

## Analog Engineer's Circuit

## MSP430™ スマートアナログコンボを使用した単一電源、ローサイド、単方向電流センシング回路



Matthew Calvo

## 設計目標

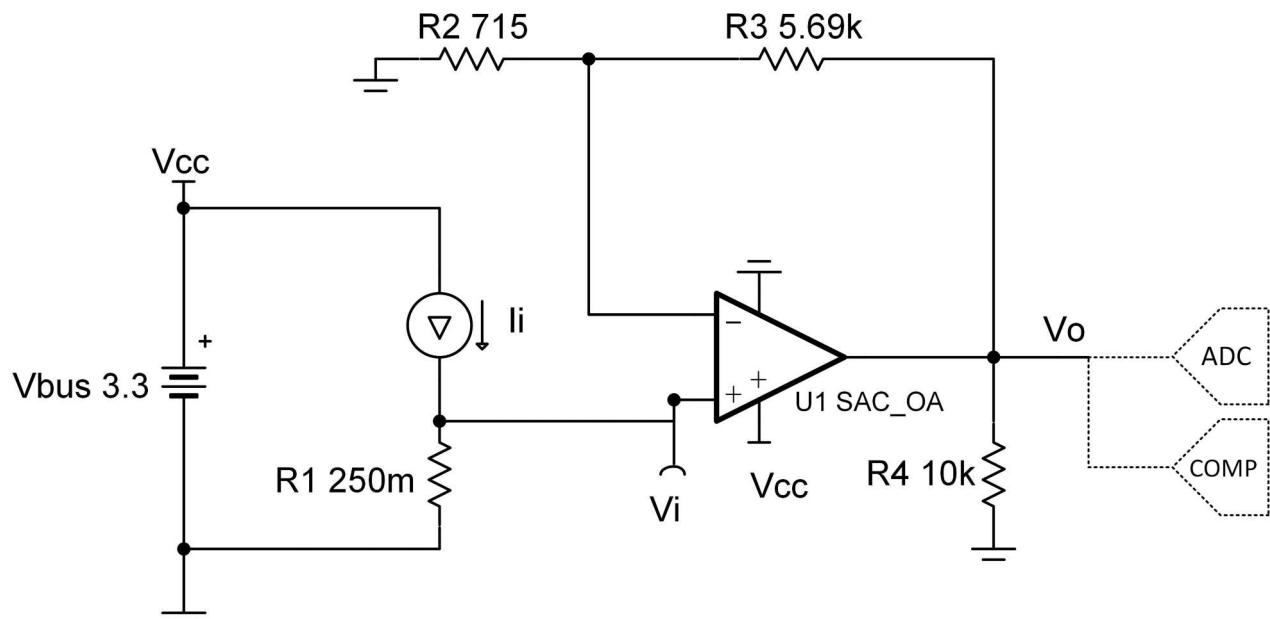
入力		出力		電源		フルスケールレンジ誤差
$I_{iMax}$	$V_{iMax}$	$V_{oMin}$	$V_{oMax}$	$V_{cc}$	$V_{ee}$	$FSR_{Error}$
1A	250 mV	100 mV	2.25 V	3.3 V	0 V	2.09%

## 設計の説明

一部の MSP430™ マイコン (MCU) は、オペアンプ、DAC、プログラマブル ゲイン段など、構成可能な統合型信号チェーン要素を内蔵しています。これらの要素は、スマートアナログコンボ (SAC) というペリフェラルを形成しています。さまざまな種類の SAC の詳細や、構成可能アナログシグナルチェーン機能を活用する方法については、ビデオ『[MSP430 マイコンのスマートアナログコンボのトレーシング](#)』をご覧ください。設計を開始するには、[単一電源、ローサイド、単方向電流センシング回路の設計ファイル](#)をダウンロードしてください。

この単一電源、ローサイドの電流センシングソリューションは、最大 1A の負荷電流を正確に検出し、100mV~2.25V の電圧に変換します。この回路は、[MSP430FR2311](#) のオペアンプを非反転アンプ構成で使用しています。

[MSP430FR2355](#) のペリフェラル内にあるプログラマブルゲインステージブロックを使用して、帰還抵抗ラダー (R2 と R3) をマイコンに統合することができるので、さらに統合を進める余地があります。入力電流範囲と出力電圧範囲は必要に応じてスケールリングでき、大きなスイングに対応するため、より高電圧の電源も使用できます。2 段目のオペアンプの出力を、オンボード ADC を使用して直接サンプリングすること、またはオンボードコンパレータを使用して監視したうえでマイコン内部でさらに処理を進めることもできます。



## デザインノート

- オペアンプの線形出力動作範囲内で使用してください。この範囲は通常、テスト条件に規定されています。
- 同相電圧は入力電圧と同じです。
- シャント抵抗と帰還抵抗の公差により、回路のゲイン誤差が決定されます。
- 安定性の問題を最小限に抑えるため、アンプの出力に容量性の負荷を直接配置することは避けてください。
- 値の大きい抵抗を使用すると、回路の位相マージンが劣化し、回路に追加のノイズが発生することがあります。
- この回路の小信号帯域幅は、回路のゲインと、アンプのゲイン帯域幅積 (GBP) で決まります。
- $R_3$  と並列にコンデンサを追加すると、フィルタ処理を実現できます。また、 $R_3$  と並列にコンデンサを追加することで、値の大きい抵抗を使用したときの回路の安定性も向上します。
- MSP430FR2355 の SAC\_L3 を使ってソリューションを実装する場合、電流検出回路を測定するために、外付け受動部品 ( $R_2$  および  $R_3$ ) を使って非反転プログラマブル ゲイン アンプ モードまたは汎用モードにオペアンプを構成できます。
- MSP430FR2311 を使ってソリューションを実装する場合、電流検出回路を測定するために、SAC\_L1 オペアンプまたはトランスインピーダンス アンプ (TIA) を使ってオペアンプを構成できます。
- 電流検出 AFE の出力をより正確に測定するため、2.5V の VREF を使って ADC をスケーリングするために MSP430FR2355 の拡張リファレンス モジュールを使えます。
- [単一電源、ローサイド単方向電流センシングの設計ファイル](#)には、SAC ペリフェラルを適切に初期化する方法を示したサンプル コードが含まれます。

## 設計手順

この回路の伝達関数を次に示します。

$$V_o = I_i \times R_1 \times \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)$$

1. フルスケール シャント電圧を定義し、最大シャント抵抗を計算します。

$$V_{iMax} = 250 \text{ mV} \quad \text{at} \quad I_{iMax} = 1 \text{ A}$$

$$R_1 = \frac{V_{iMax}}{I_{iMax}} = \frac{250 \text{ mV}}{1 \text{ A}} = 250 \text{ m}\Omega$$

2. 最大線形出力電圧に必要なゲインを計算します。

$$V_{iMax} = 250 \text{ mV} \quad \text{and} \quad V_{oMax} = 2.25 \text{ V}$$

$$\text{Gain} = \frac{V_{oMax}}{V_{iMax}} = \frac{2.25 \text{ V}}{250 \text{ mV}} = 9 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

3.  $R_2$  と  $R_3$  の標準抵抗値を選択します。

$R_2 = 715\Omega$  (0.1% 標準抵抗値) とします。

$$\text{Gain} = 9 \frac{\text{V}}{\text{V}} = 1 + \frac{R_3}{R_2}$$

$$R_3 = \left(9 \frac{\text{V}}{\text{V}} - 1\right) \times R_2 = 8 \times 715\Omega = 5.72 \text{ k}\Omega$$

$R_3 = 5.69 \text{ k}\Omega$  (0.1% 標準抵抗値) を選択します。

### 注

帰還抵抗ラダー ( $R_2$  と  $R_3$ ) は、SAC\_L3 の内蔵プログラマブル ゲイン抵抗ラダー (9x の非反転ゲインを設定済み) を使って実現できます。この実装を、[MSP430FR2355 のサンプル コード](#)に示します。SAC オペアンプを汎用モードで使う場合、外部抵抗を使って帰還抵抗ラダーを構成します。

4. 出力のスイングツーレール制限に達する前の最小入力電流を計算します。I<sub>iMin</sub> は、正確に検出可能な最小入力電流を表します。

$$V_{oMin} = 100 \text{ mV}; R_1 = 250 \text{ m}\Omega$$

$$V_{iMin} = \frac{V_{oMin}}{\text{Gain}} = \frac{100 \text{ mV}}{9 \frac{\text{V}}{\text{V}}} = 11.1 \text{ mV}$$

$$I_{iMin} = \frac{V_{iMin}}{R_1} = \frac{11.1 \text{ mV}}{250 \text{ m}\Omega} = 44.4 \text{ mA}$$

5. フルスケール範囲誤差と相対誤差を計算します。V<sub>os</sub> は、データシートに記載されている標準のオフセット電圧です。

$$\text{FSRerror} = \left( \frac{V_{os}}{V_{iMax} - V_{iMin}} \right) \times 100 = \left( \frac{5 \text{ mV}}{238.9 \text{ mV}} \right) \times 100 = 2.09 \%$$

$$\text{Relative Error at } I_{iMax} = \left( \frac{V_{os}}{V_{iMax}} \right) \times 100 = \left( \frac{5 \text{ mV}}{250 \text{ mV}} \right) \times 100 = 2 \%$$

$$\text{Relative Error at } I_{iMin} = \left( \frac{V_{os}}{V_{iMin}} \right) \times 100 = \left( \frac{5 \text{ mV}}{11.1 \text{ mV}} \right) \times 100 = 45 \%$$

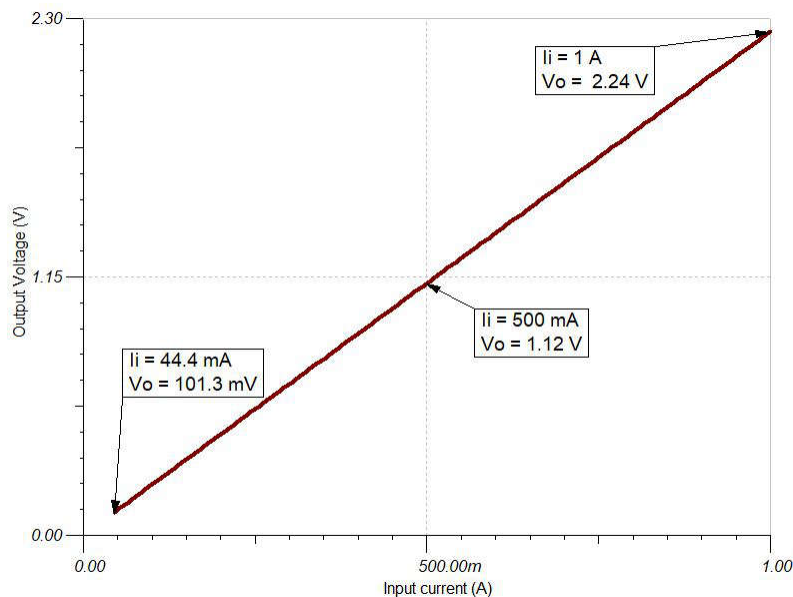
6. 十分な位相マージンを維持するため、ゲイン設定抵抗とデバイスの入力容量によって生じるゼロが、回路の帯域幅より大きいことを確認します。

$$\frac{1}{2 \times \pi \times (C_{cm} + C_{diff}) \times (R_2 || R_3)} > \frac{\text{GBP}}{G}$$

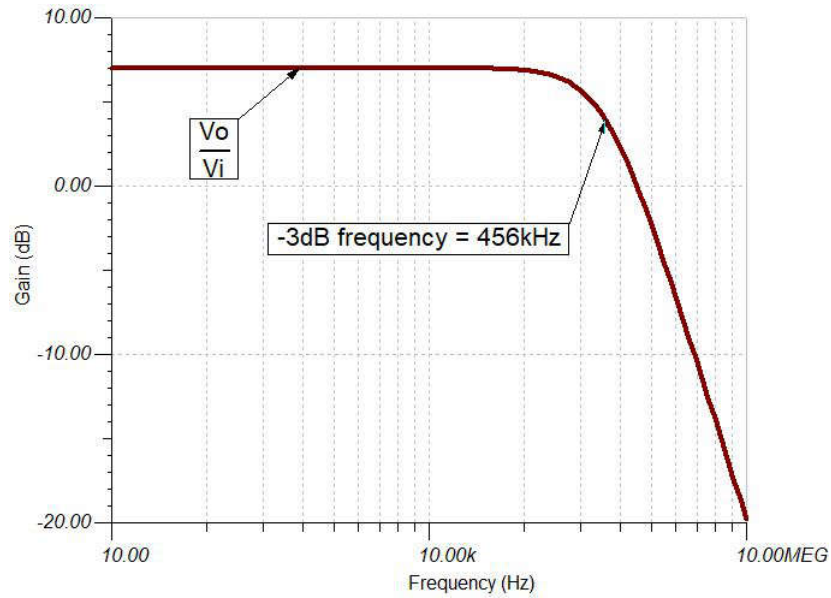
$$\frac{1}{2 \times \pi \times (3\text{pF} + 3\text{pF}) \times \left( \frac{715 \Omega \times 5.69 \text{ k}\Omega}{715 \Omega + 5.69 \text{ k}\Omega} \right)} > \frac{4 \text{ MHz}}{9 \frac{\text{V}}{\text{V}}} = 41.76 \text{ MHz} > 444.4 \text{ kHz}$$

## 設計シミュレーション

### DC シミュレーション結果



## AC シミュレーション結果



### ターゲット アプリケーション

- コードレス電動工具のバッテリーパック
- HEV/EV のバッテリー管理システム (BMS)
- モータードライブ
- 照明器具
- エネルギー インフラ

### 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、[MSP430 単一電源、ローサイド単方向電流センシング回路](#)、サンプルコードと SPICE シミュレーション ファイル
2. テキサス・インスツルメンツ、[3.75KB FRAM、オペアンプ、TIA \(トランスインピーダンス アンプ\)、DAC 付きコンパレータ、10 ビット ADC 搭載、16MHz アナログ内蔵マイコン製品ページ](#)
3. テキサス・インスツルメンツ、[『MSP430 MCU スマート アナログ コンボ』](#)、ビデオ



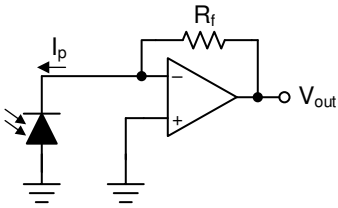
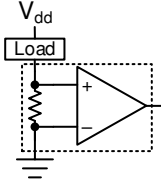
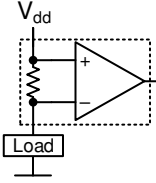
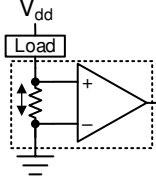

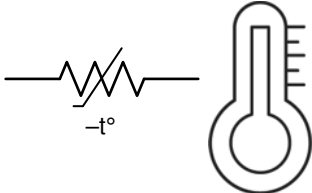
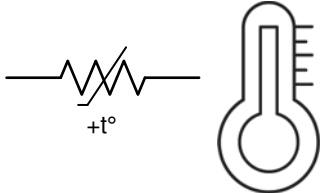
## 設計に使用されているオペアンプ

MSP430FRxx スマート アナログ コンボ		
	MSP430FR2311 SAC_L1	MSP430FR2355 SAC_L3
$V_{CC}$	2.0V~3.6V	
$V_{CM}$	-0.1V~ $V_{CC} + 0.1V$	
$V_{out}$	レール ツー レール	
$V_{os}$	±5mV	
$A_{OL}$	100 dB	
$I_q$	350µA (高速モード)	
	120µA (低消費電力モード)	
$I_b$	50pA	
UGBW	4MHz (高速モード)	2.8MHz (高速モード)
	1.4MHz (低消費電力モード)	1MHz (低消費電力モード)
SR	3V/µs (高速モード)	
	1V/µs (低消費電力モード)	
チャンネル数	1	4
<a href="#">MSP430FR2311</a>		
<a href="#">MSP430FR2355</a>		

## 設計の代替オペアンプ

MSP430FR2311 トランスインピーダンス アンプ	
$V_{CC}$	2.0V~3.6V
$V_{CM}$	-0.1V~ $V_{CC}/2V$
$V_{out}$	レール ツー レール
$V_{os}$	±5mV
$A_{OL}$	100 dB
$I_q$	350µA (高速モード)
	120µA (低消費電力モード)
$I_b$	5pA (TSSOP-16, OA 専用ピン入力付き)
	50pA (TSSOP-20 および VQFN-16)
UGBW	5MHz (高速モード)
	1.8MHz (低消費電力モード)
SR	4V/µs (高速モード)
	1V/µs (低消費電力モード)
チャンネル数	1
<a href="#">MSP430FR2311</a>	

## 関連 MSP430 回路

<p>低ノイズ、長距離の PIR センサ コンディショナー回路</p> 	<p>ブリッジ アンプ回路</p> 	<p>トランスインピーダンス アンプ回路</p> 
<p>単一電源、ローサイド、単方向電流センシング回路</p> 	<p>ディスクリート差動アンプ回路搭載ハイサイド電流センシング</p> 	<p>ローサイド双方向電流センシング回路</p> 
<p>半波整流回路</p> 	<p>NTC サーミスタ回路搭載温度センシング</p> 	<p>PTC サーミスタ回路搭載温度センシング</p> 

## 商標

MSP430™ is a trademark of Texas Instruments.  
すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 改訂履歴

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

### Changes from Revision A (March 2020) to Revision B (October 2024) Page

- 文書全体にわたって表、図、相互参照の書式を更新..... 1

### Changes from Revision \* (December 2019) to Revision A (March 2020) Page

- 「関連する MSP430 回路」セクションを追加 ..... 1

## 重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

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

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated