



テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は www.analog.com/jp/CN0368 をご覧ください。

接続又は参考にしたデバイス

AD7866	12ビット A/D コンバータ、1MSPS、デュアル、2チャンネル、シリアル・インターフェース付、逐次比較型
ADA4571	AMR 角度センサー、信号処理回路内蔵

磁気抵抗による角度および直線位置の測定

評価および設計サポート環境

回路評価ボード

CN-0368 回路評価ボード (EVAL-CN0368-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)

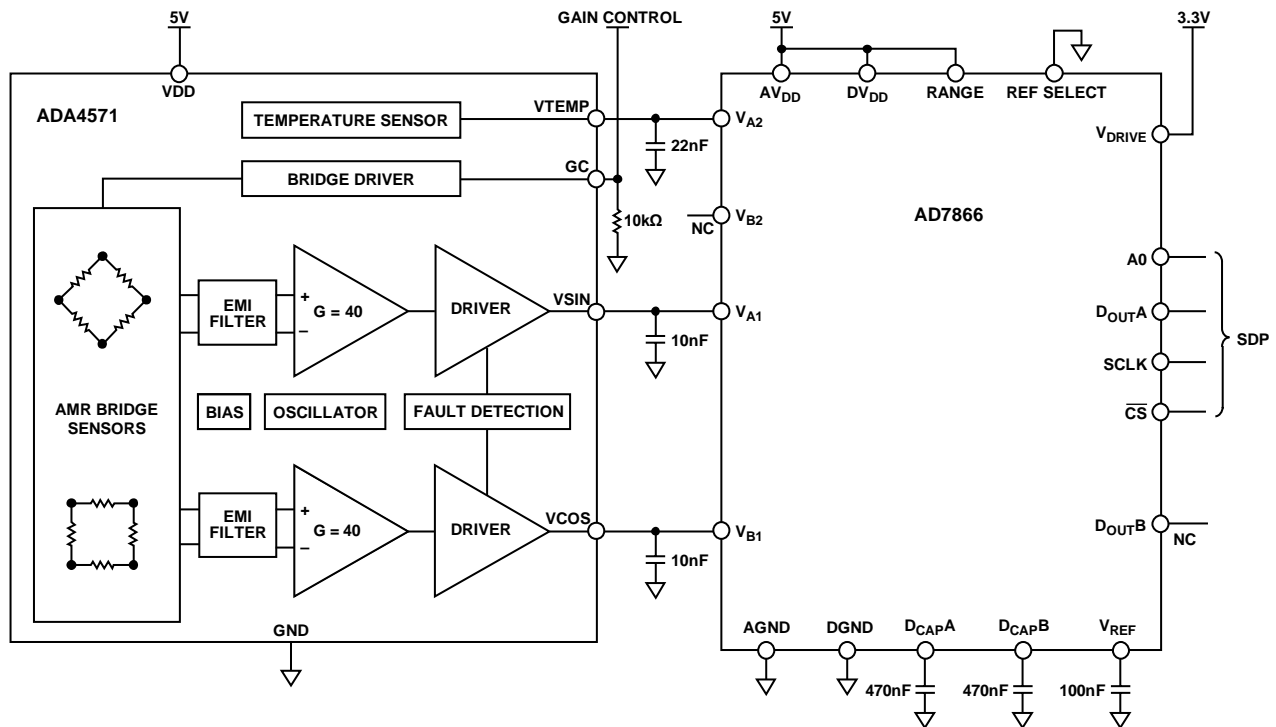
設計と統合ファイル

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に示すコンパクトな2チップ回路は、角度位置と直線位置の両方の測定に最適な異方性磁気抵抗 (AMR) による非接触測定のソリューションを提供します。この2チップ・システムは、使用する磁石のサイズに応じて、180°で0.2°以下の角度精度を、0.5インチの範囲で2ミル (0.002インチ) の直線精度を実現できます。

この回路は、工作機械の速度制御、クレーンの角度制御、ブラシレス DC モーターおよびその他の工業用アプリケーションや車載アプリケーションなど、角度と長さを高速、高精度で非接触測定することが重要なアプリケーションに最適です。



13118-001

図1. 磁気抵抗による角度および直線位置の検出システム (簡略回路図: 全接続の一部およびデカップリングは省略されています)

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。本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。※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。

回路説明

ADA4571 は、シグナル・コンディショニング・アンプ、ADC ドライバ、および温度補償用の温度センサーを内蔵した磁気センサー (AMR) です。ADA4571 は周囲の磁界の角度位置を示す 2 つのアナログ出力を生成します。

ADA4571 には AMR センサーと固定ゲイン ($G = \text{公称 } 40$) の計装アンプが含まれています。ADA4571 は、回転磁界の角度に関係するクリーンで増幅したコサインとサインの出力信号を供給します。出力電圧範囲は電源電圧に比例します。

センサーは、相対角度が 45° の 2 個のパーマロイ・ホイートストン・ブリッジを内蔵しています。x-y センサー平面内の回転磁界により、センサーと磁界方向間の角度 (α) の 2 倍の角周波数の 2 つのサイン波出力信号が生じます。x-y 平面の均一磁界内では、出力信号は z 方向 (エア・ギャップ) の物理的な位置の影響を受けません。

サイン出力とコサイン出力の出力電圧振幅は V_{DD} の 7%~93% です。2 つの診断域 (V_{DD} の 0%~7% と V_{DD} の 93%~100%) があることにより、全ての内部接続ボンディング・ワイヤの断線を検出できます。

ADA4571 は 8 ピン SOIC パッケージを採用しています。

VSIN 出力と VCOS 出力の出力インピーダンスは 50Ω で、外付けの 10nF コンデンサとともに 318kHz のノイズ・フィルタを形成します。

AD7866 はデュアル・チャンネルの同時サンプリング、12 ビット、1MSPS SAR ADC です。RANGE ピンの極性により、アナログ入力範囲と出力コーディングが決まります。チップ・セレクトがローになるときにこのピンをロジック・ハイに接続すると、次に変換されるアナログ入力範囲は $0\text{V} \sim 2 \times V_{REF}$ ($0\text{V} \sim 5\text{V}$) になり、AMR センサー ADA4571 からの $0.35\text{V} \sim 4.65\text{V}$ の信号に対して、ヘッドルームは約 350mV のままとなります。

また、REFSEL ピンをローに接続すると、ADC は 2.5V の内部リファレンス電圧を使用するように設定されます。この電圧は V_{REF} ピンから供給できますが、システムの他の場所で使うにはバッファが必要です。ADC の適切な動作を保証するために、 D_{CAPA} ピンと D_{CAPB} ピンは 470nF のコンデンサでデカップリングしています。

AD7866 はセンサーの両方のチャンネルを同時にサンプリングします。デジタル・ワードは通常 D_{OUTA} および D_{OUTB} で得られ、各データ・ストリームは先頭の 1 ビットの 0、それに続く 3 ビットのステータス・ビット、次いで 12 ビットの変換データで構成されます。ただし、さらに 16 クロック・サイクルの間 \overline{CS} ピンをローに保持することで、両方のデジタル・ワードを 1 つのチャンネル D_{OUTA} から得ることができます。したがって、SPI インターフェースにより、1 本のデータ・ラインで両方のチャンネルにアクセスすることができます。

AD7866 の 2 個の ADC のそれぞれへの入力に 2 チャンネル・マルチプレクサが備えられています。A0 入力ピンをロジック 0 にすると A1 入力と B1 入力に変換可能になり、A0 入力ピンをロジック 1 にすると A2 入力と B2 入力に変換可能になります。ADA4571 からの温度センサーの出力を AD7866 の A2 入力に接続することで、システムのソフトウェアによる温度キャリブレーションを行うことができます。

磁気抵抗 (MR) の理論

磁気抵抗は、外部磁界の影響を受けると物質の抵抗値が変化する性質です。最も普及している MR センサーは AMR 技術をベースにしています。

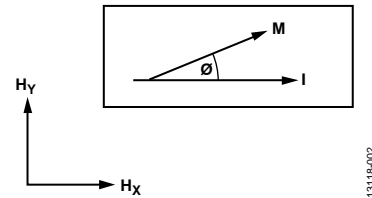


図 2. 異方性磁気抵抗の例

AMR 効果の例を図 2 に示します。導体を通る電流 (I) は外部磁界 (H_y) の影響を受けます。導体の抵抗値は磁化ベクトル (M) と電流ベクトル (I) の角度 (θ) の関数として変化します。磁化ベクトルは内部磁界 (H_x) と加えられた外部磁界 (H_y) を合計したものです。

抵抗値が最大になるのは磁化ベクトル (M) が電流ベクトル (I) と平行になったときです。抵抗値が最小になるのは磁化ベクトル (M) が電流ベクトル (I) と垂直になったときです。

AMR 効果を有効に利用するには、導体自体が機械的応力の影響を受けにくく、磁気拘束力の影響を受けやすい素材でなければなりません。これらの理由で、パーマロイ (ニッケル 80%、鉄 20%) 合金が AMR センサーの製造に最も多く使われています。

パーマロイの特性

パーマロイ・ストリップには、角度測定システムの開発時に設計上の課題となる特性が 2 つあります。

1 つ目は、パーマロイの直線動作領域が狭いことです (図 3 参照)。磁化ベクトル (M) と電流ベクトル (I) の角度 (θ) が大きいときだけ、応答が直線になります。残念ながら、パーマロイは応答が直線になるとすぐに飽和してしまいます。

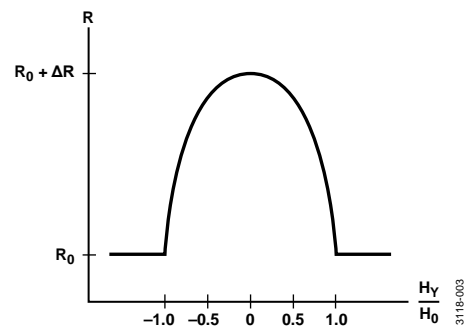


図 3. パーマロイの磁界対抵抗値

2 つ目は、パーマロイは極性に対する感度がないことです。磁化ベクトル (M) と電流ベクトル (I) の角度 (θ) の正負に関係なく、パーマロイ・ストリップの抵抗値は減少します。

バーバーポール

パーマロイ・ストリップの直線性および極性に対し感度が低い点を改善するのに使われる一般的な方法は、図4に示すように、ストリップの軸に対して45°の角度でアルミのストライプ（縞模様）を追加することです。これはバーバーポール（理髪店の赤青白が巻かれた棒状の看板）と呼ばれます。バーバーポールの間を流れる全ての電流は最短経路（垂直経路）をとるので、電流ベクトル (I) と磁化ベクトル (M) の角度が45°シフトします。

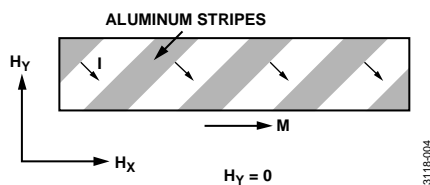


図4. パーマロイ・ストリップのバーバーポール効果

バーバーポールをパーマロイ・ストリップに追加した結果を図5に示します。電流ベクトルは45°シフトしますが、磁化ベクトルは変化せず元のままです。グラフの中央で直線的な挙動が見られることに注意してください。

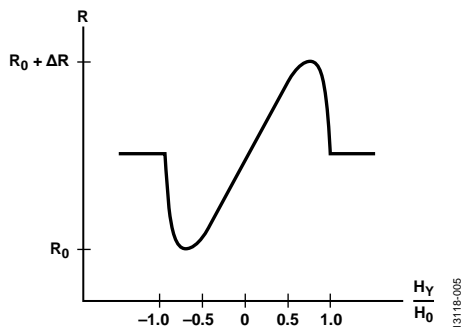


図5. バーバーポール型パーマロイの磁界対抵抗値

磁界強度

ADA4571 のデータシートの仕様を確実に満たすためには 25kA/m の最小電磁界強度が必要です。この励起磁界は ADA4571 パッケージ内の検出素子の中心と交差する必要があります。

磁石を選択する際は、図6に示すように、センサーと磁石間のエア・ギャップを考慮します。磁石がセンサーに近接していない（距離 d が非常に大きい）場合、最小電磁界強度の条件を確実に満たすため、より強力またはより大きな磁石が必要になる可能性があります。

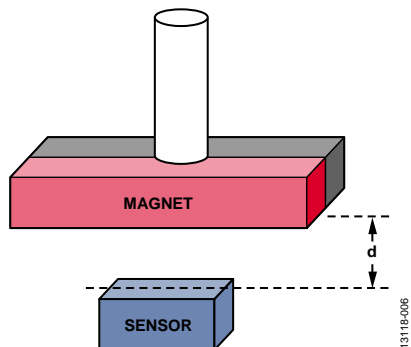


図6. 回転シャフト角度測定のための磁石の方向とエア・ギャップ

センサーの基礎

標準的な AMR センサーは2個のホイートストン・ブリッジで構成されており、図7に示すように、一方のブリッジは他方のブリッジに対して45°の相対角度を持っています。

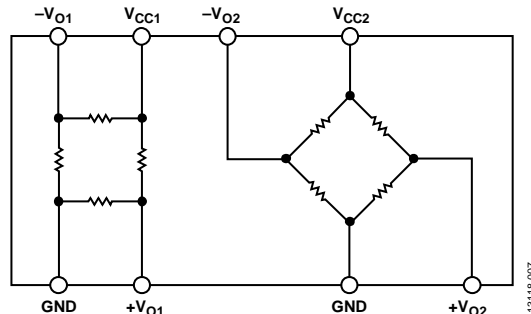


図7. ADA4571 のデュアル・ホイートストン・ブリッジ構成

回転磁界は、図8に見られる $\sin(2\theta)$ と $\cos(2\theta)$ の出力を生じます。両方の信号とも 180°の範囲を周期とするので、追加部品や基準点なしでは 360°全体の測定は不可能です。

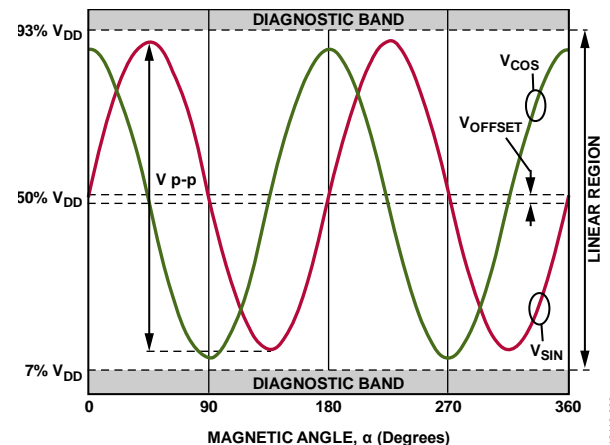


図8. 電磁抵抗センサーの出力電圧

チャンネル感度

ADA4571 センサーの各チャンネルの公称感度は 52mV/° です。つまり、磁化ベクトルとセンサーの方向が 1°変化すると出力電圧が 52mV 変化します。感度は角度に対して一定ではありません。感度が低下する領域は、各出力電圧の波形の傾きがゼロに近づく部分です。

図8を見ると、コサイン出力（緑線）は磁化ベクトルの角度が 0°、90°、180°、270°の近くで感度が低下しています。同様に、サイン出力（赤線）は 45°、135°、225°、315°付近で感度が低下しています。幸いなことに、片方のチャンネルの感度が低いとき、他方のチャンネルは感度が高い領域にあります。

システム帯域幅、磁界の回転

磁界の角速度は、回路の帯域幅を理解する上で1つの重要な要素です。ADCは1 μ sごとに1サンプルを変換します。1°の分解能を実現するために、磁界が変化できるのは1msに1° (2.778kHz) だけです。そうでないと、ADCは磁界の変化に対応するのに十分な速度でサンプリングすることができません。この制限により、1MSPSのADCに対する磁界の使用可能な最大角速度が2.778kHzに設定されます。

回転測定テストの結果

直径方向に磁化されたN42磁石（直径=0.5インチ、厚さ=0.125インチ）を金属棒の端に取り付けます。高精度DCモーターにより、この棒の精密な角度制御を行うことができます。センサーを磁石の表面に対して正確に実装します。エア・ギャップを2mmに設定します。センサーが磁気で十分に飽和されている限り、測定結果はエア・ギャップの影響をほとんど受けません。

モーターの回転によってセンサーと交差する回転磁界が生じると、角度計算とデータ収集に適したサインとコサインの出力電圧を繰り返し生成します。

図9はセットアップの機能図です。図10は、シャフトの端に配置したデータ収集に使用するセットアップの写真です。このセットアップは、ブラシレスDCモーター、実装装置、磁石、対応するADA4571センサーを搭載したPCBで構成されています。

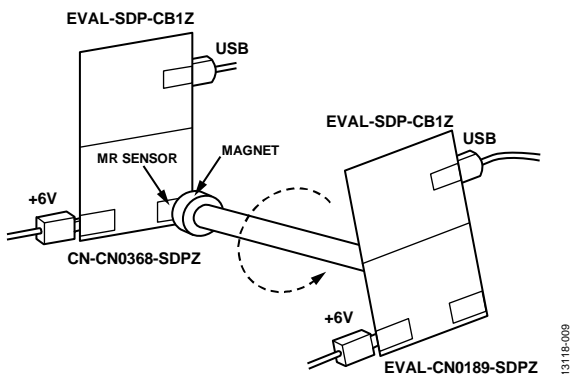


図9. データ収集のテスト・セットアップ
(シャフトの端に配置)

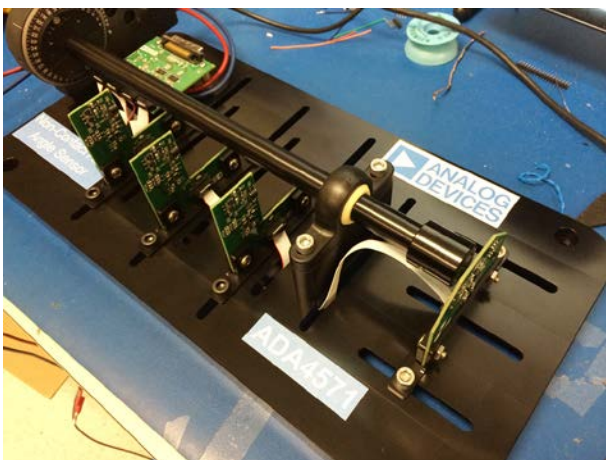


図10. ブラシレスDCモーターを使用した
ベンチテスト・セットアップの写真

図11は、磁石を数回回転させたときのモーターの機械的角度とセンサーの計算した磁界角度を比較した結果です。この計算には2つの出力の比の逆正接関数を使用します。この誤差はキャリブレーションなしでは $\pm 1^\circ$ に達します。

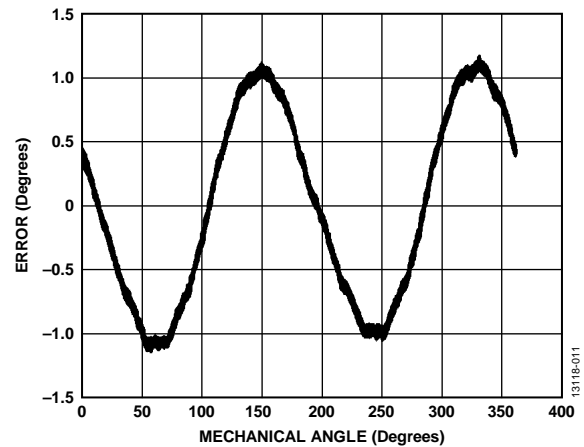


図11. オフセット補正前の機械的角度対角度誤差

オフセット補正のみを行った誤差を図12に示します。サインとコサインの振幅ミスマッチ、非直線性、直交性などに対する補正のための調整を追加する必要はありません。オフセットは、各チャンネルが機械的に1回転するときのピーク to ピーク値または平均値を使って求めます。各チャンネルからこのオフセットを差し引いて、センサーの直線応答を求めます。最大誤差は $\pm 0.2^\circ$ に達しますが、大部分の範囲で誤差は $\pm 0.1^\circ$ を下回ります。

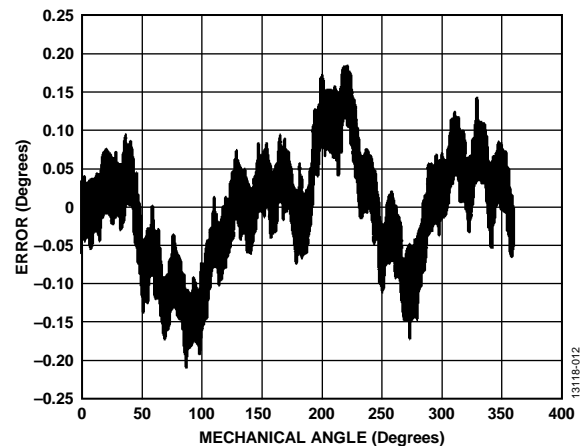


図12. オフセットのみを補正した後の機械的角度対角度誤差

直線位置のテスト結果

インクリメンタル型(相対位置測定)の直線位置測定システムを構成するために必要な変更はごくわずかです。図 13 に示すように、磁石を N 極と S 極が交互に配置された多磁極棒磁石に置き換えます。

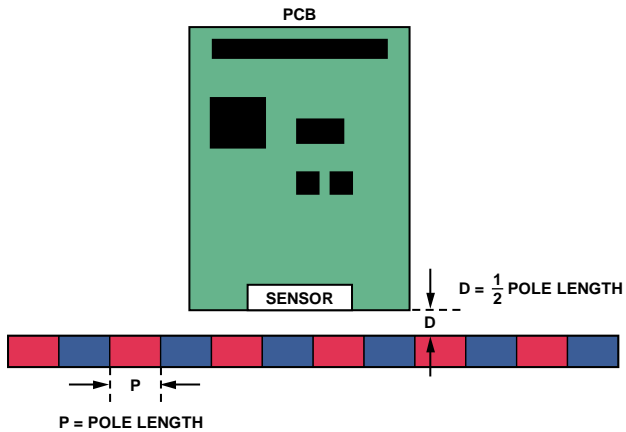


図 13. 直線位置測定用磁石、PCB およびセンサー

センサーは、磁石と平行に移動すると、磁極の長さだけ進むごとに 180°回転する磁界を検出します。磁石の磁極の長さ (P) とセンサーの角度精度 ($\Delta\theta = 0.05^\circ$) により理論上の精度 (Δx) が決まります。

$$\Delta x = P \times \Delta\theta / 180^\circ$$

この方法により、1つの磁極の長さだけのアブソリュート型(絶対位置)測定システムが得られます。磁石に複数の磁極があれば、通過した磁極の数を数えることで、さらに正確な測定値が得られます。センサーと磁石間の理想的な距離は磁石の磁極の長さの半分です。

EVAL-CN0368-SDPZ PCB は、磁石をデジタル・ノギスのアームに装着してテストします。EVAL-CN0368-SDPZ PCB は、ADA4571 の AMR センサー (U5) の面が磁石面に垂直になるように装着されています。磁石が動くと、ノギスが移動距離を 0.0005 インチの精度で表示します。同時に、磁力線がセンサーと交差し、使用可能な出力電圧を発生します。セットアップの図を図 4 に、写真を図 15 に示します。

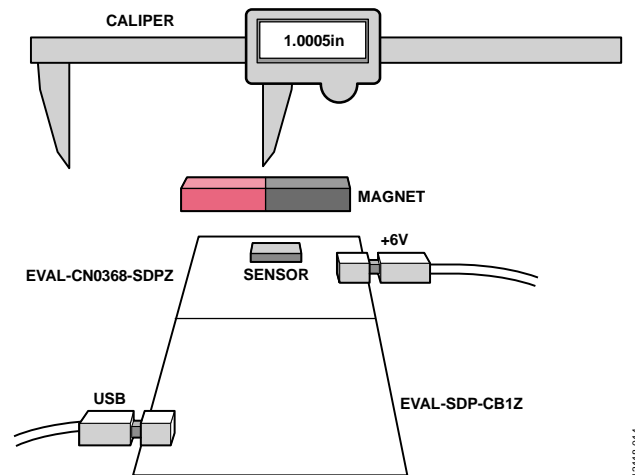


図 14. 直線測定用のデータ収集テスト・セットアップ

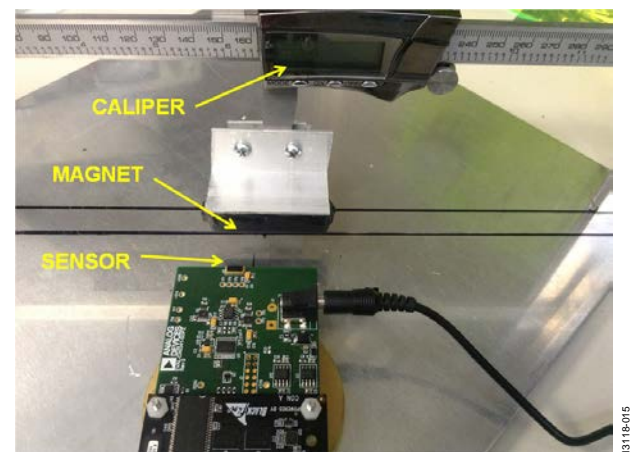


図 15. ベンチテスト・セットアップの写真

セットアップに使用する磁石は長さが 2 インチで、センサーから 1 インチ離します。直線動作検出に推奨するセンサーと磁石間のエア・ギャップは、磁石の磁極の長さの半分に等しい値です。磁石を x 軸に沿って動かしながらデータを集め、評価用ソフトウェアの測定値をノギスのデジタル・ディスプレイに表示される値と比較します。1.0 インチの範囲で記録された出力位置の誤差を図 16 に示します。誤差は全範囲で ± 2 ミルです。

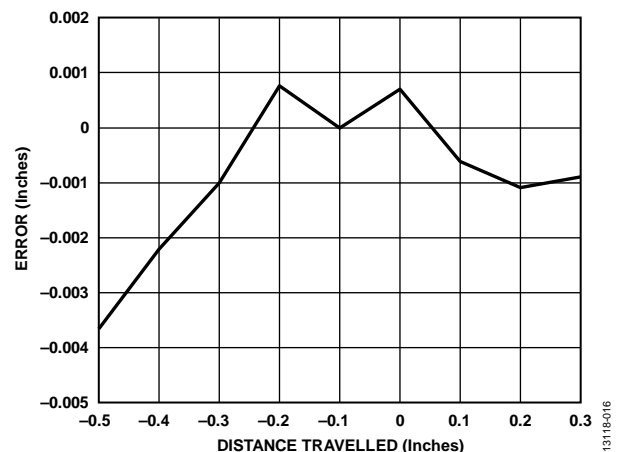


図 16. 磁界の位置誤差：1.0 インチの範囲

測定範囲を 0.4 インチに制限すると、より良好な測定結果が得られます。0.4 インチでは図 8 に示されている三角関数波の直線部分に一致しており、測定を 30° の範囲に制限していることに注意してください。この変更された範囲に新しいゲイン補正係数を適用すると、図 17 に示すように、誤差は ±1 ミルになります。

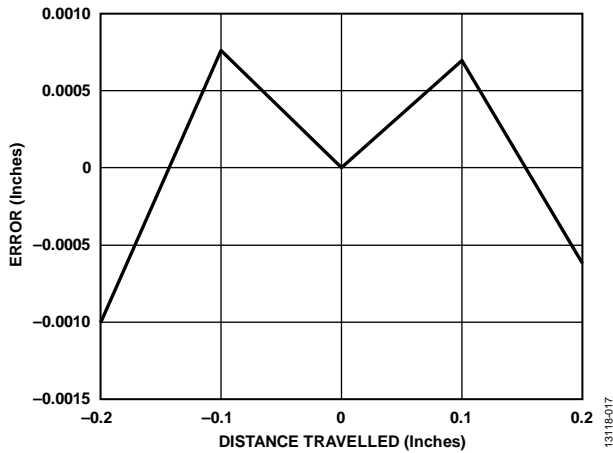


図 17. 磁界の位置誤差：0.4 インチの範囲

図 18 に示すように、センサーは磁石本体の中央に位置するように置かれています。一般的な誤差源である垂直方向の位置ずれは、センサーが磁石の位置に対して上下に動く際に生じます。

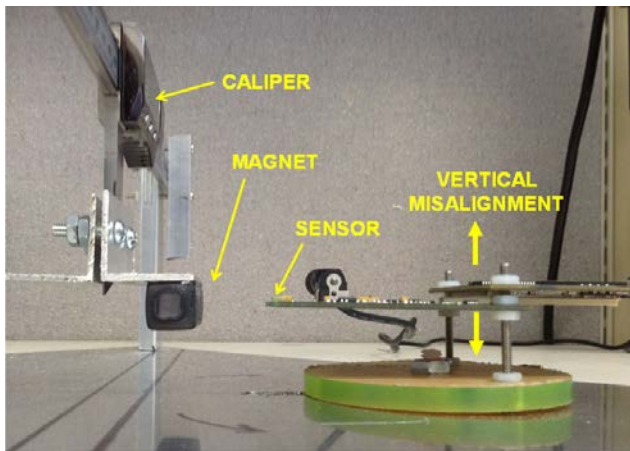


図 18. ベンチテスト・セットアップの写真：垂直方向の位置ずれ

図 19 はセンサーと磁石の垂直方向の位置ずれによって生じる誤差を示しています。このテストは、データを収集する前に、PCB を 0.25 インチと 0.5 インチだけ上下に動かして行います。1.0 インチの測定範囲では、ターゲットを上下に 0.25 インチ動かすと計算値に数ミルの誤差が加わります。センサーを上下に 0.5 インチ動かすと測定値はさらに悪化し、元の測定値に数十ミルの誤差が加わります。

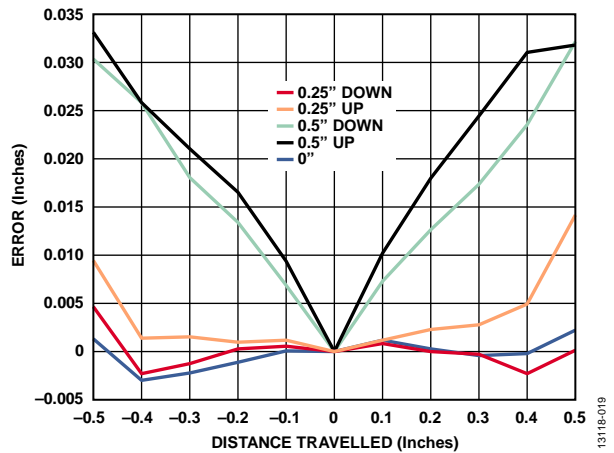


図 19. 磁界の位置誤差：垂直方向の位置ずれ

このような大きな誤差は、ゲイン補正係数を変更すると小さくできますが、完全に除去することはできません。磁石からの距離を負方向に大きくすると磁界強度と磁力線の方向に影響を与え、データの一部分が復元できなくなります。

次に一般的な誤差源は、図 20 に示す回転方向の位置ずれです。センサーと磁石は垂直軸に対しては理想的な位置に置かれていますが、センサーが磁石面に平行ではありません。

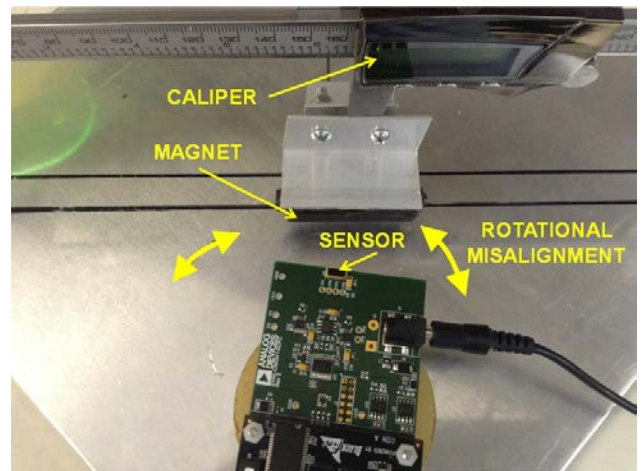


図 20. ベンチテスト・セットアップの写真：回転方向の位置ずれ

回転方向の位置ずれに関する測定値を図 21 に示します。緑線は平行な状態で記録された誤差を示しており、赤線と青線はセンサーを磁石面に対して左右に回転させることによって追加される誤差を示しています。

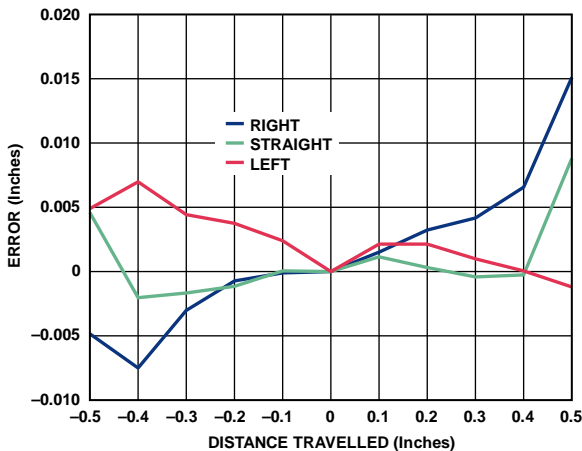


図 21. 磁界の位置誤差：回転方向の位置ずれ

最後の一般的な誤差源は、図 22 に示すセンサーと磁石の距離です。センサーと磁石間の理想的な距離は磁石の長さの半分です。この距離を増減すると、データ・セットに誤差が生じます。磁石とセンサーの距離が近すぎる状態のベンチテスト・セットアップを図 22 に示します。

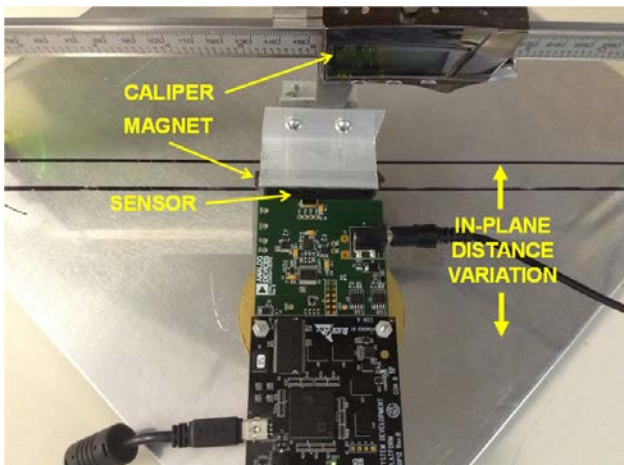


図 22. ベンチテスト・セットアップの写真：平面内距離のばらつき

磁石とセンサー間の距離を 0.1 インチ、0.5 インチ、1 インチに設定してから、データ・セットを収集します。設定を変えた誤差を図 23 に示します。

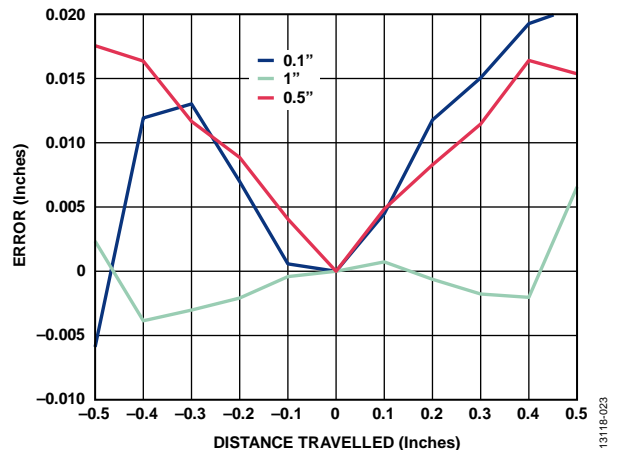


図 23. 磁界の位置誤差：平面内距離のばらつき

このような大きな誤差は、ゲイン補正係数を変更すると小さくできますが、完全に除去することはできません。磁石からの距離を負方向に増減すると磁界強度と磁力線の方向に影響を与え、データの一部が復元できなくなります。

角度位置のアプリケーションに関する測定と計算全てに使用される LabVIEW® 評価用ソフトウェアのスクリーンショットを図 24 に示します。Linear Measurement tab のスクリーンショットを図 25 に示します。

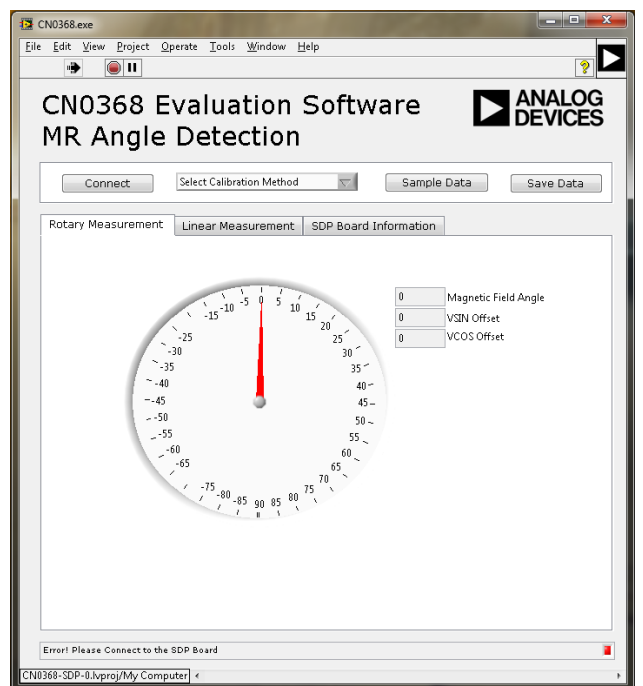


図 24. CN0368 評価用ソフトウェア Rotary Measurement Tab のスクリーンショット

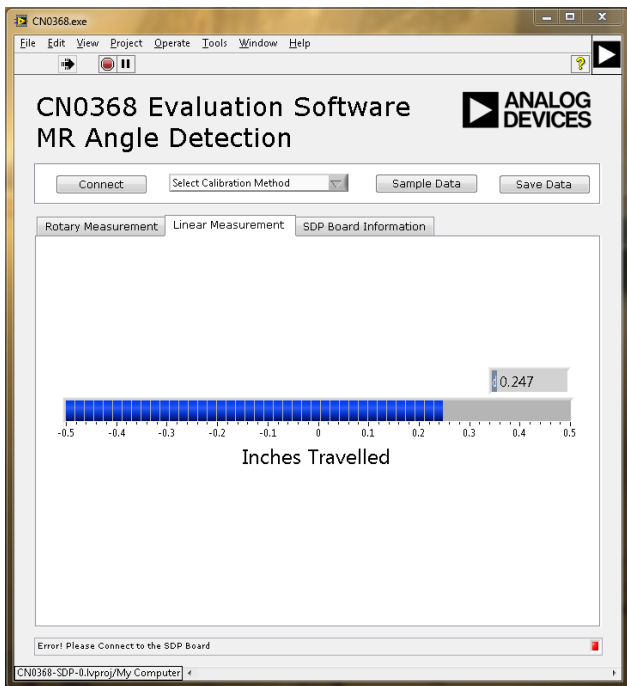


図 25. CN0368 評価用ソフトウェア Linear Measurement Tab のスクリーンショット

キャリブレーション時に、各ホワイトストーン・ブリッジの最大電圧 V_{MAX} と最小電圧 V_{MIN} の出力を決定します。これらの値を知ることにより、電圧をデジタル・コードに対してより正確にマッピングすることができます。Select Calibration Method ドロップダウン・ボックスを使った V_{MAX} と V_{MIN} の値を決定する方法は 2 つあります。

1 つ目は、磁気を 360°回転させ、ソフトウェアで V_{MAX} と V_{MIN} を特定する方法です。この場合、ソフトウェアでは各チャンネルのオフセット電圧を計算し、これらの値を使って磁界角度を決定します。

2 つ目は、磁気を 360°回転させ、ソフトウェアで V_{MAX} 、 V_{MIN} 、および V_{TEMP} を特定する方法です。このプロセスはその後異なる温度で繰り返されます。ソフトウェアでは、これらの変数を使って各チャンネルのオフセット電圧と温度依存性を計算し、その後、磁界角度を計算します。

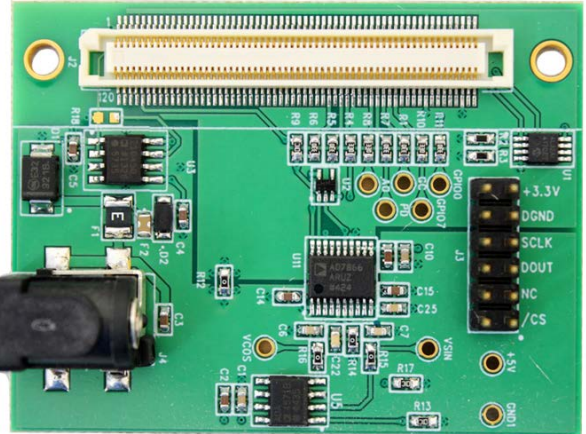
PCB レイアウト時の考慮事項

高精度を必要とする回路では、ボード上の電源とグラウンド・リターンレイアウトを考慮することが重要です。PCB では、デジタル部とアナログ部をできるだけ分離するようにします。CN-0368 システムの PCB は、面積の大きいグラウンド・プレーン層と電源プレーン・ポリゴンを積み重ねた 4 層基板を使用しています。レイアウトとグラウンディングの詳細については MT-031 チュートリアルを、デカップリング技術については MT-101 チュートリアルを参照してください。

適切にノイズを抑え、リップルを下げるため、全ての IC への電源は $1\mu\text{F}$ と $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサでデカップリングします。これらのコンデンサはできる限りデバイスの近くに配置します。全ての高周波デカップリングにはセラミック・コンデンサを推奨します。

電源ラインはトレース幅をできるだけ大きくして低インピーダンス経路を与え、電源ラインのグリッチ影響を減らします。クロックなどの高速スイッチング・デジタル信号は、デジタル・グラウンドを使ってボード上の他の部分からシールドします。この PCB の写真を図 26 に示します。

CN-0368 の設計サポート・パッケージは www.analog.com/CN0368-DesignSupport で入手できます。



評価開始にあたって

CN0368 評価用ソフトウェア CD を PC 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 のあるドライブを探し、Readme ファイルを開きます。Readme ファイルの指示に従って評価用ソフトウェアをインストールして使用してください。

機能ブロック図

テスト・セットアップの機能ブロック図を図 27 に示します。

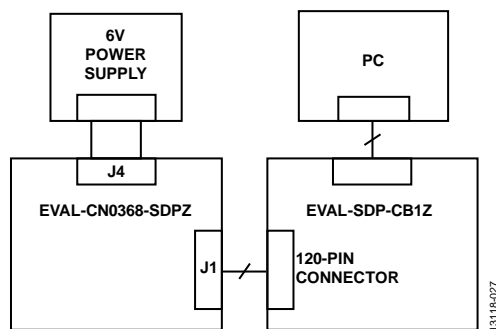


図 27. テスト・セットアップのブロック図

セットアップ

EVAL-CN0368-SDPZ の 120 ピン・コネクタを EVAL-SDP-CB1Z の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て、ナイロン製ハードウェアを使って 2 枚の基板をしっかりと固定します。

電源をオフにして、6V の DC バレル・ジャックをコネクタ J4 に接続します。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。この時点では、まだ USB ケーブルを SDP ボード上のミニ USB コネクタに接続しないでください。

ネオジム磁石を IC の上面に直接、または IC と磁石の距離を最小にした磁石回転用治具に取り付けます。

センサーの出力電圧は浮遊磁界により誤差を生じる恐れがあるので、他の磁界発生源を IC から遠ざけることが重要です。

テスト

DC バレル・ジャック（コネクタ J4）に給電します。CN0368 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 通信が確立すると、EVAL-SDP-CB1Z ボードを使用して、EVAL-CN0368-SDPZ との間でシリアル・データの送受信および収集を行うことができます。

EVAL-SDP-CB1Z については、[SDP ユーザー・ガイド](#)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・キャプチャのための評価用ソフトウェアの使用方法については、[CN-0368 ソフトウェア・ユーザー・ガイド](#)に記載されています (www.analog.com/CN0368-UserGuide)。

さらに詳しい資料

CN0368 Design Support Package :
www.analog.com/CN0368-DesignSupport

MT-031 Tutorial : Grounding Data Converters and Solving the Mystery of “AGND” and “DGND”, Analog Devices.

MT-101 Tutorial : Decoupling Techniques, Analog Devices.

AN-688 Application Note : Phase and Frequency Response of iMEMS Accelerometers and Gyros, Analog Devices

データシートと評価ボード

[AD7866 データシート](#)

[ADA4571 データシート](#)

改訂履歴

3/15—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。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab/実用回路集」を使用することはできますが、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。

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。