

**Circuits from the Lab™**  
Reference Circuits  
実用回路集

Circuits from the Lab™ 実用回路は今日のアナログ・ミックスド・シグナル、RF回路の設計上の課題の解決に役立つ迅速で容易なシステム統合を行うために作製、テストされました。詳しい情報と支援は [www.analog.com/jp/CN0288](http://www.analog.com/jp/CN0288) をご覧ください。

### 接続/参考にしたデバイス

|        |  |
|--------|--|
| AD598  | LVDT シグナル・コンディショナ  |
| AD8615 | 20MHz、CMOS レール to レール入出力高精度オペアンプ                             |
| AD7992 | 12ビット A/D コンバータ、10ピン MSOP パッケージ、I2C コンパチブル・インターフェース付き、2チャンネル |

## LVDT シグナル・コンディショニング回路

### 評価および設計サポート

#### 回路評価ボード

[CN-0288 回路評価ボード \(EVAL-CN0288-SDPZ\)](#)

[システム・デモンストレーション・プラットフォーム \(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 設計と統合ファイル

[回路図](#)、[レイアウト・ファイル](#)、[部品表](#)

### 回路の機能とその利点

図1に示す回路は、無調整のリニア可変差動トランス (LVDT) シグナル・コンディショニング回路です。この回路は直線的な変位 (位置) を高精度に測定することができます。

LVDTは、磁気コアが摩擦なしに動くことが可能でチューブ内部に接触することがないので、信頼性の高いセンサーです。このため、LVDTは、飛行制御帰還システム、サーボ機構の位置帰還、工作機械の自動計測など、長期的な信頼性が重要な多くの工業分野や科学分野の電気機械的なアプリケーションに適しています。

この回路は、サイン波発振器とパワー・アンプを内蔵して LVDT の 1 次側を駆動する励起信号を発生する LVDT シグナル・コンディショナ [AD598](#) を採用しています。また、AD598 は 2 次側出力を DC 電圧に変換します。レール to レール・アンプ [AD8615](#) は AD598 の出力をバッファし、低消費電力の 12 ビット逐次比較 A/D コンバータ (ADC) を駆動します。このシステムは 82dB のダイナミック・レンジと 250Hz のシステム帯域幅を有しているため、高精度の工業用位置測定アプリケーションに最適です。

システムのシグナル・コンディショニング回路は消費電流が±15V 電源から 15mA、+5V 電源から 3mA とわずかなので、リモート・アプリケーションに最適です。この回路は最大 300 フィート離れた所からリモート LVDT を動作させることが可能で、出力は最大 1000 フィートを駆動できます。

この回路ノートでは、ノイズ解析や部品選択に関する検討を含め、選択された帯域幅に対して図1の回路を最適化するのに用いる LVDT の基本動作原理およびデザイン・ステップを解説します。

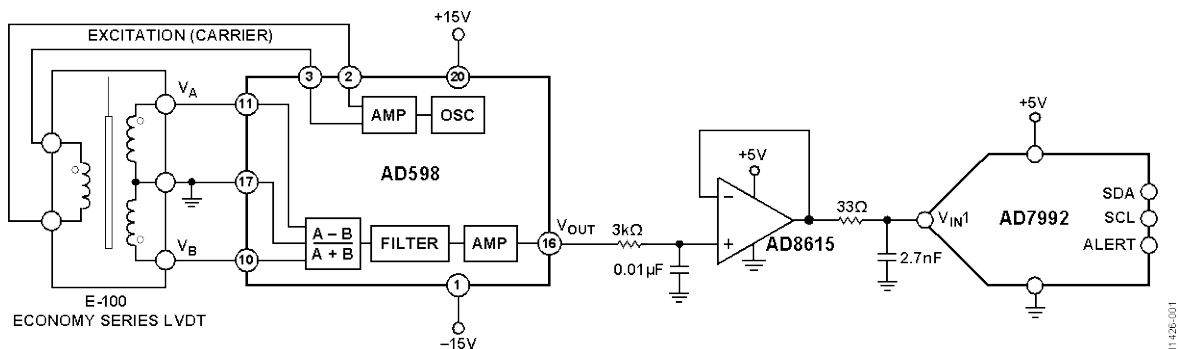


図1. LVDT シグナル・コンディショニング回路 (簡略回路図: 全ての接続およびデカップリングは示されていません。)

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本誌記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. A

**アナログ・デバイセズ株式会社**

本社 / 〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル  
電話 03 (5402) 8200  
大阪営業所 / 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー  
電話 06 (6350) 6868

## 回路説明

### 動作原理

LVDTは絶対変位トランスジューサで、機械的な基準（つまりゼロ）からの直線的な変位（位置）を、位相情報（方向）と振幅情報（距離）を含む比例電気信号に変換します。LVDTの動作では可動部品（プローブ、つまりコア・ロッドのアセンブリ）とトランスの間に電氣的接触を必要としません。その代り、電磁結合に依存します。この理由と電子回路を内蔵せずに動作するという理由で、LVDTは、軍用や航空宇宙のアプリケーションなど、過酷な環境で長寿命と高信頼性が要求されるアプリケーションにおいて幅広く用いられています。

この回路では、Measurement Specialties™のE-100エコノミー・シリーズLVDTセンサーをAD598とともに使用しました。全温度範囲で直線性が $\pm 0.5\%$ のEシリーズは、適度な動作温度環境にある大部分のアプリケーションに適しています。

AD598はフル機能のLVDTシグナル・コンディショニング・サブシステムです。このデバイスは、LVDTのトランスジューサの機械的な位置を高精度で再現性の高いユニポーラDC電圧に変換します。全ての回路機能が、チップ上に含まれています。周波数とゲインを設定するために若干の外付け受動部品を加えることで、AD598は、生のLVDTの2次側出力をスケールされたDC信号に変換します。

AD598は、LVDTの1次側を駆動するための低歪みサイン波発振器を内蔵しています。サイン波の周波数は1個のコンデンサによって決まり、2V rms～20V rmsの振幅で20Hz～20kHzの範囲が可能です。

LVDTの2次側出力はAD598を直接駆動する2つのサイン波から成ります。AD598はこの2つの信号に基づいて動作し、これらの差をこれらの和で割り、スケールされたユニポーラDC出力を生成します。従来のLVDTコンディショナはこの振幅差を同期検出し、この絶対値を位置に比例する電圧に変換します。この手法は、1次側の励起電圧を出力電圧の極性を決めるための位相基準として使用しています。この手法に関しては以下のようないくつかの課題があります。

- 振幅と周波数が一定の励起信号を発生すること
- LVDTの1次側から2次側への位相シフトを補償すること
- これらのシフトを温度と周波数に応じて補償すること

AD598ではこれらの課題を全て解決しています。AD598はLVDTの出力信号の差と和の比に基づいて動作するため、振幅を一定にする必要がありません。入力が整流され、サイン波キャリアの大きさだけが処理されるため、信号の周波数を一定にする必要がありません。同期検出を用いていないため、1次側とLVDT出力の間の位相シフトの影響を受けません。

AD598の動作の基本となるレシオメトリック方式では、LVDTの2次側電圧の和がLVDTのストローク長に対して一定であることが必要です。LVDTのメーカ

ーは通常、 $V_A + V_B$ とストローク長の関係について規定していませんが、LVDTの中にはこの要件を満たしていないものもあることは認識されています。このような場合、結果として非直線的になります。ただし、入手可能な大部分のLVDTはこれらの要件を実際に満たしています。

### 部品の選択

AD598のデータシートに記載されている両電源動作（ $\pm 15V$ ）の設計手順では、励起周波数を2.5kHzに、システム帯域幅を250Hzに、出力電圧を0V～5Vに設定しています。

通常、AD598の内部発振器は出力に混入する少量のリップルを生じます。パッシブ・ローパス・フィルタを使って、このリップルを必要なレベルまで低減します。

システムの帯域幅を設定するためにコンデンサの値を選択する場合、トレードオフが必要になります。小さな値のコンデンサを選択するとシステムの帯域幅は大きくなりますが、出力電圧リップルは増加します。このリップルは出力電圧の設定に使用される帰還抵抗両端のシャント容量を大きくすることによって低減することができます。ただし、このことは位相遅延も大きくすることにもなります。

AD8615オペアンプがAD598の出力をバッファすることにより、AD7992ADCを低インピーダンス・ソースで駆動することができます（ソース・インピーダンスが大きいとADCのAC性能に大きく影響します）。

AD598の出力とAD8615の入力の間のローパス・フィルタは次の2つの目的を果たします。

- AD8615への入力電流を制限すること
- 出力電圧リップルをフィルタすること

AD8615には内部保護回路があるため、電源を超える電圧を入力に印加することが可能です。AD598の出力電圧は $\pm 15V$ の電源で $\pm 11V$ の振幅が可能なため、このことは重要です。入力電流が5mA未満に制限されている限り、入力に高い電圧を印加することができます。これは主に、AD8615の入力バイアス電流がきわめて小さく（1pA）、大きな抵抗を使用することができるからです。このような抵抗を使用すると熱ノイズが加わり、アンプの総合出力電圧ノイズに影響を与えます。

AD8615は、入力過電圧保護機能があることと、入力と出力の両方でレール to レールの振幅が可能なことから、12ビットSAR ADC AD7992の入力のバッファと駆動に最適なアンプです。

## ノイズの解析

選択した全てのシグナル・コンディショニング部品を使って、信号の変換に必要な分解能の大きさを決める必要があります。多くのノイズ解析のように、主要な要因のみを特定する必要があります。ノイズ源は rssi (2乗和の平方根) で合算されるので、他のノイズより少なくとも3倍~4倍大きな単一のノイズ源が支配的になります。

LVDT シグナル・コンディショニング回路の場合、支配的な出力ノイズ源は AD598 の出力リップルです。その他のノイズ源 (AD8615 の抵抗ノイズ、入力電圧ノイズおよび出力電圧ノイズ) は比較的にかなり小さい値です。

AD598 の出力電圧リップルは図 2 に示すように、 $0.39\mu\text{F}$  のコンデンサ値を使用し、帰還抵抗両端に  $10\text{nF}$  のシャント・コンデンサを接続すると  $0.4\text{mV rms}$  になります。これらの部品および関連するピン接続は図 1 の簡略回路図には示されていません。詳細については AD598 のデータシートを参照してください。

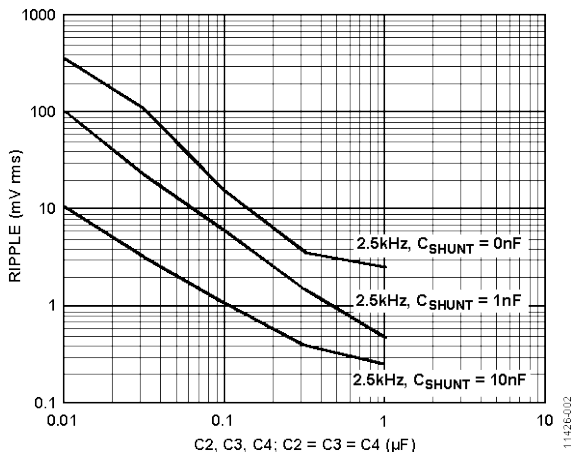


図 2. フィルタ容量 対 出力電圧リップル

フルスケール出力をシステムの総合 rms ノイズで割ることにより、分解可能な rms カウントの最大数を計算することができます。

$$\text{総合 rms カウント} = 5 \text{ V} / 0.4 \text{ mV} = 12,500$$

実効分解能は総合 rms カウントの底が 2 の対数をとることによって得られます。

$$\text{実効分解能} = \log_2(12,500) = 13.6 \text{ ビット}$$

ノイズフリー・コード分解能は、実効分解能から 2.7 ビットを差し引くことによって得られます。

$$\text{ノイズフリー・コード分解能} = \text{実効分解能} - 2.7 \text{ ビット}$$

$$\begin{aligned} &= 13.6 \text{ ビット} - 2.7 \text{ ビット} \\ &= 10.9 \text{ ビット} \end{aligned}$$

システムの総合出力ダイナミック・レンジは、フルスケール出力信号 (5V) を総合出力 rms ノイズ (0.4mV rms) で割り、デシベルに変換することによって計算することが可能で、その値は約 82dB になります。

$$\text{ダイナミック・レンジ} = 20 \log(5 \text{ V} / 0.4 \text{ mV}) = 82 \text{ dB}$$

AD7992 は分解能が 12 ビットで、3.4MHz のシリアル・クロックを用いたときの 1 チャンネルあたりのサンプリング・レートが 188kSPS なので、このアプリケーションに適しています。

## テスト結果

Measurement Specialties の E-100 エコノミー・シリーズ LVDT を J3 に接続し、EVAL-CN0288-SDPZ 評価ボードの J6 に生じる AD598 の出力をデジタル・オシロスコープでモニタしたところ、実際の出力リップルは図 3 に示すように  $6.6\text{mV p-p}$  でした。

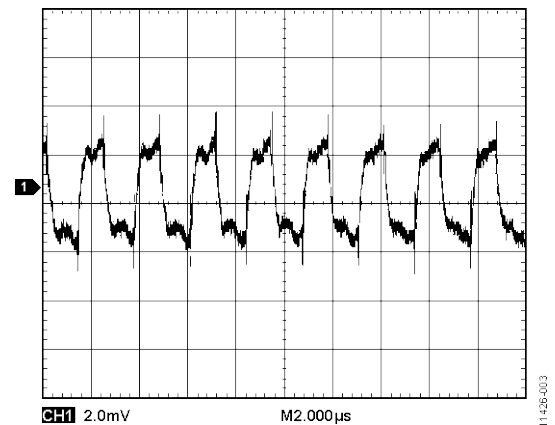


図 3. ローパス・フィルタ前の出力電圧リップル

AD598 の出力と AD8615 の入力との間のローパス・フィルタ ( $3\text{k}\Omega$ ,  $0.01\mu\text{F}$ ) は、 $-3\text{dB}$  帯域幅が  $5.3\text{kHz}$  でリップルを  $2\text{mV p-p}$  まで低減します。

AD598 の出力段と AD8615 の入力段の間にローパス・フィルタを実装したときのデータは、図 4 に示すように、EVAL-CN0288-SDPZ 評価ボードから収集されました。

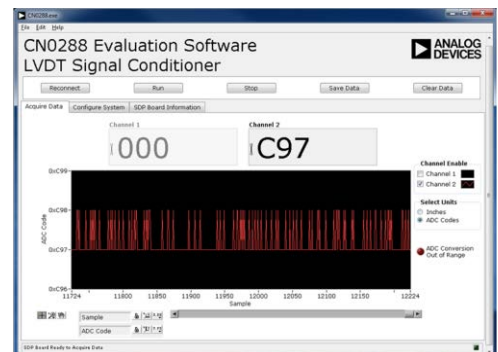


図 4. CN-0288 評価用ソフトウェアのスクリーンショット

AD598 から生じるリップルは  $2\text{mV p-p}$  まで減衰され、システムは 11 ビットのノイズフリー・コード分解能を実現することができました。

この回路ノートの設計支援パッケージについては、<http://www.analog.com/CN0288-DesignSupport> をご覧ください。

## 飛行制御面の位置帰還アプリケーション

無人自律走行車 (UAV) や無人飛行機は、米国の国家安全保障における役割が増大し続けています。これらの高度な技術、複雑な航空プラットフォームは何マイルも離れたクルーによって制御され、マルチミッションが可能です。これらには航空偵察、戦闘用武器のプラットフォーム、戦場の指令や管理の監視、無人空中給油ステーションなどの役割があります。

UAV に用いられている複雑なシステムは、高精度な制御と帰還を行うために無数の電子センサーを使用しています。UAV の高度 (ピッチ (左右回転)、ロール (前後回転)、ヨー (上下回転)) を制御するため、アクチュエータを使って飛行制御面に力を与えます。これらのアクチュエータの位置を高精度に測定することは、適切な飛行経路を維持するのに非常に重要です。

アクチュエータの位置の測定に使われるセンサーは、高精度、高信頼性、軽量という3つの不可欠な条件を満たす必要があります。これら3つの特性は全て Measurement Specialties によって設計された LVDT に備わっています。

## 複数の LVDT の同期動作

複数のゲージ測定などの多くのアプリケーションでは、多数の LVDT がごく近接して使用されています。これらの LVDT が同じようなキャリア周波数で動作すると、浮遊磁気結合によってビートが生じる可能性があります。このビートはこのような条件で行われる測定の精度に影響を与える恐れがあります。このような状況にならないようにするため、全ての LVDT を同期動作させます。

EVAL-CN0288-SDPZ 評価ボードは、ジャンパ JP1、JP2、JP4 に短絡ジャンパを実装し、JP3 を未実装のままにすることで、2 個の LVDT の間に 1 個のマスタ発振器が接続された構成にすることができます。それぞれの LVDT の 1 次側は専用のパワー・アンプで駆動されるため、熱負荷は AD598 の間で分担されます。

## バリエーション回路

選択された部品は AD598 からの最大 5V のユニポーラ出力に対して最適化されたものですが、他の組み合わせに置き換えることも可能です。

その他の適した単電源アンプは AD8565 と AD8601 です。これらのアンプは入力過電圧保護機能を備え、入力と出力の両方でレール to レールの振幅が可能のため、AD8615 の置換えに適しています。両電源動作が必要な場合、ADA4638-1 や ADA4627-1 を推奨します。

AD598 が  $\pm 10V$  のバイポーラ信号を出力する場合には、AD7321 を推奨します。AD7321 は、最大  $\pm 10V$  の真のバイポーラ・アナログ入力信号を受け入れることが可能な、2 チャンネル、バイポーラ入力、12 ビット ADC です。

## 回路の評価とテスト

この回路は、EVAL-CN0288-SDPZ 回路ボードと EVAL-SDP-CB1Z SDP-B システム・デモンストレーション・プラットフォーム・コントローラ・ボードを使用します。2 枚のボードは 120 ピン・コネクタを備えているので、短時間で組み立てて回路の性能を評価することができます。EVAL-CN0288-SDPZ は評価対象の回路を備えており、EVAL-SDP-CB1Z (SDP-B) は CN-0288 評価用ソフトウェアとともに使用し、EVAL-CN0288-SDPZ からデータをキャプチャします。

## 必要な装置

以下の装置が必要です。

- USB ポート付き Windows® XP (32 ビット)、Windows Vista®, または Windows 7 搭載 PC
- EVAL-CN0288-SDPZ 回路ボード
- EVAL-SDP-CB1Z SDP-B コントローラ・ボード
- CN-0288 評価用ソフトウェア
- EVAL-CFTL-6V-PWRZ DC 電源または等価な 6V/1A ベンチ電源
- Measurement Specialties の E-100 エコノミー・シリーズ LVDT (EVAL-CFTL-LVDT)

## 評価開始にあたって

CN-0288 評価用ソフトウェアの CD を PC の CD ドライブにセットして、評価用ソフトウェアをロードします。マイコンピュータから評価用ソフトウェア CD を挿入したドライブを探します。

## 機能ブロック図

回路ブロック図については図 1 を、全体回路図についてはファイル EVAL-CN0288-SDPZ-PADSSchematic.pdf をご覧ください。この PDF ファイルは CN-0288 Design Support Package に含まれています。

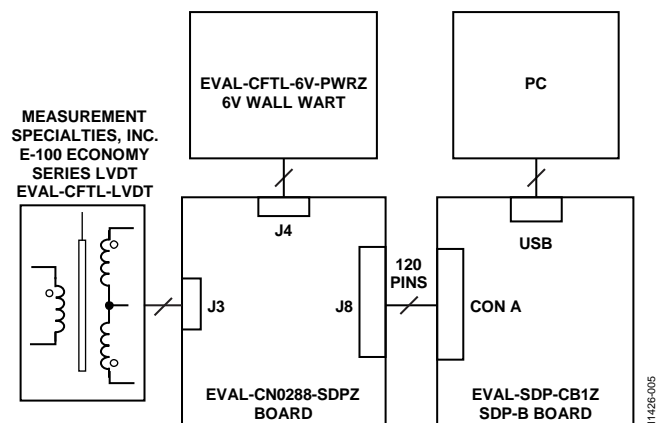


図 5. テスト・セットアップのブロック図

## セットアップ

EVAL-CN0288-SDPZ の 120 ピン・コネクタを EVAL-SDP-CB1Z (SDP-B) の CON A コネクタに接続します。120 ピン・コネクタの両端にある穴を利用し、ナイロン製の固定用部品を使って 2 枚のボードをしっかりと固定します。電源をオフにして、6V 電源をボードの +6V ピンと GND ピンに接続します。6V の AC アダプタがある場合は、ボード上の AC アダプタ用ジャックに接続して、6V 電源の代わりに使用することができます。EVAL-SDP-CB1Z に付属の USB ケーブルを PC の USB ポートに接続します。このとき、USB ケーブルを EVAL-SDP-CB1Z のミニ USB コネクタに接続しないでください。

## テスト

EVAL-CN0288-SDPZ に接続された 6V 電源（または AC アダプタ）をオンにします。評価用ソフトウェアを起動し、PC からの USB ケーブルを EVAL-SDP-CB1Z のミニ USB コネクタに接続します。

USB による通信が確立されると、EVAL-SDP-CB1Z は EVAL-CN0288-SDPZ との間のパラレル・データの送受信およびキャプチャを行うことができます。

EVAL-SDP-CB1Z に接続された EVAL-CN0288-SDPZ の写真を図 6 に示します。EVAL-SDP-CB1Z については、[UG-277 User Guide](#) を参照してください。

テスト・セットアップとキャリブレーションについての詳細、およびデータ・キャプチャ用評価ソフトウェアの使用法については、[CN-0288 Software User Guide](#) をご覧ください。

## プロトタイプ開発での接続

EVAL-CN0288-SDPZ は EVAL-SDP-CB1Z を使用するように設計されていますが、マイクロプロセッサを使って AD7992 の I<sup>2</sup>C 2 線シリアル・インターフェースとインターフェースすることができます。その他のコントローラを EVAL-CN0288-SDPZ とともに使用するためには、サードパーティによるソフトウェア開発が必要になります。

アルテラやザイリンクスのフィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) とのインターフェースに使用可能な既存のインターポーザ・ボードがあります。Nios ドライバを使用することにより、アルテラの BeMicro SDK ボードを BeMicro SDK/SDP インターポーザと併用することができます。FMC コネクタを備えたザイリンクスのどの評価ボードも FMC-SDP インターポーザ・ボードと併用することができます。

EVAL-CN0288-SDPZ はディジレントの Imod インターフェース仕様とも互換性があります。

システムの写真を図 6 に示します。

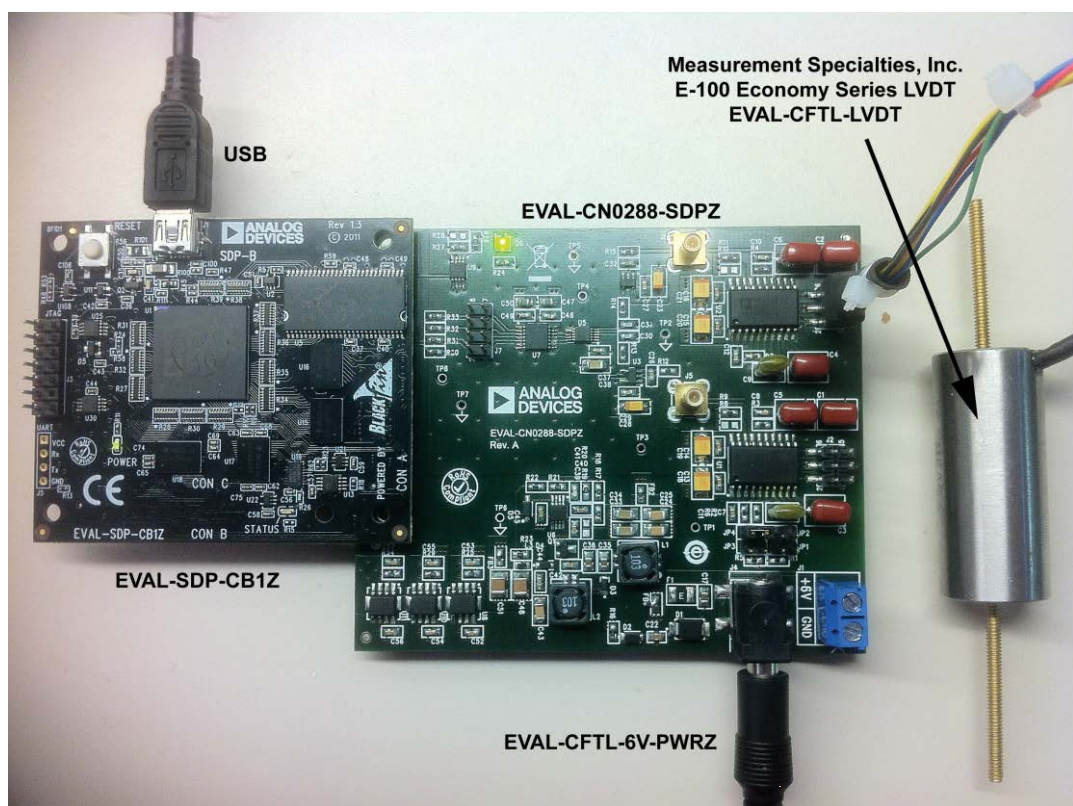


図 6. EVAL-SDP-CB1Z (SDP-B) ボードと Measurement Specialties の E-100 エコノミー・シリーズ LVDT に接続された EVAL-CN0288-SDPZ ボード

## さらに詳しくは

CN-0288 Design Support Package :

<http://www.analog.com/CN0288-DesignSupport>

SDP-B User Guide

Analog Dialogue 39-09 : 高速プリント回路基板 レイアウトの実務ガイド (John Ardizzoni 著)

MT-004 Tutorial : The Good, the Bad, and the Ugly Aspects of ADC Input Noise—Is No Noise Good Noise?, Analog Devices.

MT-031 Tutorial : データ・コンバータのグラウンディングと、「AGND」および「DGND」に関する疑問の解消

MT-035 : Op Amp Inputs, Outputs, Single-Supply, and Rail-to-Rail Issues, Analog Devices.

MT-036 Tutorial : Op Amp Output Phase-Reversal and Input Over-Voltage Protection, Analog Devices.

MT-068 Tutorial : Difference and Current Sense Amplifiers, Analog Devices.

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques, Analog Devices.

AN-1106 Application Note : An Improved Topology for Creating Split Rails from a Single Input Voltage, Analog Devices.

E-100 Economy Series LVDT, Measurement Specialties, Inc.

The LVDT: construction and principle of operation, Technical Paper, Measurement Specialties, Inc, 1000 Lucas Way, Hampton, VA 23666.

Subminiature LVDTs Provide Accurate Flight Control Surface Position Feedback on UAVs, Application Note, Measurement Specialties, Inc, 1000 Lucas Way, Hampton, VA 23666.

## データシートと評価ボード

CN-0288 回路評価ボード (EVAL-CN0288-SDPZ)

システム・デモンストレーション・プラットフォーム (EVAL-SDP-CB1Z)

AD598 データシート

AD7992 データシート

AD8615 データシート

ADP1613 データシート

ADP7104 データシート

## 改訂履歴

3/14—Rev. 0 to Rev. A

Changes to Synchronous Operation of Multiple LVDTs Section 4

3/13—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客様は製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできませんが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab/実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab/実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。  
CN11426-0-3/14(A)