



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 <http://www.analog.com/jp/CN0397> をご覧ください。

接続または参考にしたデバイス

AD7798	3チャンネル、低ノイズ、低消費電力、16ビット、 Σ - Δ ADC、計装アンプ内蔵
AD8500/ AD8502	シングル/デュアル・マイクロパワー高精度 CMOS オペアンプ
ADR3433	マイクロパワー、高精度、3.3V、電圧リファレンス

スマート農業に向けた超低消費電力の光認識システム

評価と設計支援

回路評価用ボード

[CN-0397 回路評価用ボード \(EVAL-CN0397-ARDZ\)](#)

[ADICUP360 評価用ボード \(EVAL-ADICUP360\)](#)

設計および統合ファイル

[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 に示す回路では、異なる波長（赤色、緑色、青色）に対して高感度の 3 種類のフォトダイオードが使用されており、植物の光合成に有効な光スペクトルにわたって光強度レベルを測定できます。測定結果を使用すると、特定の植物の条件に合うように光源を最適化し、成長速度を高め、エネルギー損失を最小限に抑えることができます。

この回路には高精度の 3 つの電流/電圧変換段が使用されており、これらの変換段は 3 つの差動入力を備えた単電源、低消費電力、低ノイズの 16 ビット、シグマ・デルタ (Σ - Δ) A/D コンバータ (ADC) を駆動します。

この回路では、すべての機械部品と光学部品をなくしたことで従来のアプローチからは外れていますが、電気部品のみを使用して同じ目的を達成しています。

回路の消費電力は 10mW 未満（代表値）であるため、バッテリー駆動の携帯機器分野におけるアプリケーションに最適です。

プリント回路基板 (PCB) は、Arduino (アルドゥイーノ) 互換のシールド・フォーム・ファクタで設計されており、迅速なプロトタイピングのために、[EVAL-ADICUP360 Arduino 互換プラットフォーム・ボード](#)とインターフェースします。

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、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は 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。

Rev. 0

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

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 10F
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 10F
電話 06 (6350) 6868
名古屋営業所 / 〒451-6038 愛知県名古屋市中区牛島町 6-1 名古屋ルーセントタワー 38F
電話 052 (569) 6300

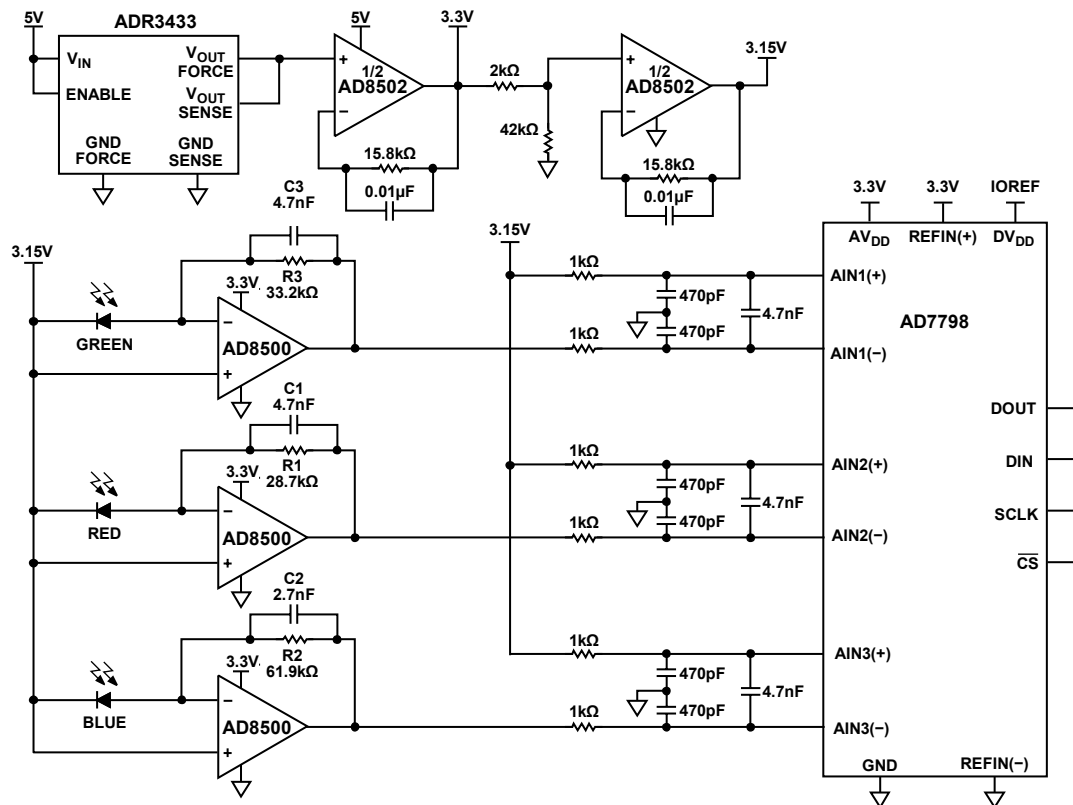


図 1. 超低消費電力、単電源、16 ビット電圧入力 ADC (簡易回路図、すべての接続とデカップリングが示されているわけではありません)

回路の説明

はじめに

植物は光の全可視スペクトルにわたって光合成を行います。図 2 の光合成有効放射 (PAR) 曲線に示すように、その応答は赤色と青色の波長でより大きく、緑色の波長でより小さくなっています。

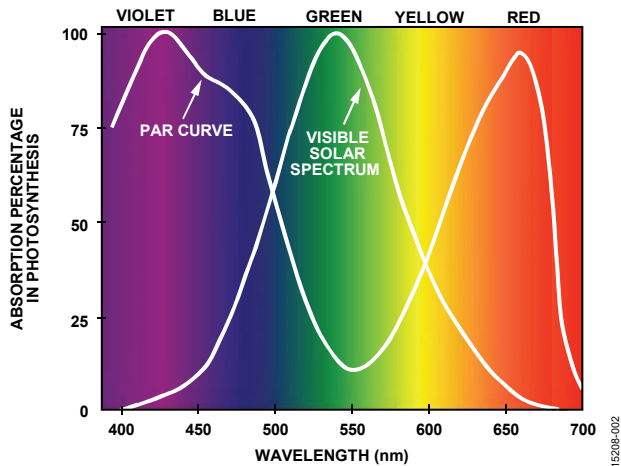


図 2. 代表的な PAR 曲線と可視光スペクトル

光の緑色のスペクトルは主に葉で反射されますが、赤色と青色のスペクトルは葉に吸収されて光合成に使用されます。このデータが得られると、植物で利用される波長と、植物が最速で成長するために最適化された光源について、光強度を測定するための光検出回路を設計することができます。

このアプリケーションで選択されたフォトダイオードは、植物が光合成を行う場合に吸収する青色と赤色の波長だけでなく、受光してもほとんど使用されない緑色と黄色の波長も取り込んで測定することができます。その結果、植物の照明システムの効率を最適化できます。

この回路は、Everlight Americas, Inc (3220 Commander Dr., Suite 100, Carrollton, TX 75006) のフォトダイオード・センサーを使用してテストされました。この回路は、センサーの特定の波長で光を測定することができます。このアプリケーションで使用されているフォトダイオードでは、ピーク感度が 470nm (青色: CLS15-22C/L213B/TR8)、550nm (緑色: CLS15-22C/L213G/TR8)、および 620nm (赤色: CLS15-22C/L213R/TR8) にあり、感度はそれらのピークから離れるにしたがって急勾配で減衰します。

このアプリケーションで使用されているフォトダイオードは、高チャント抵抗を持っており、光起電モード (ゼロ・バイアス) で動作するため、暗電流に起因する誤差が最小限に抑えられます。

電流から電圧への変換

このアプリケーションでは、バイアス電流が非常に低い適切なアンプを選択することが重要です。これは、フォトダイオードの出力は数百ピコアンペアという低い値になる可能性があり、大きな入力バイアス電流が流れると大きな誤差が生じるためです。

トランスインピーダンス・アンプとして使用されている AD8500 は、1 μ A の最大電源電流を特長とする低消費電力で高精度の CMOS オペアンプです。AD8500 では、最大オフセット電圧が 1mV で、代表的な入力バイアス電流が 1pA となっています。したがって、AD8500 は消費電力が低く、入力バイアス電流が低いため、最適な選択になります。

AD8500 による 3 つの電流/電圧変換器は、3.15V のコモンモード電圧で動作します。3.15V のコモンモード電圧によって、ダイオードのカソードを互いに接続することができます。これは、Hamamatsu S7505-01 などのトリプル・ダイオード・パッケージの場合です。

3.15V のコモンモード電圧を使用すると、ダイオード電流がゼロの場合に、AD8500 段の出力に 0.15V のヘッドルームを確保できます。このため、光強度が増加し、ダイオード電流が増加するにつれて、AD8500 段の出力信号は 3.15V からグラウンドに向かって振れます。

AD8500 の出力信号がフルスケール強度で常に +0.15V を上回るように、ゲイン抵抗 R1、R2、および R3 が選択されています。したがって、全体的なピーク to ピーク出力振幅は次式と等しくなります。

$$V_{p-p} = 3.15V - 0.15V = 3.0V$$

0.15V~3.15V の振幅は、3.3V のリファレンス電圧で設定される AD7798 ADC の範囲内になります。AD7798 がバッファ・モードで動作しているとき、入力範囲の両端で 100mV 以上のヘッドルームが必要です。

各チャンネルの帰還抵抗は、同じレベルの光強度に対してフルスケール信号の振幅が最大になるように選択されています。抵抗値は、フォトダイオードの予想される最大出力電流と、フルスケール値のピーク to ピーク信号振幅である 3.0V を使用して算出されています。

$$R_{FB} = \frac{I_{DMAX}}{V_{FS p-p}}$$

抵抗算出の詳細は、光強度から電流への変換とチャンネル・ゲインの選択のセクションを参照してください。

帰還コンデンサは、帯域幅を約 1kHz に制限すると同時に、十分な位相余裕を確保できるように選択されています。トランスインピーダンス・アンプの安定性、帯域幅、およびノイズの詳細な分析については、Sensor Signal Conditioning の第 5 章を参照してください。

回路の安定性と帯域幅は、アナログ・デバイセズのフォトダイオード・ウィザード設計ツールを使用して詳細に分析できます。

ADC 用の 3.3V のリファレンスは、ADR3433 から供給されます。ADR3433 は、低ノイズ (0.1Hz~10Hz で 25 μ V p-p) で、低消費電力、高精度 (0.1%) の CMOS 電圧リファレンスです。このデバイスは動作電流 (最大 100 μ A) が低いので、低消費電力の装置での使用に適しています。

AD8502 (AD8500 のデュアル・バージョン) は ADR3433 の出力をバッファするためだけでなく、3.15V のコモンモード電圧をバッファする目的にも使用されています。3.15V のコモンモード電圧は、抵抗分圧器によって生成されます。

AD8502 は、アンプごとの最大電源電流が 1 μ A で、最大オフセット電圧が 3mV であるため、バッファに最適です。

アナログからデジタルへの変換

ADC には、AD7798 (3 つの差動入力付き、低消費電力、低ノイズ、フル機能の 16 ビット Σ - Δ ADC) が用いられています。ADC の出力コードは次式のようにになります。

$$CODE = (2^N \times AIN \times GAIN) / V_{REF}$$

ここで、

AIN は、アナログ入力電圧、

N は、ビット数。

GAIN は、計装アンプのゲイン、

V_{REF} は、外付けリファレンス電圧値です。

リファレンスが 3.3V で、GAIN = 1、N = 16 の場合、式は以下のように簡素化できます。

$$CODE = (65,535 \times AIN) / 3.3$$

この式は、ミッドスケールで 32,767 のコード、フルスケールで 65,535 のコードを生成します。

LSB サイズは、3.3V/65,536 = 50.35 μ V です。

16 ビットのときの 1LSB は、フルスケールの 0.0015%、つまり 15ppm FS です。

3.15V のコモンモード電圧は、ADC の差動入力の正入力ピンを駆動し、ADC の内部バッファがオンになっているときに起こり得るすべてのヘッドルームの問題を回避します。

また、ADC の各入力チャンネルには、ノイズを低減するためにコモンモード・フィルタと差動モード・フィルタが実装されています。コモンモード・フィルタは、1k Ω /470pF の組み合わせで構成され、カットオフ周波数が 340kHz となっています。差動モード・フィルタは、2k Ω /4.7nF の組み合わせで構成され、カットオフ周波数が 17kHz となっています。

ノイズの測定

システムの有効分解能はノイズによって決まり、一般にノイズ・フリー・コード分解能によって表されます。

表 1 に、ボード上のフォトダイオードに流れる電流がゼロのときとフルスケールのときのノイズ分布を示します。電流がゼロの場合、フォトダイオードには覆いをしました。各条件において、合計 1000 サンプルを取得しました。

表 1. 光強度がゼロのときとフルスケールのときに取得した 1000 サンプルに対するノイズ

Channel	Light Intensity	Peak-to-Peak Noise (LSBs)	Noise Free Code Resolution (Bits)
Red	Zero	1	16.0
Red	Full Scale	3	14.4
Blue	Zero	1	16.0
Blue	Full Scale	3	14.4
Green	Zero	1	16.0
Green	Full Scale	3	14.4

ノイズ・フリー・コード分解能は、次式を使用して算出できます。

$$\text{Noise Free Code Resolution} = \log_2 \left(\frac{2^N}{p-p \text{ Noise}} \right)$$

ここで、
Nは、ビット数です。
p-p Noiseは、ノイズ分布の幅です。

フルスケールのときに、テストからの最大ノイズ分布の幅は、3LSBです。式に値を代入すると、ノイズ・フリー・コード分解能は14.4ビットになります。ゼロのときのノイズは、1LSB未満です。

光強度から電流への変換とチャンネル・ゲインの選択

フォトダイオードの出力電流は、加えられた光強度に対してほぼ直線状になります。しかしながら、赤色、緑色、および青色のダイオードの相対的な感度が異なるため、各チャンネルのゲインは個別に決定して帰還抵抗を最適な値にする必要があります。

おおよそのゼロバイアス（短絡）出力電流は、光強度（照度）の関数として、フォトダイオードのデータシートから決定する必要があります。例えば、Everlight の赤色ダイオード CLS15-22C/L213R/TR8 は、100lux で 86nA、つまり、感度 $S = 86\text{nA}/100\text{lux} = 860\text{pA}/\text{lux}$ に仕様規定されています。したがって、帰還抵抗値 R_{FB} は、次式を使用して算出できます。

$$R_{FB} = \frac{V_{FSP-P}}{S \times INT_{MAX}}$$

ここで、
 V_{FSP-P} は、必要なピーク to ピークのフルスケール出力電圧振幅 (3.0V)、
Sは、データシートから読み取れる pA/lux 単位の感度 (Everlight の赤色ダイオードの場合は 860pA/lux)、
 INT_{MAX} は、フルスケールでの lux 単位の最大光強度です（直射日光では 120,000lux）。

赤色ダイオードのパラメータを式に代入すると、 $R_{FB} = 29,069\Omega$ が得られ、最も近い標準値である 28.7k Ω が赤色チャンネルの帰還抵抗として回路内で使用されています。

同様の計算を行うと、緑色チャンネルでは R_{FB} 値が 33.2k Ω になり、青色チャンネルでは R_{FB} 値が 61.9k Ω になります。

ADC コード $CODE_{ADC}$ に対応する lux 単位の光強度については、一般方程式として、現在、以下のように記述することができます。

$$\text{Light Intensity} = \left(\frac{CODE_{ADC}}{2^N} \right) \times \left(\frac{V_{REF}}{V_{FS-PP}} \right) \times 120,000 \text{ lux}$$

ここで、
 $CODE_{ADC}$ は、ADC の出力コード、
Nは、ADC の分解能 (16)、
 V_{REF} は、ADC のリファレンス電圧 (3.3V)、
 V_{FS-PP} は、ダイオードの出力電流が最大のときの、オペアンプでのフルスケールのピーク to ピーク出力振幅 (3.0V) です。

カラー・プロファイルの測定

回路内のフォトダイオードが持っている 470nm、550nm、および 620nm の狭帯域フィルタについて、それらの応答を測定するために、様々な白色光源がテストされました。

図 3 に、30cm の距離にある 3.5W の白色 LED 源に対する応答を示します。図 4 に、30cm の距離にある 10W の LED フラッド光源に対する応答を示します。更に、図 5 に、35cm の距離にある 50W の白熱光源に対する応答を示します。

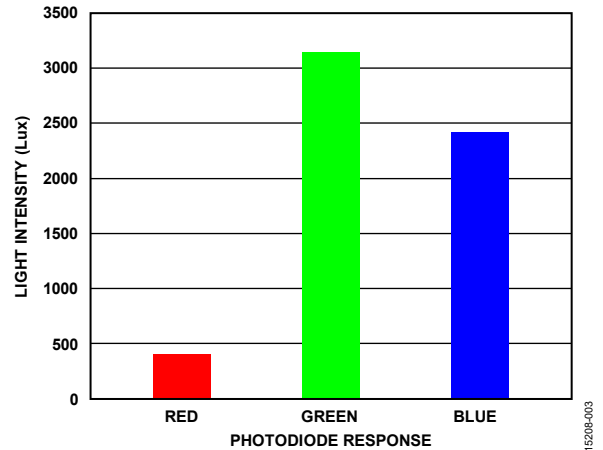


図 3. 30cm の距離にある 3.5W の白色 LED 光源による光強度

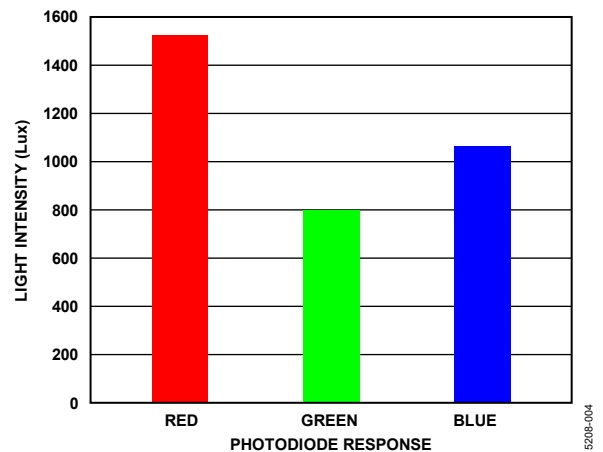


図 4. 30cm の距離にある 10W の LED フラッド光源による光強度

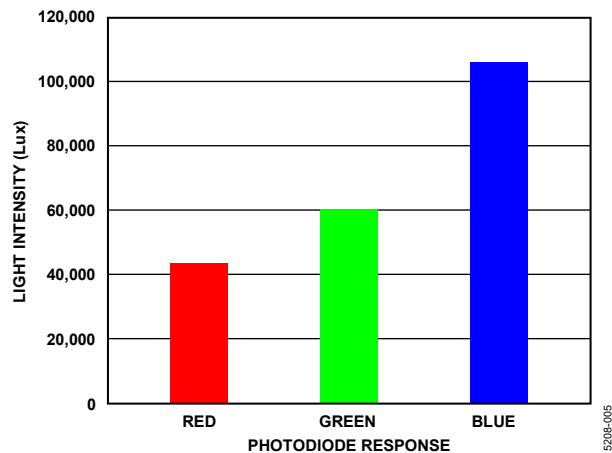


図 5. 35cm の距離にある 50W の白熱光源による光強度

ボード・レイアウト時の考慮事項

フォトダイオードの高インピーダンスの電流経路は、リーク電流の影響を受けやすいため、シールドを考慮することが重要です。シールドを効果的に動作させるには、シールドを適切なリファレンス電位に接続する必要があります（アプリケーション・ノート AN-347 シールドリングとガーディングを参照）。

ボード上の電源とグラウンド・リターン・レイアウトを慎重に検討することが重要です。プリント回路基板は、アナログ部とデジタル部を分離する必要があります。複数のデバイス間でアナログ・グラウンドとデジタル・グラウンドを接続する必要があります。この回路を使用する場合は、1点のみで接続する必要があります。すべての部品に対する電源には、0.1 μ F以上のコンデンサを使用してバイパスする必要があります。これらのバイパス・コンデンサは、デバイスに対して物理的にできるだけ近づけて配置する必要があります。コンデンサはデバイスのすぐ隣にあることが理想的です。0.1 μ Fのコンデンサには、セラミック・コンデンサなど、等価直列抵抗（ESR）が低く、等価直列インダクタンス（ESL）が低いものを選択する必要があります。この0.1 μ Fのコンデンサは、過渡電流に対してグラウンドへの低インピーダンス・パスになります。また、電源ラインをできる限り広いパターンにして、電源経路を低インピーダンスにする必要があります。最適な性能を実現するために、適切なレイアウト、グラウンディング、およびデカップリング技術を使用する必要があります（チュートリアル MT-031、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、および、チュートリアル MT-101、Decoupling Techniques を参照）。

回路図、レイアウト、部品表などの技術文書一式は、www.analog.com/CN0397-DesignSupportにある CN-0397 設計支援パッケージから入手できます。

バリエーション回路

EVAL-CN0397-ARDZ ボードには、Everlight のダイオード CLS15-22C/L213x/TR8 が実装されています。ただし、ボード上には、Hamamatsu のダイオード S7505-01 用のフットプリントもあります。このダイオードには、3種類のダイオードすべてが1パッケージに収められ、カソードが内部で接続されています。

ボード上の Everlight のダイオードを他のダイオードと交換する場合は、個別のダイオード仕様に基づいて、帰還抵抗とコンデンサも交換する必要があります。帰還抵抗とコンデンサ用のハンダ・パッドを十分に広くすると、部品の付け替えが容易になります。

消費電力と引き換えにバイアス電流を低くする場合は、最大バイアス電流が 1pA である **AD8617**、**AD8609**、および **AD8641** を使用してください。

AD7795（6チャンネル）と **AD7708**（8チャンネル/10チャンネル）も 16ビットの Σ - Δ ADC です。これらの ADC は低消費電力であり、光スペクトルをより高精度に分析するために、フォトダイオードのチャンネルを追加する必要がある場合に適しています。

回路の評価とテスト

この回路では、EVAL-CN0397-ARDZ 回路ボードと EVAL-ADICUP360 を使用しています。EVAL-CN0397-ARDZ は、Arduino 互換ピンを使用して、EVAL-ADICUP360 ボードの上部に積み重ねられています。

必要な装置

以下の装置類が必要になります。

- USB ポート付き Windows XP、Windows Vista（32ビット）、または Windows 7（32ビット）搭載 PC
- EVAL-CN0397-ARDZ 回路評価用ボード
- EVAL-ADICUP360 評価用プラットフォーム・ボード、または等価な Arduino インターフェース
- USB A-micro USB ケーブル
- ADuCM360 ソフトウェア（IDE）
- EVAL-CN0397-ARDZ サンプル・コード（CN-0397 ユーザ・ガイドを参照）

設計の開始にあたって

ツール・チェーン・セットアップ・ユーザ・ガイドに従って、サンプル・コードを ADuCM360 IDE にロードします。

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 6 に示します。

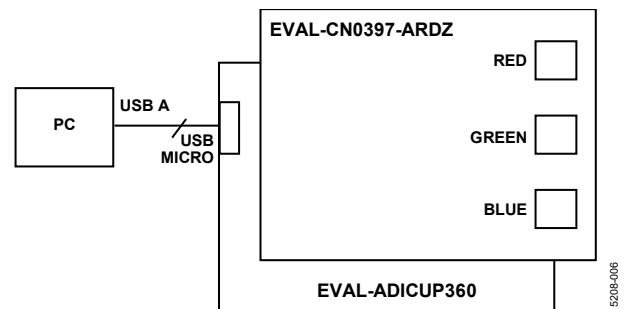


図 6. テスト・セットアップの機能ブロック図

セットアップ

表 2 に示すように、Arduino 互換ヘッダとこれに対応するヘッダを使用し、EVAL-CN0397-ARDZ を EVAL-ADICUP360 ボードの上部に取り付けることによって接続します。

表 2. EVAL-CN0397-ARDZ と EVAL-ADICUP360 ボード間の接続

EVAL-CN0397-ARDZ	EVAL-ADICUP360
ICSP	SPI
POWER	POWER
ANALOG	ADCL
DIG1	PWMH
DIG10	PWML

次に、EVAL-ADICUP360 のデバッグ・ポートとコンピュータの USB ポートの間を USB ケーブルで接続します。

テスト

サンプル・コードをビルドし、EVAL-ADICUP360 とその上部に取り付けられた EVAL-CN0397-ARDZ にロードすると、デバイスは PC と通信を行い、3つのチャンネルのそれぞれからの読み取り値が表示されます。この回路では、様々な距離にある異なる光源を使用し、各チャンネルからの読み取り値を観測することによって試験を行うことができます。

テスト・セットアップについての詳細、および、EVAL-ADICUP360 とデータ・キャプチャ用のサンプル・コードの使用方法については、CN-0397 ユーザ・ガイドを参照してください。

EVAL-ADICUP360 ボードに関しては、EVAL-ADICUP360 ツール・チェーン・セットアップ・ユーザ・ガイドを参照してください。

EVAL-CN0397-ARDZ 評価用ボードの写真を図 7 に示します。

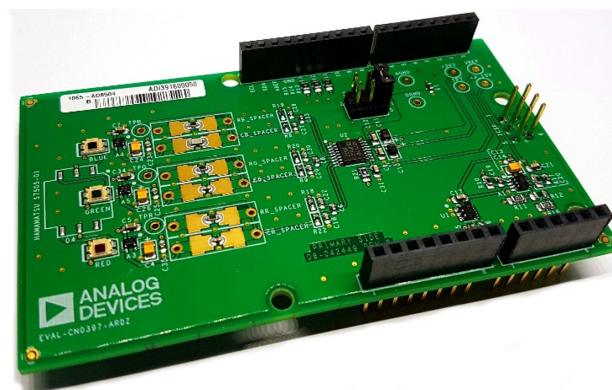


図 7. EVAL-CN0397-ARDZ 評価用ボード

15208-007

更に詳しい資料

CN-0397 Design Support Package:
www.analog.com/CN0397-DesignSupport

Analog Devices Photodiode Wizard Design Tool

Kester, Walt. Chapter 3 and Chapter 7, in *The Data Conversion Handbook*. Analog Devices, 2005.

Kester, Walt. Chapter 5, in *Sensor Signal Conditioning*. Analog Devices, 1999.

MT-015 Tutorial. *Basic DAC Architectures II: Binary DACs*. Analog Devices.

MT-031 Tutorial. *Grounding Data Converters and Solving the Mystery of AGND and DGND*. Analog Devices.

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

MT-059 Tutorial. *Compensating for the Effects of Input Capacitance on VFB and CFB Op Amps Used in Current-to-Voltage Converters*. Analog Devices.

MT-101 Tutorial. *Decoupling Techniques*. Analog Devices.

AN-347. *Shielding and Guarding*. Analog Devices.

Koning, Ross E. *Light*. Plant Physiology Information Website. 1994.

Marigold Lighting, Inc., 22 Bruce St. W., Goderich, Ontario, Canada N7A 3Z9.

データシートと評価用ボード

EVAL-CN0397-ARDZ
EVAL-ADICUP360
AD8500 データシート
AD7798 データシート
AD8502 データシート
ADR3433 データシート

改訂履歴

10/2016—Revision 0: Initial Version

「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。

©2019 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。