて到着しています。音は1msで約34cm進み、音は送信機から受信機まで往復するため、ターゲットはそれぞれ約2m、4mの位置にあります。

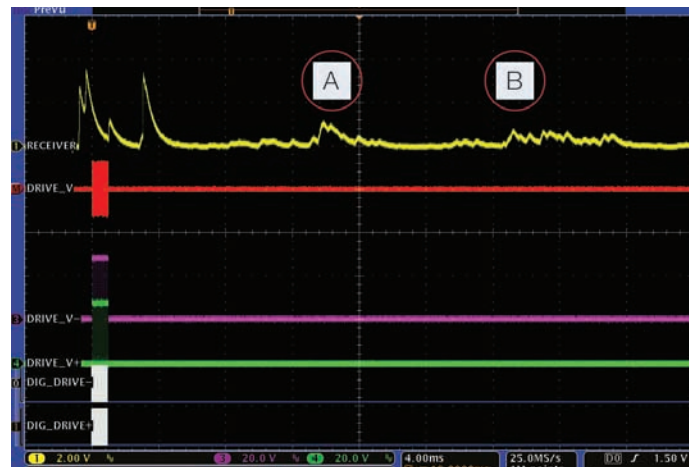


図2.2. ゲイン8の送受信信号

図2.2には、差動のドライブ信号も表示されています。DIG\_DRIVE-とDIG\_DRIVE+は、マイクロコントローラからのデジタル信号です。DRIVE\_V-とDRIVE\_V+は、送信トランスデューサへのアナログ電圧です。DRIVE\_Vは、電圧の差分です。

反射信号はRECEIVER波形で見ることができますが、振幅が非常に小さく、ゲイン設定が適切ではないように思われます。波形の最初の部分にある大きなパルスは、送信トランスデューサから受信トランスデューサまでの機械的なカップリングが原因です。スタートから4ms (60cm) 程度経過した後の距離を測っていますので、この初期の大きなパルスは無視しなければなりません。

送信トランスデューサへのドライブ信号が正しいことを確認することも必要です。ドライブ信号は、40kHz程度で1ms程度が必要です。この値は、図2.2の波形をズーム表示することで確認できます。図2.3には、ズーム表示されたドライブ信号とアナログ信号が表示されています。この表示から、1msのパルス列と正しい周波数が確認できます。デジタル・ドライブ波形とその結果のアナログ電圧波形は、差動信号になっています。差分電圧ドライブ (DRIVE\_V) 信号は、期待通り60Vのピーク・トゥ・ピーク電圧になっています。

図2.4では、可変ゲイン・アンプのゲインが2倍の16になっています。高いゲイン設定により、信号 (RECEIVER) も大きくなっています。反射信号は図2.2の場合よりも大きくなっていますが、クリッピング・レベルである約5Vを十分に下回っています。



図2.3. ズーム表示された送信信号

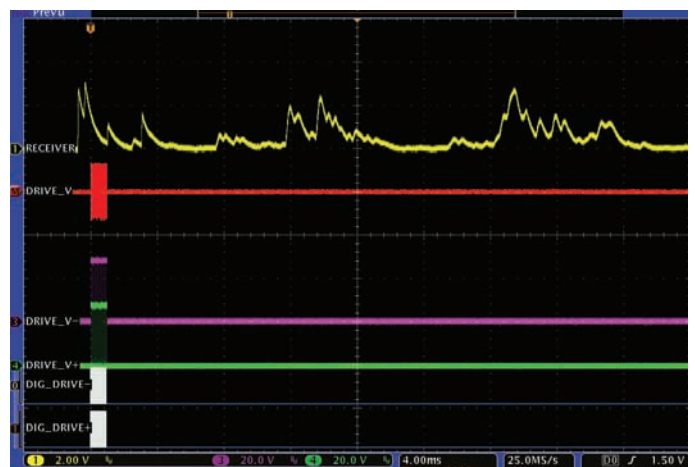


図2.4. ゲイン16の送受信信号



図2.5. ゲイン32の送受信信号

図2.5では、ゲインをさらに2倍にして32としています。ここで、近いターゲットからの信号はアンプで飽和し始めており、クリッピングしています。一方、遠いターゲットからの信号はアンプのフル・レンジである5Vに近づいていますが、クリッピングは発生していません。

図2.6では、さらにゲインを大きくして64にしています。このゲイン設定では、近いターゲット、遠いターゲットの両方の信号がアンプでクリッピングを起こしており、距離測定の精度が低下します。明らかに、このゲイン設定では高過ぎます。さらに、複数の外部からの反射が現れ、距離測定がますます難しくなっています。



図2.6. ゲイン64の送受信信号

この例では、オシロスコープのロング・メモリを使用し、超音波距離測定システムの受信信号を解析して、ドライブ信号の適正なゲイン設定を決定しました。測定された信号ができる限り大きく、わずかなクリッピングで済むことから、このシステムの最適なゲインは32と考えることができます。固定ゲインのアンプを微調整することでわずかに小さなゲインが得られ、クリッピングすることなく、利用可能な最も大きな信号を得ることができました。また、ドライブ信号はクリアで、正しいタイミング、周波数、位相であることも確認することができました。



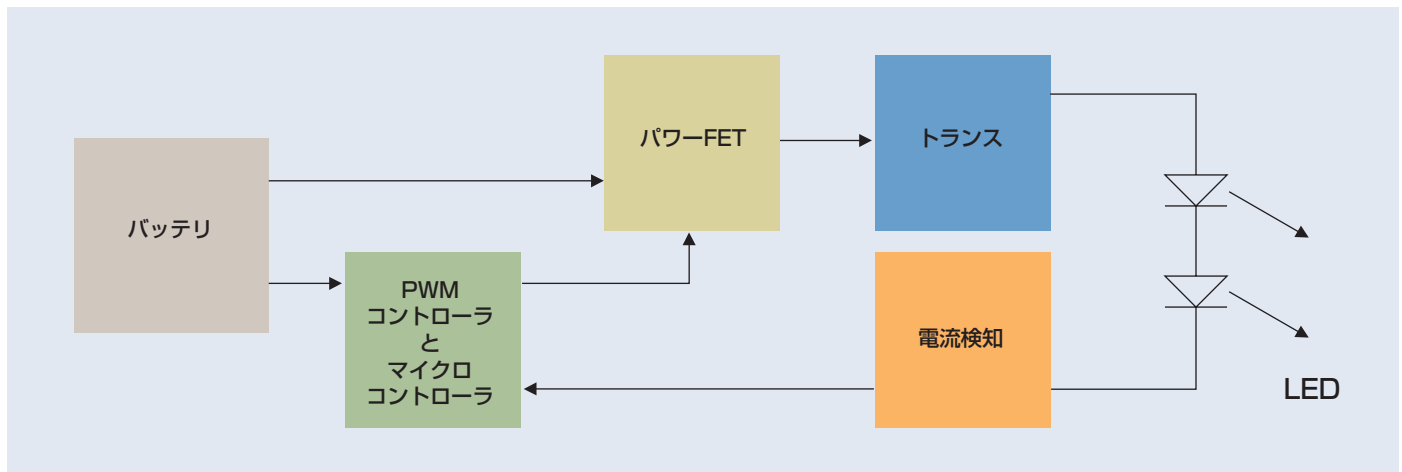


図3.1. LEDパワー・システムのブロック図

### アプリケーション3：高輝度LEDパワー・システム

この例では、高輝度LEDを駆動する電源回路の動作を観測します。この例で難しいのは、LEDの通常の動作で温度が上昇した場合でも、バッテリー電圧が低下するなどしてLEDのインピーダンスが徐々に変化した場合でも、ドライブ電流が安定していることを確認することです。ドライブ電流は、標準のマイクロコントローラによるPWM（パルス幅変調）制御がベースとなっています。LEDの電流は、マイクロコントローラ内部の8ビットA/Dコンバータを使用して測定されます。マイクロコントローラは、プリセットされた電流を維持するように、PWM波形のデューティ・サイクルを徐々に調整します。電流は、パルス幅の不連続な増減でしか調整できないため、デューティ・サイクルが増と減を交互に繰り返すと、LEDに明らかなちらつきが発生するおそれがあります。このため、制御ループにヒステリシスを持たせて、ちらつきを感じさせなくする必要があります。図3.1に、システムのブロック図を示します。

電源は、乾電池または充電式のバッテリーです。バッテリーは、マイクロコントローラと、LEDへの電流を制御するパワーFETへ電源を供給します。マイクロコントローラは、パワーFETのデューティ・サイクルを制御するようにプログラムされています。バッテリーの充電状態およびLEDの温度によっては、バッテリー電圧がLEDの電圧を下回ることがあるため、トランスが使用されます。図3.2において、LED<sub>I</sub>の緑色の波形は、電流プローブを使用して測定したLED電流です。UPDATEのデジタル波形は、マイクロコントローラのソフトウェアに一時的に付けられたマーカであり、マイクロコントローラがパワーFETのデューティ・サイクルをアップデートしたことを示します。CUR@MICROの紫色の波形は、フィルタされ、増幅されたLEDの電流波形であり、この電流はマイクロコントローラのA/Dコンバータに送られ、プログラムされた電流値と比較してパルス幅を調整します。LED<sub>V</sub>の黄色の波形は、LEDの電圧です。DRAIN<sub>V</sub>の青色の波形は、パワーFETのドレイン（スイッチング・ターミナル）電圧であり、LEDに電源を供給するトランスをドライブします。DRIVEのデジタル信号は、パワーFETのゲートをドライブする信号です。



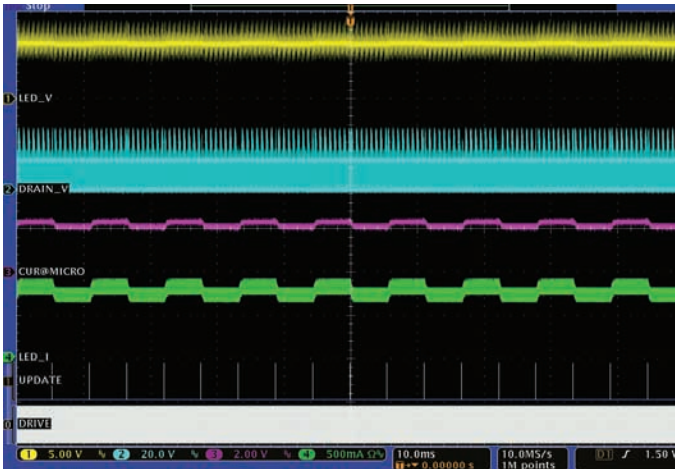


図3.2. 電流ヒステリシス値1によるLEDの動作

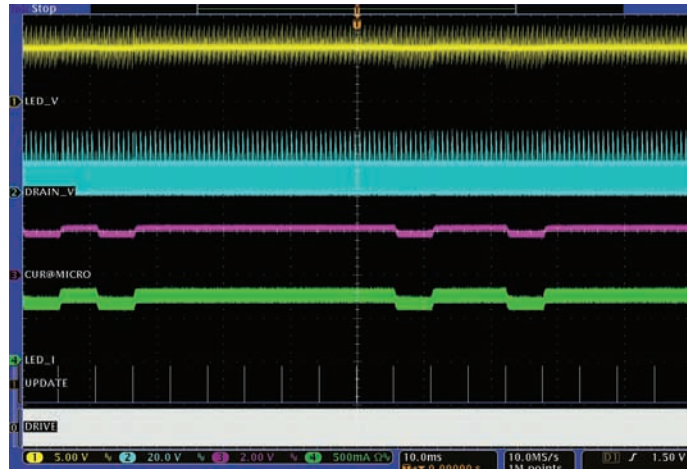


図3.4. 電流ヒステリシス値4によるLEDの動作

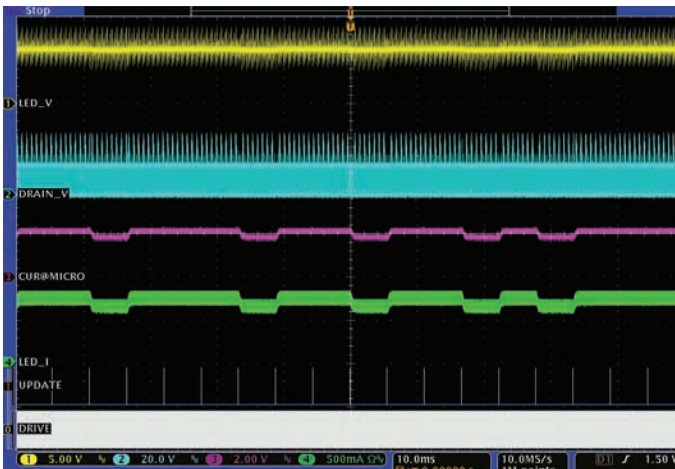


図3.3. 電流ヒステリシス値2によるLEDの動作

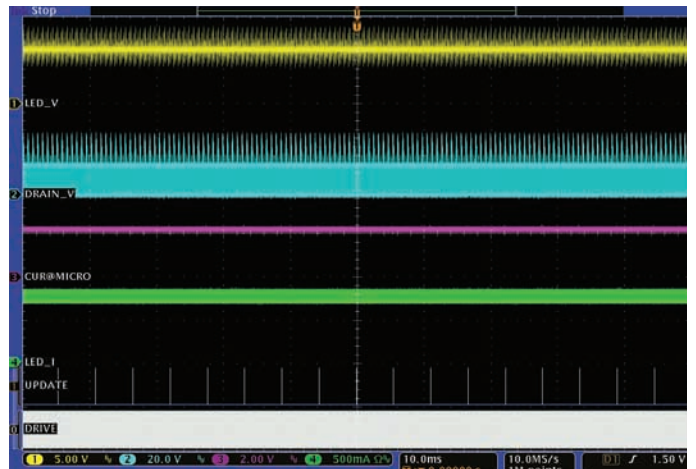


図3.5. 電流ヒステリシス値8によるLEDの動作

図3.2では、制御ループのヒステリシスの値は1に設定されており、測定された電流信号が1ビット変更しただけでも、パワー・ドライブ信号のパルス幅に変化が現れます。この図からもわかるように、マーカで記されているポイントで、マイクロコントローラのソフトウェアによって測定電流とターゲットの値は比較され、そのたびごとにパルス幅すなわち電流は変化します。この結果は、緑色のLED\_I上のリップル電流として表示されます。

図3.3では、ヒステリシスの値は2に変更されています。LED\_I電流にリップルはありますが小さいものであり、図3.2と比べると良い設定であると言えます。

図3.4では、ヒステリシスの値は4に変更されています。図3.3と比べるとLED\_I電流のリップルはさらに小さくなっており、無視できる程度になっています。

最後に、図3.5ではヒステリシスの値は8に変更されています。LED\_I波形にリップルは認められません。したがって、これが最良の設定と言えます。



図3.6. 電流ヒステリシス値8によるLEDの動作のズーム表示

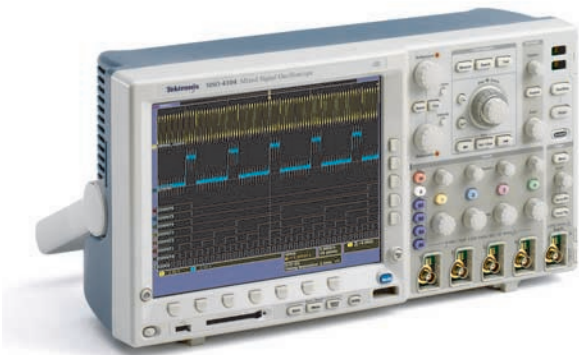
図3.6は、図3.5の波形をズーム表示したもので、電源のスイッチング周波数におけるPWMドライブの様子と波形の詳細を示しています。100msにおよぶ長い時間フレームで電源の安定性を解析できる一方で、同じ取込波形をズームすることにより、波形の詳細を観測することもできます。ドレイン電圧 (DRAIN\_V) と測定電流 (LED\_I) から、きれいな電源スイッチングが確認できます。

この例では、ミックスド・シグナル・オシロスコープのアナログ、デジタル機能を使用して、電源の詳細な動作を解析しました。デジタル入力により、非常に幅の狭いマーカをくっきりと表示できます。この時間スケールでは、アナログ波形ではマーカの幅が細過ぎて表示することができません。電子回路システムの性能を調べる上で、マーカの使用は非常に有効なテクニックと言えます。測定を繰り返すことにより、LED電源の安定動作のための最良の制御ループ・ヒステリシスを見つけることができました。また、オシロスコープのロング・メモリにより、1回の波形取込みで電源回路動作の詳細まで観測することができます。

## まとめ

さまざまな測定テクニックを使用し、マイクロコントローラ・ベースの組込みシステムにおける制御パラメータの最適化について説明しました。最適なツールを使用することで、ゲイン、オフセット、ディレイなどの最適値がすばやく、簡単に設定でき、組込みシステムの性能を大幅に向上できます。

ミックスド・シグナル・オシロスコープ、特にロング・メモリを装備したものを使用することで、センサ信号、フィードバック信号、ファームウェア・タイミングを効率的に解析することが可能になります。MSO4000シリーズには、強力なオシロスコープ機能と基本的なロジック・アナライザの機能が装備されており、1台でアナログ信号とデジタル信号を観測することができます。使いやすいオシロスコープ操作、大型ディスプレイ、革新的で使いやすい機能など、作業を簡素化するための設計が施されています。業界トップクラスの性能に加え、組込み設計のためのオールインワン・デバッグ・ツールを実現しています。



## マーカを使用した ファームウェア・タイミングの観測

マイクロコントローラ・ベースの組込みシステムのファームウェアの動作を観測することは難しいものです。リアルタイム制御システムでは、回路とマイクロコントローラの動作は通常動作と同じスピードで監視する必要があります。マイクロプロセッサが外部のプログラム・メモリを使用する場合は、ロジック・アナライザを使用してプログラムの実行をトラッキングし、タイミングを測定します。しかし、ワンチップ・プログラム・メモリを使用している場合は、この方法では測定できません。今日、ほとんどのマイクロコントローラはインサーキット・デバッガでサポートされていますが、このツールには一般的に限られたブレーク・ポイントしかなく、リアルタイム・トレース機能がある場合でも制約があります。

マイクロコントローラのソフトウェアの様子を知るテクニックの一つに、プログラム実行時に特定のポイントにおいてI/Oポート・ピンをトグルする方法があります。まったく使用されていないI/Oポート・ピン、またはデバッグされるコードにおいては使用されないポート・ピンがあるものです。デバッグのために余分なポート・ピンを持ったマイクロコントローラを選ぶことは、それほどのコスト・アップにはなりません。ポート・ピンはさまざまなパターンでトグルすることができ、コードの特定の位置を示すことができます。例えば、1、2、3または4つの連続したパルス、パルス幅の異なるパルスなどでコード内のさまざまな位置にマークすることができます。2chまたは4chのオシロスコープでは、この方法は限られた使い方しかできず、MSOではないオシロスコープでは多数の信号を監視して、デバッグや動作確認することができないことがあります。当社のMSO4000シリーズ・ミックスド・シグナル・オシロスコープは、組込み設計のための優れたオールインワン・デジタル・デバッグ・ツールです。

**Tektronix お問い合わせ先：**

**日本**

**本社** 03-6714-3111

SA営業統括部 03-6714-3004

ビデオ計測営業部 03-6714-3005

**大宮営業所** 048-646-0711

**仙台オフィス** 022-792-2011

**神奈川営業所** 045-473-9871

**東京営業所** 042-573-2111

**名古屋営業所** 052-581-3547

**大阪営業所** 06-6397-6531

**京都オフィス** 075-323-9048

**福岡営業所** 092-472-2626

**湘南カスタム・サービス・センタ** 0120-7-41046

**地域拠点**

**米国** 1-800-426-2200

**中南米** 52-55-542-4700

**東南アジア諸国/豪州** 65-6356-3900

**中華人民共和国** 86-10-6235-1230

**インド** 91-80-2227-5577

**欧州** 44-0-1344-392-400

**中近東/北アフリカ** 41-52-675-3777

他30カ国

Updated 17 October 2007

詳細について

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、資料を用意しています。当社ホームページ([www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp))または[www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)をご参照ください。



TEKTRONIXおよびTEKは、Tektronix, Inc.の登録商標です。記載された商品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

01/08 DM

54Z-21286-0

**Tektronix®**

Enabling Innovation

## 日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階 〒108-6106  
製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

**TEL 03-6714-3010 E-mail [ccc.jp@tektronix.com](mailto:ccc.jp@tektronix.com)**

電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00 月曜~金曜(休祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 [www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)  
製品のFAQもご覧ください。 [www.tektronix.co.jp/faq/](http://www.tektronix.co.jp/faq/)

●記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

© Tektronix