

# TI Designs リファレンス・デザイン PLCモジュール用16チャンネル・ステータスLEDドライバ



## TI Designs リファレンス・デザイン

TI Designsは、システムをすばやく評価してカスタマイズするために必要な、手法、テスト、デザイン・ファイルなどの基盤を提供し、開発期間の短縮に役立ちます。市場への投入期間短縮にも役立ちます。

## デザイン・リソース

[TIDA-00560](#)

[TLC5928](#)

[SN74LVC2G86](#)

[SN74LVC1G332](#)

[BeagleBone Black Wiki](#)

デザイン・ファイルを含むツール・フォルダ

プロダクト・フォルダ

プロダクト・フォルダ

プロダクト・フォルダ

BeagleBoneリソース・フォルダ



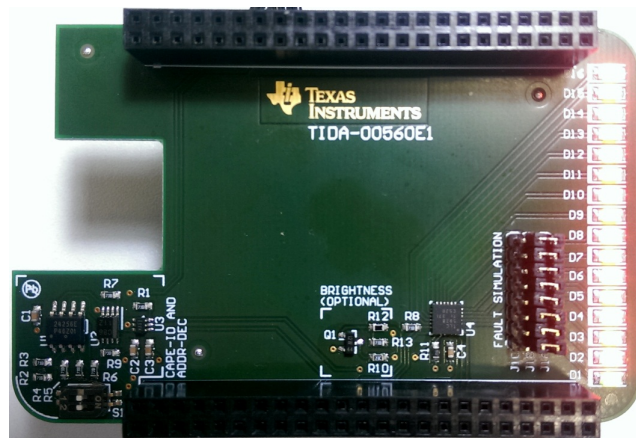
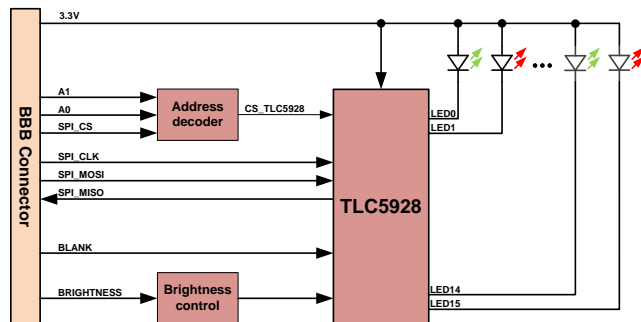
ASK Our E2E Experts  
WEBENCH® Tools

## デザインの特長

- 広範囲の定電流シンク(2mA~35mA)を備えた16チャンネル・ON/OFF・シフト・レジスタ
- 周辺光補正用にLED輝度を2レベルで設定
- 診断機能: LED開放およびLEDグラント短絡
- 標準のSPIで一般プロセッサとシームレスな接続
- 複数のLEDドライバ・デバイスをデジタイズ・チェーン接続してチャンネル数の増設が可能
- 簡易評価に適したBeagleBoneケーブルに対応(Cape: ケーブルは拡張ボード)

## 主なアプリケーション

- プログラマブル・ロジック・コントローラ(PLC)
- PLCアナログ入出力モジュール
- PLCデジタル入出力モジュール



An IMPORTANT NOTICE at the end of this TI reference design addresses authorized use, intellectual property matters and other important disclaimers and information.

## 1 主なシステム仕様

PARAMETER	SPECIFICATION	DETAILS
LED channels	Number of LED channels: 16	See TLC5928 data sheet (SBVS120)
$V_{CC}$	Supply voltage range: 3.0 V to 5.5 V	See 5.1.1
$I_{LED}$	Brightness signal low or high: 2 mA or 5 mA	See 5.1.3
$I_{CC}$	$I_{CC}$ (LEDs off), 3.3 V, no data transfer: 0.535 mA $I_{CC}$ (LEDs on, 2 mA), 3.3 V, no data transfer: 31.89 mA $I_{CC}$ (LEDs on, 5 mA), 3.3 V, no data transfer: 79.9 mA	See 8.3.4
Luminous intensity	Red: 20 mcd at 2 mA, 50 mcd at 5 mA Green: 4 mcd at 2 mA, 10 mcd at 5 mA	See 4.1.3 See 5.1.3
HW brightness control	Changing forward current in two steps	See 5.1.3
LED fault simulation	LEDs D1-D8	See 5.1.4
システム制御	Any host processor using serial peripheral interface (SPI) or general purpose input and output (GPIO)	See 7
Board integration	Compatible with BeagleBone Cape specification	See 5.2
Operating conditions	-40°C ~ +85°C	See TLC5928 data sheet (SBVS120)

## 2 システム概要

TIDA-00560 TI Designでは、アナログまたはデジタルのPLC入出力モジュールなどの多チャンネルのシステムで必要となる、最大16個までのLEDを独立に制御する方法を説明します。コア・コンポーネントの基板領域が非常に小さく、またLEDドライバの標準インターフェイスを搭載しているため、小型モジュールの中にシームレスに組み込むことが可能です。

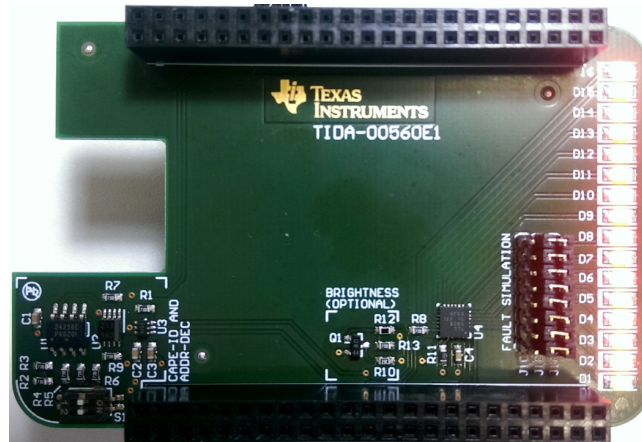


図 1. TIDA-00560基板の外観

### 2.1 TLC5928

TLC5928[1] TI Designの主要部は、障害検出機能付きの16チャンネル定電流LEDドライバです。1電流は1個の抵抗を使用して選択でき、2mA～35mAの範囲で設定可能です。チャンネル間の電流精度は1% (標準値) です。デジタイ・チェーン接続機能により、複数のTLC5928をカスケード接続可能です。デバイス間の電流精度も1% (標準値) です。デジタル部は3.0V～5.5Vの範囲で動作しますが、電流シンク入力電圧は最大17Vまで対応、電流シンク毎に直列接続した複数のLEDをサポートします。専用のBLANKピンを使えば、SPI通信を行わずに全LEDをすばやく消灯することが可能です。

### 3 ブロック図

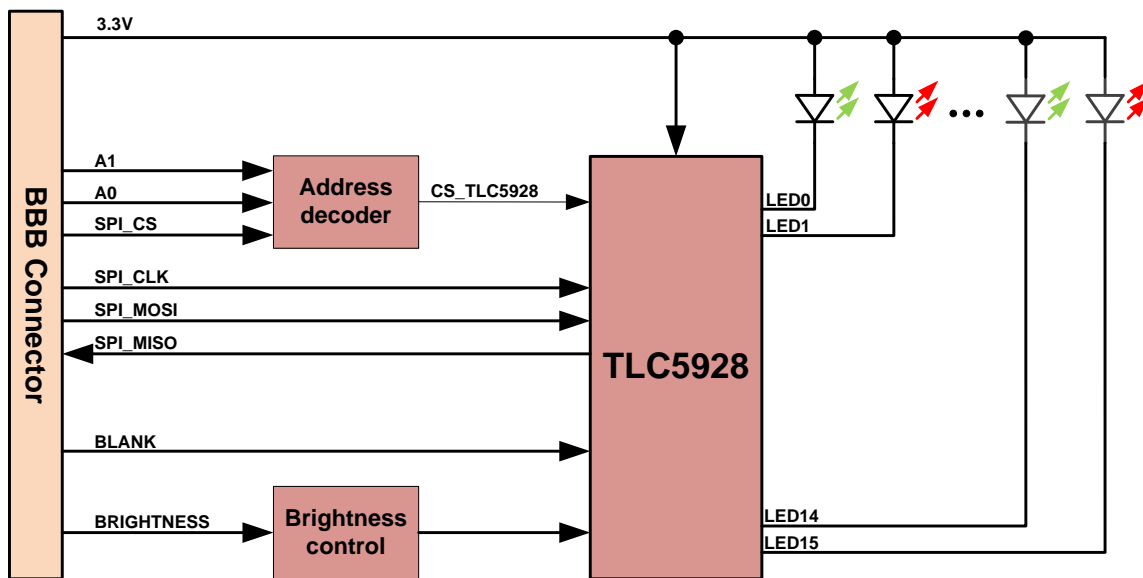


図 2. TIDA-00560 ブロック図

#### 3.1 使用製品

16チャンネルLEDドライバのTI Designには、以下のデバイスが使用されています。

- TLC5928
  - 16チャンネル、定電流シンク出力
  - 35mA対応 (定電流シンク)
  - 高速の定電流スイッチング過渡時間: 10ns
  - LED電源電圧: 最大17V
  - $V_{CC} = 3.0\text{ V to }5.5\text{ V}$
  - 定電流精度:
    - チャンネル間 =  $\pm 1\%$
    - デバイス間 =  $\pm 1\%$
  - SPIデータ転送レート: 35MHz
  - 読み取り可能なエラー情報
    - LED開放検知 (LOD)
    - LEDグランド短絡
    - プリサーマル警告
    - 動作温度:  $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$

図 3 に、TLC5928デバイスのブロック図を示します。

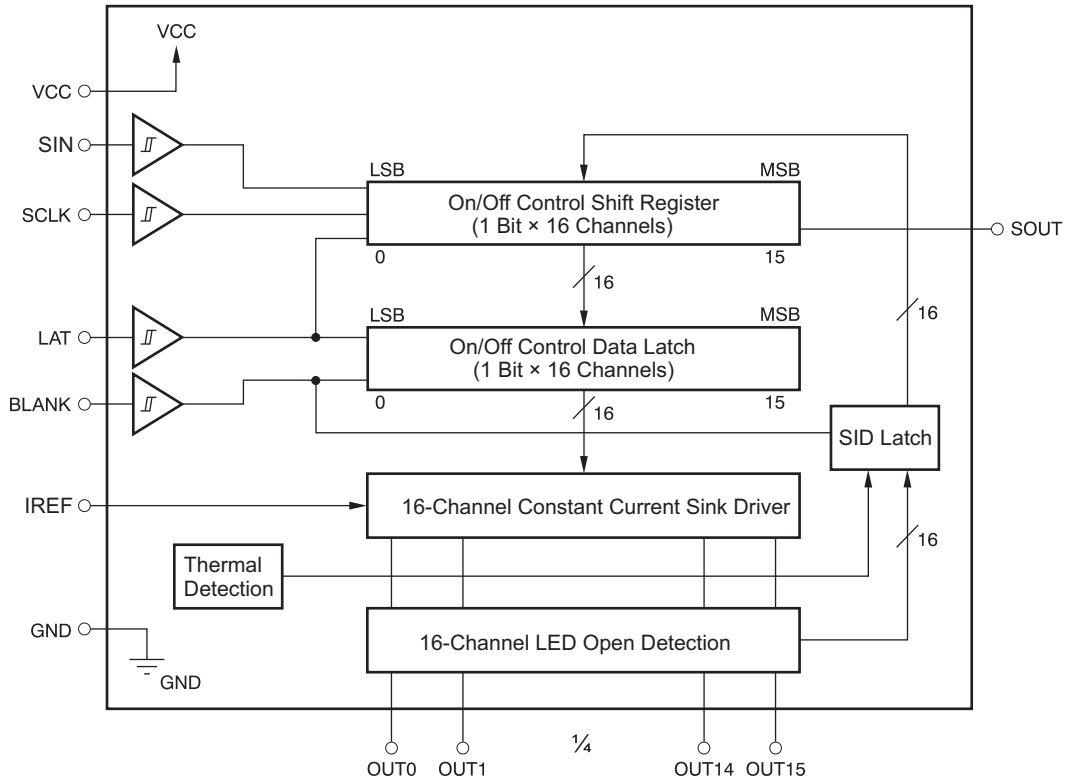


図 3. TLC5928ブロック図

詳細については、[www.ti.com/product/tlc5928](http://www.ti.com/product/tlc5928)で該当する製品フォルダをご覧ください。

## 4 システム設計理論

### 4.1 LED駆動方式

設計者はさまざまなLED駆動方式を使用しています。システム環境と性能要件で使用すべき方式が決まります。例えば、電圧があることだけをLED表示し、実際の輝度には補助的な意味しか持たない場合は、LEDは監視対象電圧に直列抵抗を介して接続するだけです。しかし、輝度制御が必須な場合、この方法では不十分です。それぞれの方式の特徴を適切に理解できるようにするため、以下、LEDの特性について簡潔に説明します。

すべてのLEDには(そして他の種類のダイオードにも)、図4で示すようなV-I特性が存在します。例として、図4には、本TI Designで使用されているWurth Elektronik社のLED(製番150120VS75000)の曲線を示しています。

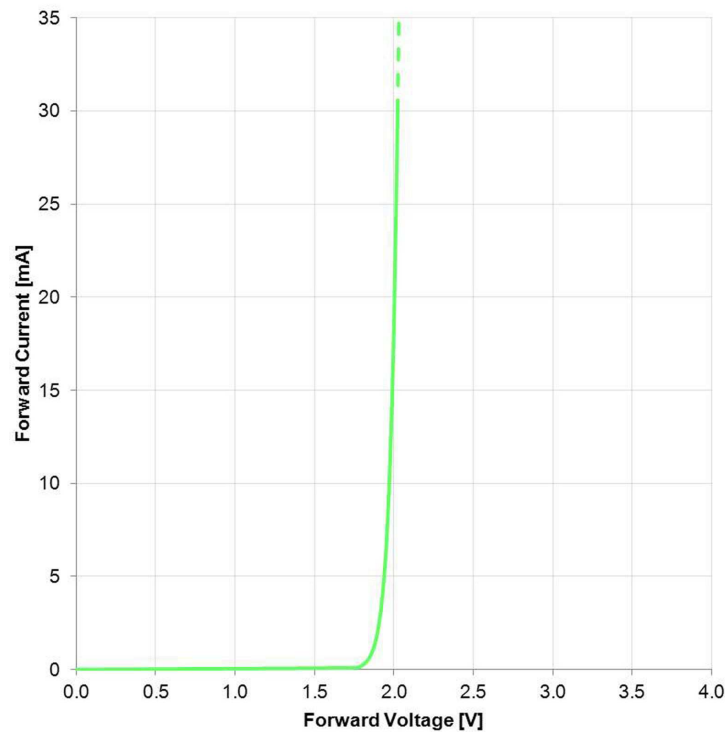


図 4. LEDの順方向V-I特性

ここで関心のある領域(この場合1.9V~2.0V)のカーブが急峻であることを考えると、順方向電圧のわずかな変化で、順方向電流が大きく変化することがわかります。電圧を直接設定するのではなく、電流を注入し、その結果として電圧を変化させた方が現実的です。順方向電流と光度の間にはほぼ線形な関係(図5参照)が成り立つため、順方向電流の設定によっても輝度をうまく制御することが可能です。

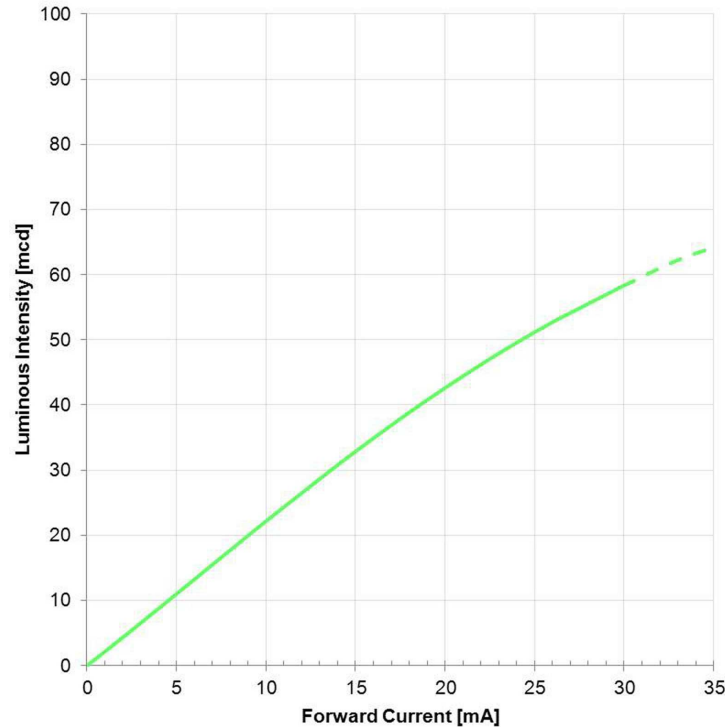


図 5. 順方向電流 対 光度の曲線

#### 4.1.1 GPIOを使った単一LEDの駆動

LEDを最も簡単にON/OFFさせるには、汎用入出力 (GPIO)ピンを用品用(図6参照)。

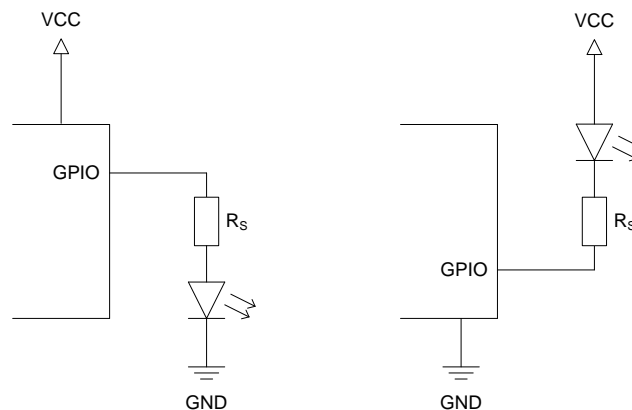


図 6. GPIOを使ったLED駆動

GPIOを使ったLED駆動抵抗値は式 1 で計算します。

$$R_S = \frac{V_{GPIO} - V_{LED}}{I_{LED}} \tag{1}$$

しかし、以下のような理由のため、を正確に計算することはできません。

- 電流 $I_{LED}$ が流れる時の電圧 $V_{LED}$ には製造上のばらつきがある。
- 電圧 $V_{GPIO}$ は電流により変化する

これらの理由に加えて、計算された値を持つ $R_S$ が入手できない場合もあります。一番近い値の抵抗を使用しても、誤差が生じます。一番近い値の抵抗を使用しても、誤差が生じます。

マイクロコントローラやマイクロプロセッサの標準的なGPIOは、ハイサイドとローサイドのMOSFETのオン抵抗 $R_{DS(ON)}$ が最適化されておらず、大電流を流すようには設計されていません。MOSFETを流れる電流が増加すると、ソースドレイン間の電圧降下が大きくなり、GPIOピンの電圧が変化します。デバイスのデータシートには通常、この特性が明記されています。例として、図 7 (シンク電流)と図 8 (ソース電流)に、低消費電力マイコンMSP430G25532のグラフを示します。

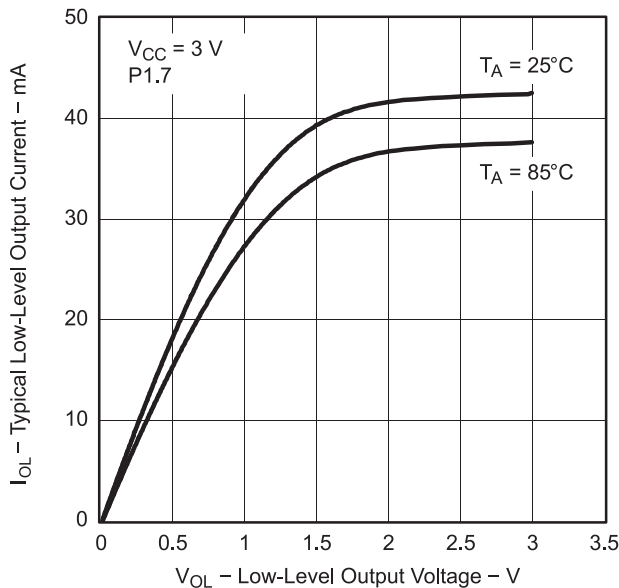


図 7. 電流シンク時の電圧変化

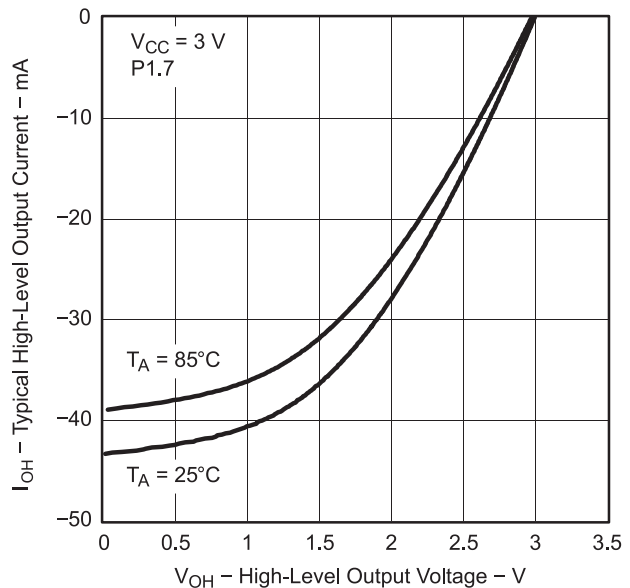


図 8. 電流ソース時の電圧変化

注意深く見ると、ある電流値に対する電圧変化が同じでないことに気づくでしょう。温度25°Cの時の曲線で30mAの点を見てみると、ローサイドMOSFETにより発生しているグラウンド・シフトは約0.9Vです (図 7参照)。一方、同じ電流値に対してハイサイドMOSFETにより発生している電圧降下は、 $3.0V - 1.9V = 1.1V$ 程度です。(図 8参照) 電圧降下のこの差は、図 6の右の回路の方が左の回路よりもやや優れていることを意味します。電圧降下をより適切に制御したい、あるいは大電流を駆動する必要がある場合は、外付けMOSFETの使用を推奨します。

#### 4.1.2 GPIOを使った複数LEDの駆動

4.1.1で概要を説明したソリューションでは、LEDチャンネル毎にGPIOが1つ必要です。駆動する必要があるLEDの個数が利用可能なGPIO数よりも多い場合は、GPIOエクスパンダを実装することができます。通常、エクスパンダには、入力として標準シリアル・インターフェイスが、出力として複数のGPIOが備わっています。この種のデバイスのシリアル・インターフェイスには、通常、I<sup>2</sup>Cバスを使用します。I<sup>2</sup>Cバスは複数デバイス(メモリ、センサなど)で共有可能であり、GPIOを追加してもピンを増やす必要がありません。PCF8574 デバイス [3]はこの良い例です。



GPIOを追加するもう1つの方法は、SPI互換のシリアル・ポートを持つSN74HC5954のような標準ロジック・デバイスを使用する方法です。8ビットの出力値をクロックでシフト・レジスタにシリアル入力し、別の信号でストレージ・レジスタに転送します。それによって、新しいデータが到着している間にGPIOの状態が意図せず変化するのを避けることができます。

#### 4.1.3 内蔵電流ソースによるLEDの駆動

もっと効率的にLEDを駆動する方法は、電流ソースを用いたLED制御方式です。順方向電圧は電流を注入した結果として得られるため、電流ソースは期待される順方向電圧を提供できる必要があります。高電圧に対応すれば、LEDを複数、直列に接続し、同じ輝度を保つことが可能です。これらのLEDにはすべて同じ電流が流れるためです。

電流ソースは少数の部品で作成可能ですが、複数チャンネルに対応するには、部品表(BOM)も実装面積も増大します。IDA-00560 TI Designでは、TLC5928デバイスによって複数チャンネル対応の電流駆動型LEDの設計が簡単になることを示しています。

電流ソースの電流制限は、TLC5928デバイスの外付け抵抗により設定されます。電流制限を設定する式は、次の式 2により計算できます。

$$R_{IREF} = \frac{V_{IREF}}{I_{LED}} \times 42 \quad (2)$$

$V_{IREF}$ を1.2Vに固定すれば、R-I曲線を計算できます。図 9に、LED電流全対応領域(2mA~35mA)のグラフを示します。

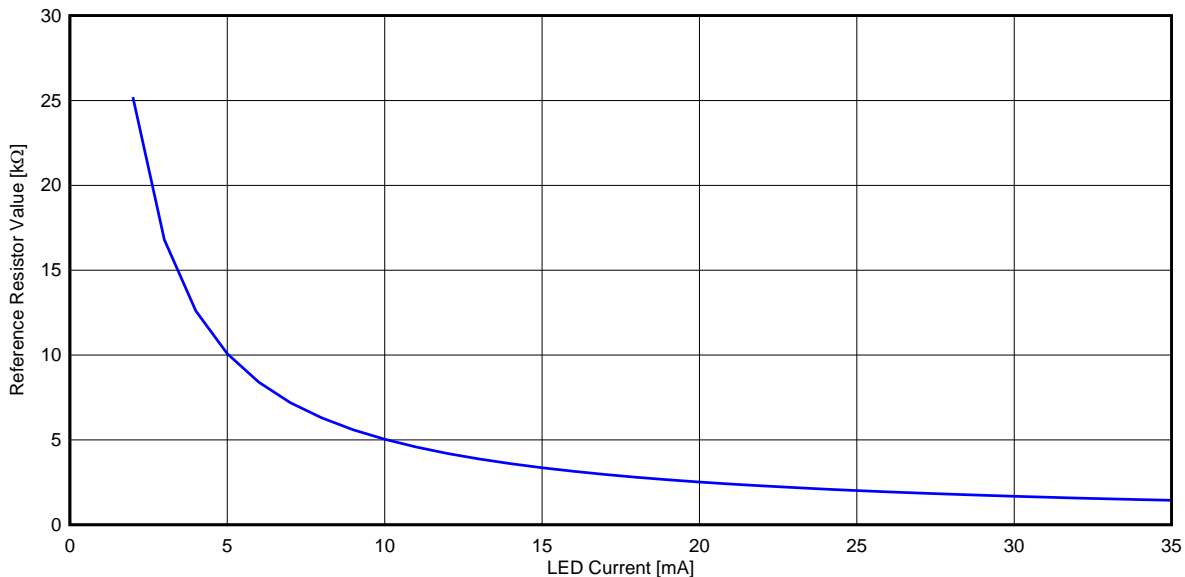


図 9. LED電流と抵抗値

#### 4.1.4 基板領域

TIDA-00560デザインで重要なもう1つの点は、ソリューションで必要となる実装面積です。本設計は、BeagleBone ケープに記載された仕様に機械的には準拠していますが、実際のLEDドライバのソリューションはもっと小型化することが可能です。TLC5928デバイスは、4mm×4mmのQFN-24パッケージで供給され、最低限必要となる追加部品は電流制限抵抗とバイパス・コンデンサです。LEDには追加抵抗は不要ですので、上記で説明した選択枝の中で、本デザインは、部品表が最小で物理的に一番コンパクトな設計となります。

## 5 ハードウェアの概要

### 5.1 TI Designの実行

TIDA-00560 TI Designは、BeagleBone Blackケーブルで動作するよう設計されていますが、それ以外のプロセッサとも、SPIを使用した接続または使用しない接続 (GPIOでエミュレーションが必要) が可能です。表 1に、ヘッダJ8とJ9のピン配置を示します。

表 1. ピン配置 (ケーブル-Ax は拡張ボード)

PIN ON BOARD	SIGNAL	DESCRIPTION	MANDATORY FOR OPERATION
J8.11	CAPE_A1	Cape address decoding	No
J8.12	CAPE_A0	Cape address decoding	No
J9.19	I2C_SCL	Cape identification	No
J9.20	I2C_SDA	Cape identification	No
J9.25	BRIGHTNESS	Brightness adjust	No
J9.27	BLANK	Blank signal	Yes
J9.28	SPI_CS	SPI chip select	Yes
J9.29	SPI_MISO	Data from TLC5928	Only for diagnostics
J9.30	SPI_MOSI	Data to TLC5928	Yes
J9.31	SPI_SCLK	SPI shift clock	Yes

信号CAPE\_A0とCAPE\_A1は、抵抗R7とR9 (図 14参照) によってプルアップされています。アドレス・デコード回路を正常動作させるには、信号CAPE\_A0とCAPE\_A1が供給されないとき、S1スイッチを2つともオフにする必要があります。それによって、(S1で設定される) I<sup>2</sup>C アドレスがCAPE\_A0/CAPE\_A1のアドレスと一致すると、SPIチップ選択 (CS) 信号がTLC5928に送信されるようになります。

BeagleBoneケーブルで指定された仕様に関連して、オプションでI2Cバスが必要です。これについては、5.2で詳しく説明します。ただし、この機能は正常動作のために必ずしも必須ではありません。

BRIGHTNESS信号はオプションで、デフォルトのLED電流を2mA (BRIGHTNESSがLow時) か5mA (BRIGHTNESSがHigh時) のどちらかを選択します。この信号を与えない場合、LED電流は2mAだけに対応します。

TLC5928デバイスの診断機能 (LED開放、LEDのグランド短絡、および過熱) はオプションです。信号SPI\_MISOは、不要な場合、省略可能です。

TIDA-00560デザインを正常に動作させるには、最低でも、3線式SPIとBLANKピンが必要です。

### 5.1.1 電圧範囲

TLC5928には、2つの異なる電源電圧が必要です。

- $V_{CC}$ : 3.0V~5.5V
- $V_O$ : 最大17V

TL5928を動作させるデジタル環境では、 $V_{CC}$ 電圧は一般的には3.3Vです。 $V_O$ をこれと同じ電圧で動作するよう設定すれば、第2の電圧レールが不要になるので効率的です。従って、このデザインに必要な  $V_O$ の最低電圧を確認しましょう。対応する電圧範囲を得るには、TLC5928の各電流シンクで、シンク電流を適正に調整するためにOUTxピンである程度の電圧降下が必要になることを理解しなければなりません(図 10を参照)。

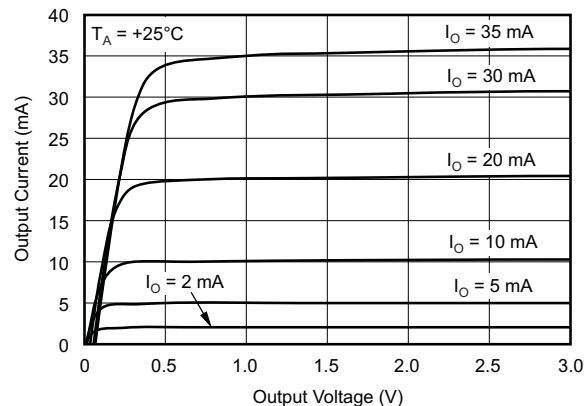


図 10. 安定した電流レギュレーションのために必要な電圧降下

図 10 には、電圧降下の大きさがターゲットのシンク電流に依存することが明確に示されています。本TI Designは、2mAと5mAのシンク電流用に最適化されています。図 10からわかるとおり、レギュレーションは約0.5Vの電圧降下で安定しています。LEDの動作点での電圧降下( $V_{LED}$ )を加算(控え目に見積もって2.0V、図 4参照)すると、 $V_O \geq 2.5$  Vが必要となります。PLC I/Oモジュールで使用される、(青色または白色LEDと比べて)比較的低い順方向電圧を有するカラーLEDは、この点では有利です。この結果、本デザインはTLC5928の3.3Vターゲットを含むデジタル電圧 ( $V_{CC}$ )フルレンジで動作します。

最小 $V_O$ ( $V_{O\_MIN}$ )と印加された $V_O$ との電圧差は、電流シンクで消費される必要があるため、消費電力が増えます。印加された $V_O$ が $V_{O\_MIN}$ に近いほど、結果は良好になります。 $V_O$ 用の電圧レールをただ新規に作成することは不経済かもしれませんが、 $V_{O\_MIN}$ に近い電圧レールが利用できる場合には、回路の電力消費を最小限に抑えるため、この電圧レールの使用を検討すべきです。

### 5.1.2 消費電力

回路を入念に設計する際には、消費電力を計算し、必要に応じて適切な措置を取らなければなりません。使用するQFN-24パッケージには1615mW(85°C)の放熱能力があります。与えられたパラメータに対するTLC5928デバイスの最大電力は、式 3で計算されます。

$$P_{D\_MAX} = 16 \times (V_{OUT} \times I_{LED}) + V_{CC} \times I_{CC\_MAX(est)}$$

$$P_{D\_MAX} = 16 \times ((3.3 \text{ V} - 2.0 \text{ V}) \times 5 \text{ mA}) + 3.3 \text{ V} \times 5 \text{ mA}$$

$$P_{D\_MAX} = 120.5 \text{ mW} \tag{3}$$

本デザインのA  $P_{D\_MAX}$ は120.5mWであり、1615mWの上限よりずっと下です。この数値は、半田付けしたPowerPADを使用した場合に適用されます。TIでは、正常な放熱と機械的安定性のためにPowerPADを必ず半田付けするよう強く推奨しています。

### 5.1.3 輝度制御

出力チャンネルの電流制限は、IREFピンとグラウンドの間に接続する1個の抵抗によって設定します。TIDA-00560 TI Designでは、2段階の輝度制御オプションを提供します。この方法は、HDC1000 [5] などの周辺光センサと連動して、周辺光の変化を補正するために有効です。図 11 に回路を示します。

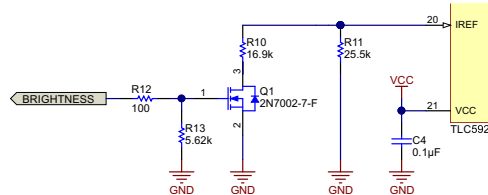


図 11. 輝度回路

標準構成では、デジタル信号BIGHTNESSはLowで、Q1は非導通状態です。TLC5928デバイスのIREFピンは、GNDとはR11だけで接続されています。25.5kΩの抵抗値によって、各チャンネルの電流制限を約2mAに設定します。BIGHTNESSがHighになると、Q1は導通状態になり、R10がR11と並列に接続されます。この結果、TLC5928デバイスに与えられる抵抗値は約10.16kΩになります。この場合、電流制限は約5mAまで上昇します。

### 5.1.4 障害検知のシミュレーション

LEDのスイッチングに加え、各電流シンクのLED開放またはグラウンド短絡を監視することが可能です。TLC5928 デバイスは、各OUTxピンからグラウンドへの電圧降下を内部で検知しています。公称電圧が300mV未満の場合、デバイスは障害と見なされ、SPI通信中にMISOライン経由でプロセッサに障害を通知します。この障害条件は2つとも、このTI Designでテストできます(図 12 参照)。

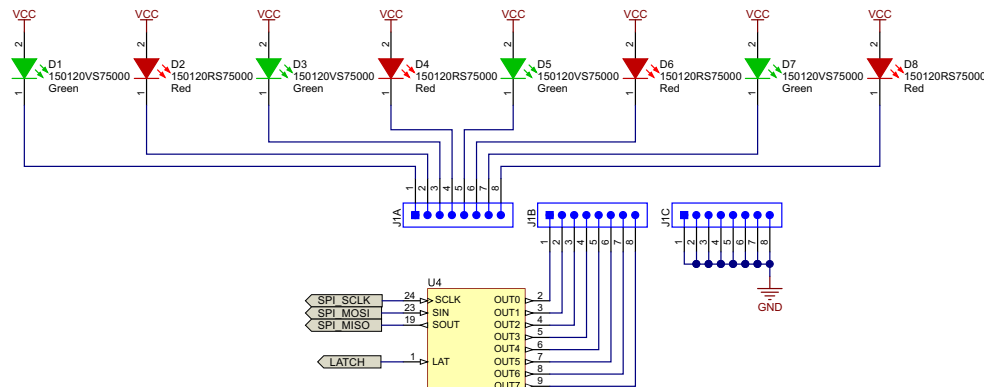


図 12. 障害シミュレーション

全16チャンネルが、LED開放とグラウンド短絡機能をサポートしています。ただし、TIDA-00560 TI Designでは、最初の8チャンネル(OUT0からOUT7まで)だけでこの機能が利用できます。OUT0(D1)に対する挙動を調べますが、他の7チャンネルでも同様です。デフォルトのジャンパー設定は、J1A.1をJ1B.1とショートし、D1のカソードとTLC5929 デバイスのOUT0ピンを接続します。ジャンパーを挿入しない場合、LED開放障害がシミュレーションされます。そして、J1B.1とJ1C.1をショートすると、OUT0ピンがGNDに接続され、グラウンド短絡障害がシミュレーションされます。さらに、16ビット・ステータス・ワードの全ビットを1に設定すれば、TLC5928 デバイスは過熱状態も検出できます。

## 5.2 BeagleBoneケーブル(拡張ボード)のコンセプト

TIDA-00560 TI Designは、BeagleBoneケーブルのコンセプトに対応しています。このデザインにより、BeagleBoneおよびBeagleBone Blackの開発プラットフォームとシームレスに接続し、簡単に評価することができます。実装されたハンドシェイク機構により、デバイス・ツリー・オーバーレイ・ファイルを用いて、BeagleBoneのGPIOを自動調整することが可能です。各ケーブルに必須のハードウェアは、ケーブルに関する情報すべてを格納したEEPROMです。このEEPROMは、BeagleBoneプラットフォームで使用されるAM3359デバイス[6]のI<sup>2</sup>Cシリアル・インターフェイスと接続されます。Linux起動時に、AM3359デバイスは、拡張ケーブル基板が存在するかどうか、0x54から0x57までのアドレス範囲をスキャンします(一度に最大4つのケーブルをサポートできるため)。アドレスは、スイッチS1で選択されます。表 2にそのマッピングを示します。

表 2. S1から I<sup>2</sup>C アドレスへのマッピング

I <sup>2</sup> C ADDRESS	S1.1	S1.2
0x54	On	On
0x55	Off	On
0x56	On	Off
0x57	Off	On

図 13 に、ケーブル識別回路を示します。このEEPROMはプロテクトされていません。つまり、常時書き込み可能ということです。

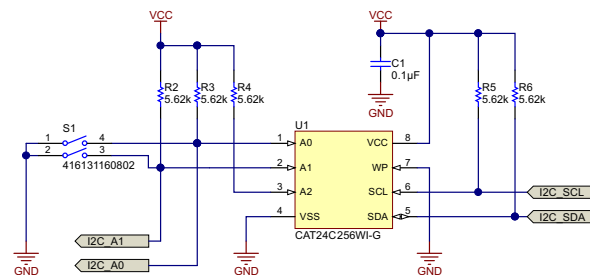


図 13. ケーブルの識別

TIDA-00560 TI Designの基板を4枚搭載したシナリオを考えてみましょう。TLC5928デバイスはすべて同一のSPIポートに接続され、AM3359はデバイスを区別することができません。本デザインでは、この問題の解決のため、SPI CS信号用にアドレス・デコード回路を追加で実装しました。SPIのSPI CS信号は、CAPE\_A0(UJ8.12)信号がI20\_A0信号(S1.1で設定)と一致し、CAPE\_A1(J8.11)信号がI20\_A1信号(S1.2で設定)と一致する場合だけ、TLC5829にLATCH信号として送信されます。アドレスが一致しない場合でもSPI\_SCLKおよびSPI\_MOSI信号はTLC5928デバイスに到達しますが、SPI CSがHighのままであるため影響しません。さらに重要な点として、このアドレス・ロジックでは、一度に1つのTLC5928デバイスだけがSPI\_MOSI信号を駆動することが保証されます。

2つ以上の出力を駆動すると、(SPI\_MOSIに接続されている)TLC5829のDOOUTピン出力バッファを破壊する可能性があり、最悪の場合、これは回復不可能な損傷となります。図 14を参照してください。

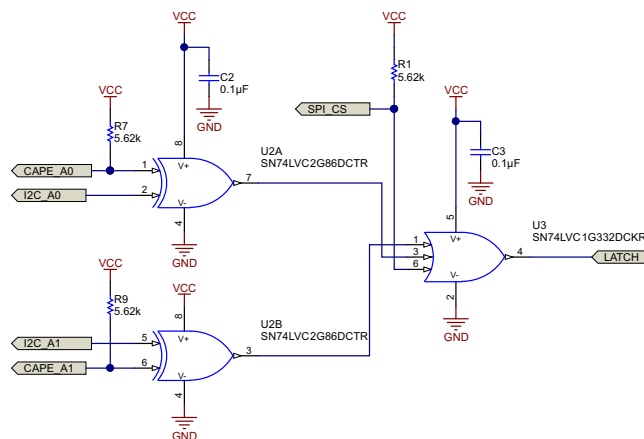


図 14. アドレス・デコーダ回路

BeagleBoneケーブルの全仕様は、*BeagleBone Black System Reference Manual* [7]に記載されています。

## 6 ファームウェアの概要

### 6.1 ソフトウェアの流れ図

デザインをテストするため、MSP430G2553デバイス用の簡単なプログラムを作成しました。このプログラムは、TLC5928デバイスに必要な16ビット双方向SPIのエミュレーションで主に構成されます。ピン配置、タイミング、移植性に関して最大限の柔軟性を確保するため、全信号はGPIOを用いて生成します。ソフトウェアの流れ図は、次の図15を参照してください。

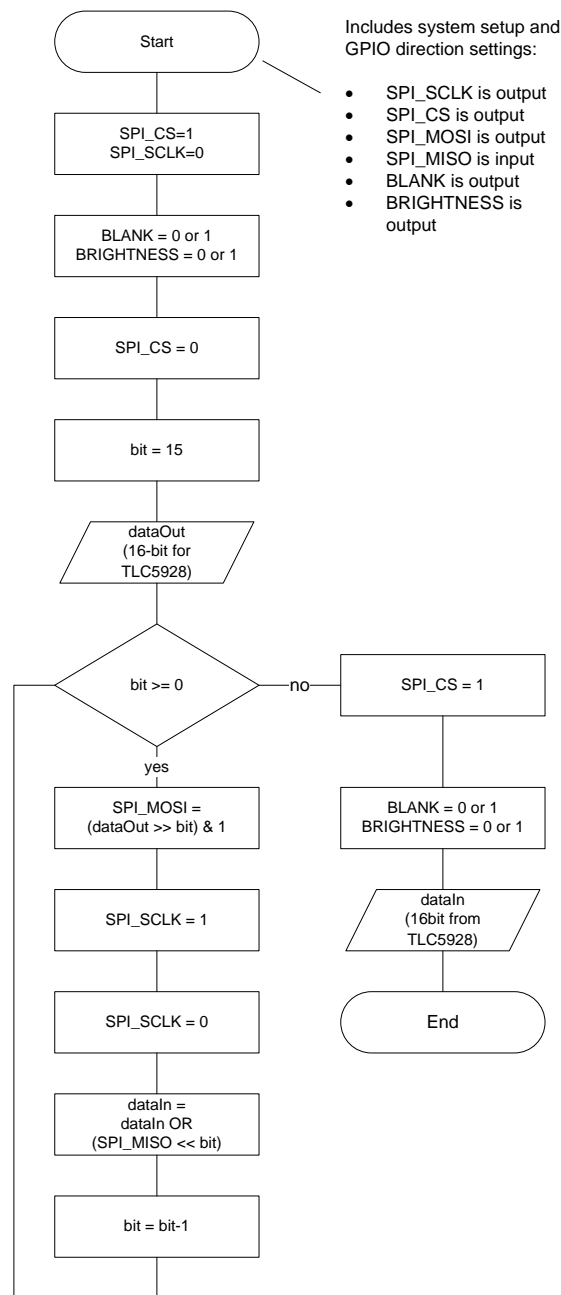


図 15. ソフトウェアの流れ図(テスト・プログラム)

## 7 テスト構成

図 16 に、テスト構成を示します。

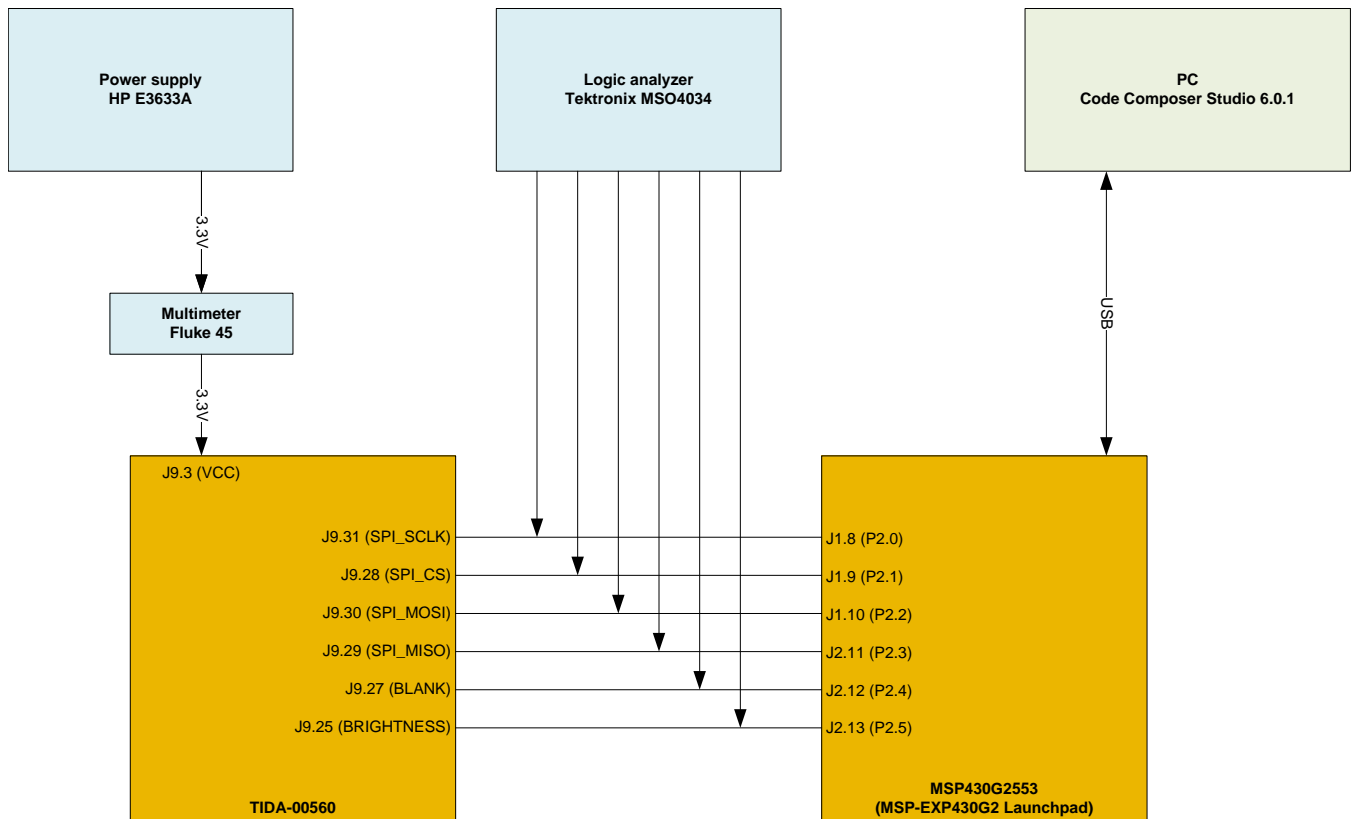


図 16. テスト構成



## 8 テスト・データ

### 8.1 通常動作

図 17 に、ホストからTLC5928デバイスへの標準的なデータ送出法を示します。大半のプロセッサは、16ビット標準SPIに対応しています。データ・ビットは、SCLKの立ち上がりエッジでサンプリングされ送出されます。転送を行わない場合は、SCLKはLowでアイドル状態になります。このデータ送出法で、最高35MHzまでのデータ・レートに対応します。

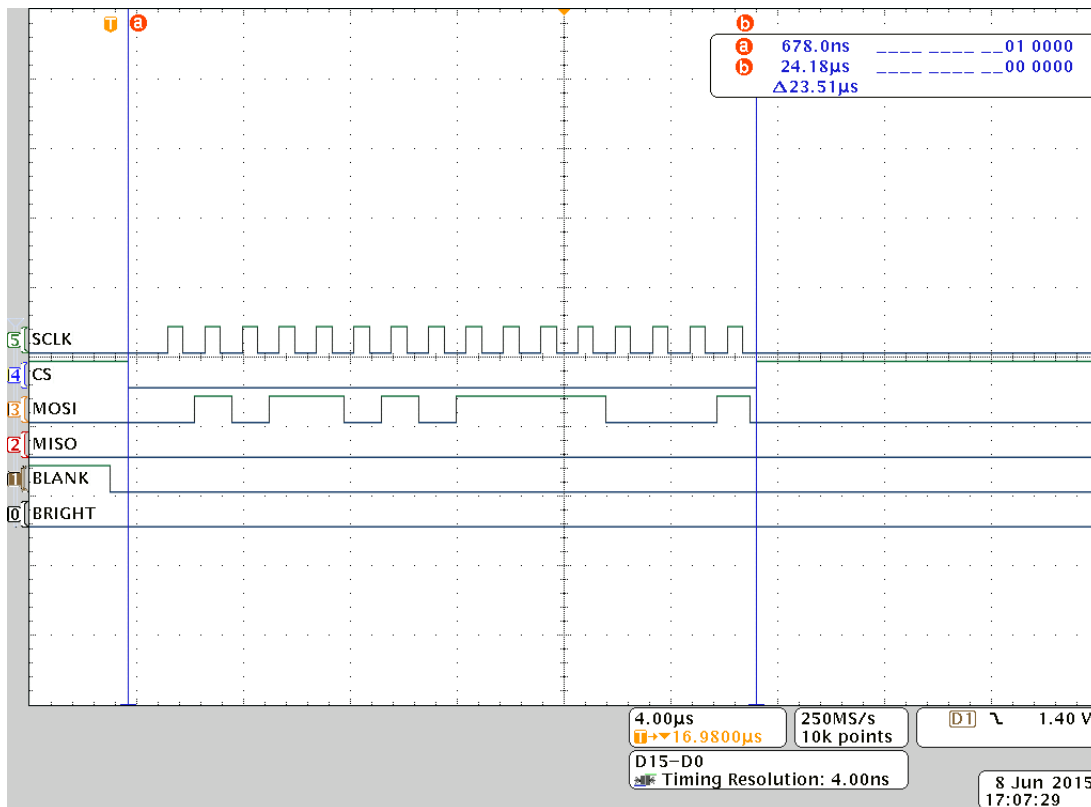


図 17. 通常動作

### 8.2 LED開放およびLEDグランド短絡

この節では、LED開放とLEDグランド短絡の検出機能について説明します。これらの状態をどうシミュレーションするかを理解するには、5.1.4をご覧ください。表 3に、テスト構成(LEDとの接続とLEDが駆動されているかどうか)を示します。表 3に示されていないD9からD16までのLEDは、すべてオンです。

表 3. 障害シミュレーション条件

DIODE	J1 JUMPER	CURRENT SINK	SIMULATED FAULT	RESULT	COMMENT
D1	J1A.1–J1B.1	On	None	No error	Normal operation
D2	J1A.2–J1B.2	On	None	No error	Normal operation
D3	J1A.3–J1B.3	Off	None	No error	Current sink off
D4	No jumper	Off	Open	No error	Current sink off
D5	J1B.5–J1C.5	Off	Short	No error	Current sink off
D6	J1A.6–J1B.6	On	None	No error	Normal operation
D7	No jumper	On	Open	Fault	Open detected
D8	J1B.7–J1C.7	On	Short	Fault	Short detected

TLC5928データシートで説明されているように、障害は次の条件が成立した場合にのみ通知されます。電流シンクがイネーブルで、かつ、BLANKがLow、かつ、障害イベントが検知された場合。

図 18でLED D3、D4、D5、D7、D8を消灯する場合のジャンパー設定を表 3に示します。

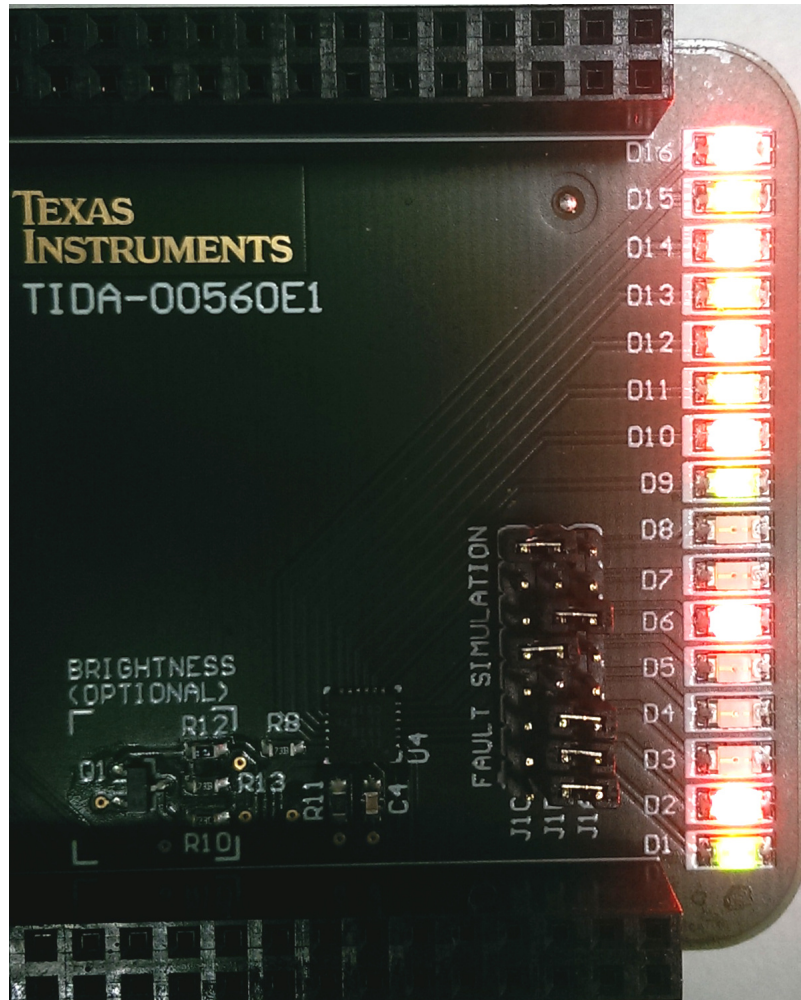


図 18. 障害シミュレーションの結果

MISOラインは、MOSIライン経由で新しいデータがTLC5928へクロックインされたときの各LEDの状態を示します。  
 図 19には、連続する4回の転送を使った障害事例を示しています。表 4には各転送の詳細を示しています。

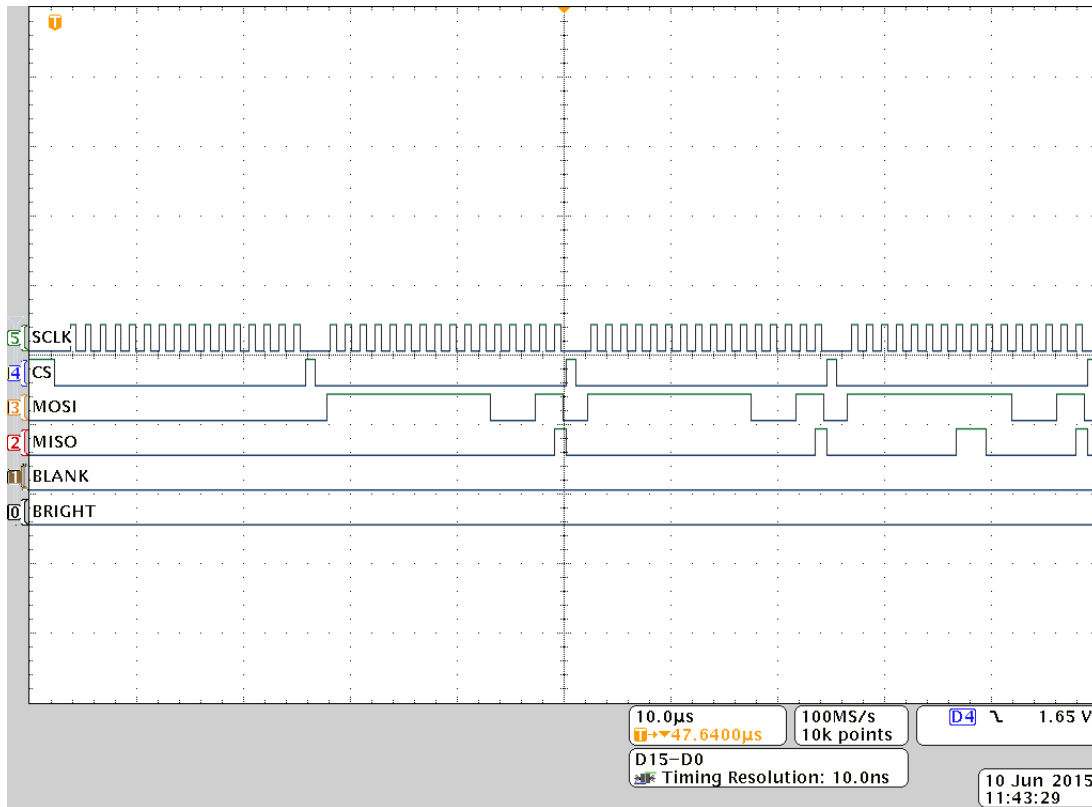


図 19. 障害シミュレーションーデータ転送

既に述べたように、SCLKの立ち上がりエッジで新しいデータが送られ、同時にデータがラッチされます。ある転送でのSCLKの最後の立ち上がりエッジで、(D1からの)最後のステータス・ビットがラッチされます。その最後のステータス・ビットがラッチされた後、TLC5928は(現在の転送でのSCLKの最初の立ち上がりエッジでラッチされた)D16の新しい値をMISOラインに送出します。1回目の転送ではこのパルスが存在しないことから、この理論が正しいことがわかります(D16がHighにセットされた、連続した転送では、このパルスが存在します)。この挙動は、ホストの読み出しには影響を与えません。SCLKの最後の立ち上がりエッジの後にだけデータが変わるからです。

表 4. 障害シミュレーションーデータ転送

TRANSFER	MOSI	MISO	FAULT SENSING
1	LEDs off	No fault reported	No fault
2	D1–D2 on	No fault reported	No fault (LED data from MOSI updated at rising CS)
	D6–D16 on		
3	D1–D2 on	No fault reported	LED faults detected (faults latched at rising CS)
	D6–D16 on		
4	D1–D2 on	Fault reported	LED faults detected (latched faults transmitted)
	D6–D16 on		

図 20 に、SCLKとMISOのエッジの関連を示すため、4回目の転送におけるSCLKの第8、第9、第10サイクルを拡大した画面を示します。TLC5928では、SCLKの立ち上がりエッジ後、ホールド時間が終了するとすぐに次のデータ・ビット値に変化することがわかります。エラーはSCLKの第9、第10サイクルで通知されています。この一連のイベントは、LED D8とD7にアサインされたTLC5928のOUT7ピンとOUT6ピンに対応します。表 3と図 18から、これらのピンで障害が通知されることが予想されます。

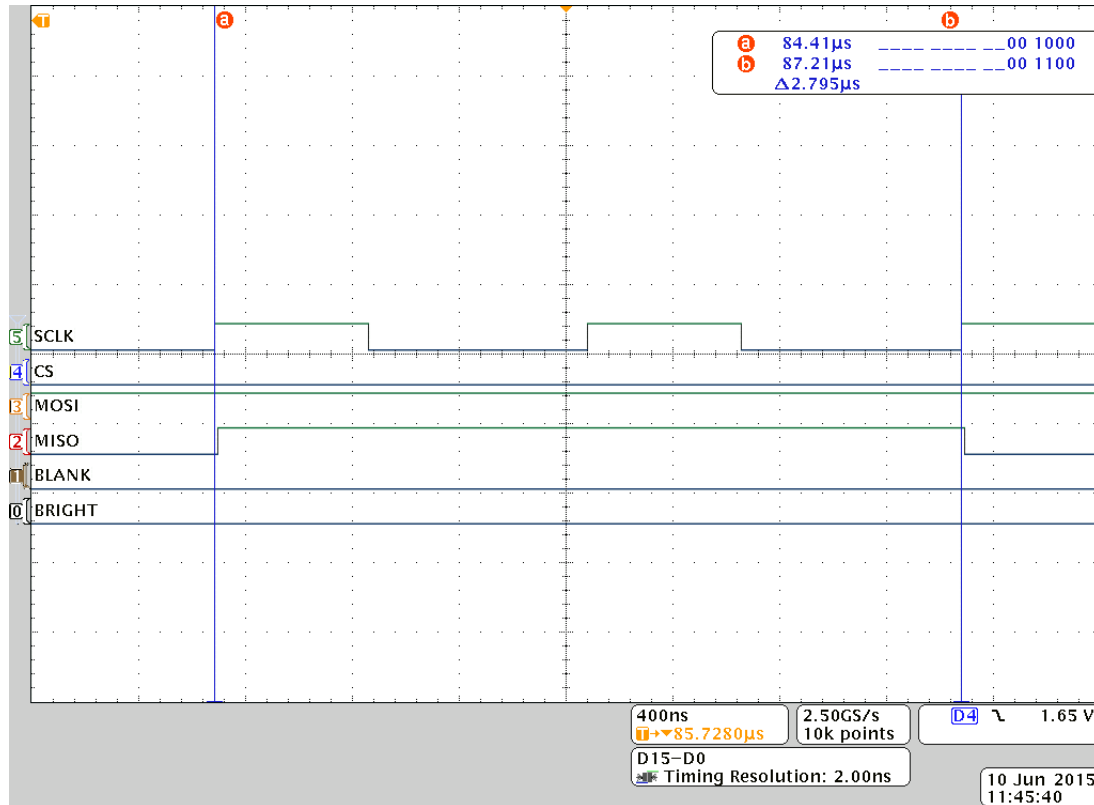


図 20. 障害シミュレーション (SCLKの第8~10サイクルを拡大)

### 8.3 輝度

次の3つの方法でLEDの輝度を制御することが可能です。

- 順方向定電流を全体でPWM変調する
- 順方向定電流を全体で調整する
- LEDの順方向定電流を個別でオンまたはオフに切り替える

### 8.3.1 順方向電流を全体でPWM変調する

TLC5928デバイスのBLANKピンを(Highに)アサートすれば、(ラッチされたデータを保存するため)シリアル・ポートを使用しなくても同時にLEDを全消灯できます。BLANKがLowの場合は、全LEDがシリアル・インターフェイスから与えられたデータで制御され、順方向電流が設定されます。PWM信号を用いて、LED輝度をHighとLowの比で直接制御することが可能です(図 21を参照)。

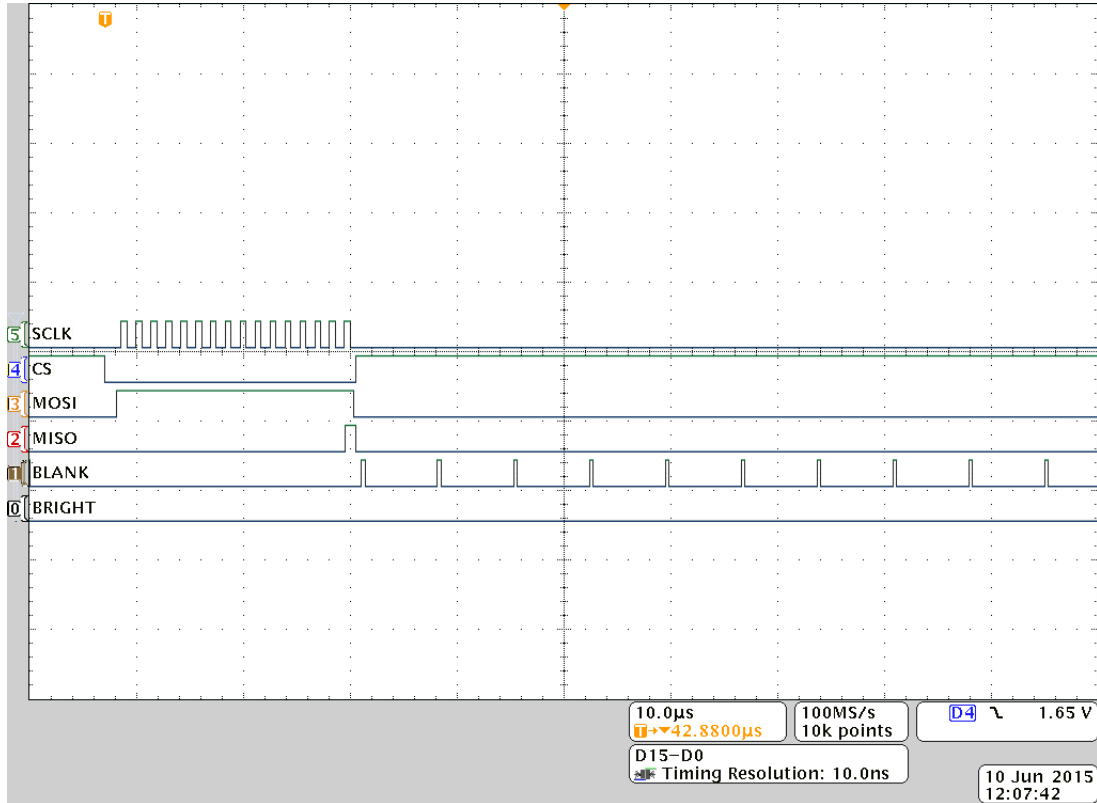


図 21. BLANKを用いた輝度制御

### 8.3.2 順方向電流を全体で調整する

輝度を制御するもう1つの方法は、LEDの順方向電流全体を制御する方法です。この全体制御は、TLC5928のピン20 (IREF)とGNDの間に抵抗を接続することで実現できます。電流は抵抗値で設定します。IDA0-00560 TI Designでは、並列に接続された2番目の抵抗を切り替えることで、この抵抗値のダイナミックな変更をサポートしており、実質的に2レベルの輝度に対応します。詳細については、5.1.3を参照してください。

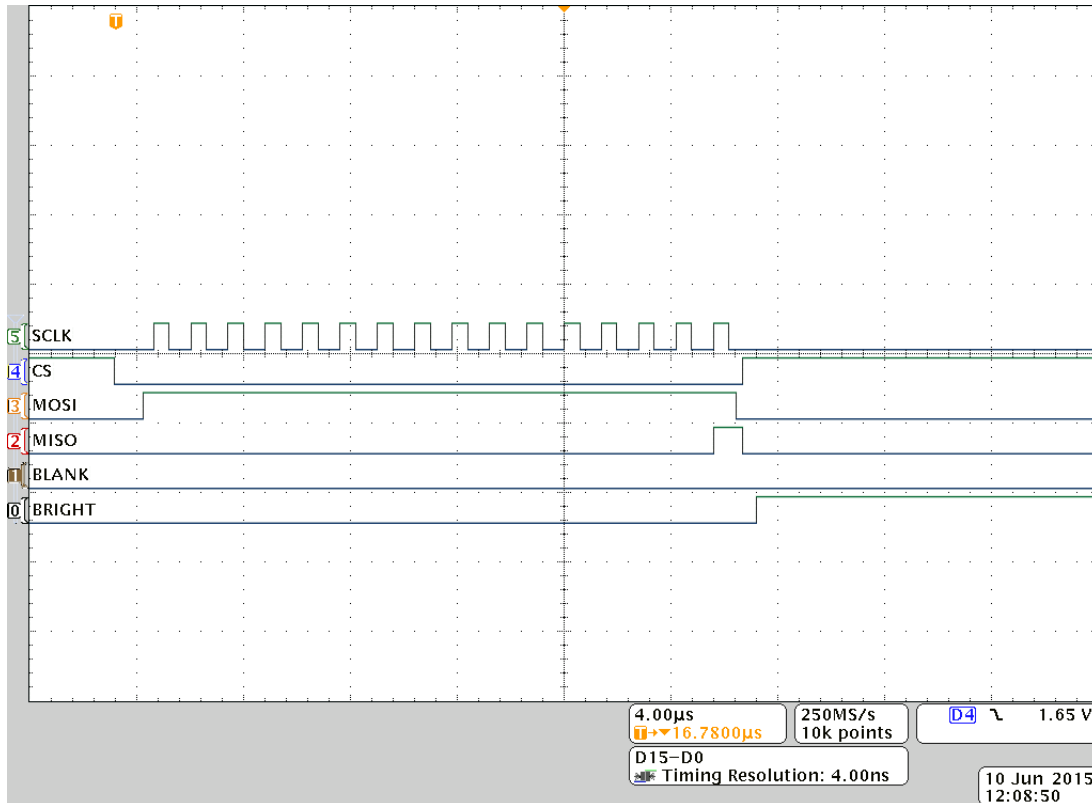


図 22. 順方向電流の変化による輝度制御

### 8.3.3 LEDの順方向電流を個別でオンまたはオフに切り替える

TIDA-00560 TI Designでは、赤と緑のカラーLEDを使用します。このようなカラーLEDは、PLC I/Oモジュールでもよく使われています。これらのLEDでは本質的に、順方向電流が同じであっても、輝度には人間の目で見えてわかるほどの違いがあります。たとえば、 $I_F = 5 \text{ mA}$ で、Würth Electronic社の緑色LEDは10mcd、赤色LEDは50mcdです。この輝度の差を補正するため、赤色LEDは固定周期で点滅させ、緑色LEDは常時点灯するよう、SPIデータ転送を設定することが可能です。

### 8.3.4 消費電流

本基板の(全LED消灯時)静止電流は、極めて低いことが予想されます。データシートによれば、TLC5928デバイスの消費電流の標準値は1mA (BLANK = high and  $R_{IREF} = 27 \text{ k}\Omega$ )です。 $R_{IREF} = 25.5 \text{ k}\Omega$ の時の測定値は0.535mAです。この測定値にBeagleBoneケーブルの回路(EEPROM、ロジック)の(静的な)電流が含まれていることを考慮すると、かなり良好な値です。

表 5には、異なる $V_{CC}$ で全LEDを2mAまたは5mAで点灯させた時の基板全体の消費電流を示します。

表 5. 消費電流

$V_{CC}$ [V]	$I_{LED}$ [mA]	$I_{CC}$ [mA]	$\Delta I_{CC}$ [5 mA, 2 mA]
3V	2mA	31.69	–
3.3V	2mA	31.89	–
5V	2mA	33.12	–
5.5V	2mA	35.71	–
3V	5mA	78.37	46.68
3.3V	5mA	79.9	48.01
5V	5mA	81.67	48.55
5.5V	5mA	82.19	46.48

同一 $V_{CC}$ に対して、2mAと5mAの場合で予想される電流の差は、次の式で求められます。

$$I_{DELTA\_CALC} = 16 \times 5 \text{ mA} - 16 \times 2 \text{ mA} = 48 \text{ mA} \quad (4)$$

$V_{CC}$ の異なる4電圧に対して測定した電流の差は、46.48mA～48.55mAの範囲で、予想範囲内でした。

2mAと

5mAに対して、LED1個(ここではOUT0経由でのD1)の電流を測定しました。表 6に、これらの電流測定結果を示します。

表 6. D1の電流測定結果

$R_{IREF}$ [k $\Omega$ ]	$I_{LED\_EXPECTED}$ [mA]	$I_{LED\_MEAS}$ [mA]	e [%]
25.5	1.976	1.938	1.9
10.16	4.959	4.924	0.7

データシートによれば、電流が少ないほど誤差は大きくなる傾向にあります(2mA時に最大1.5%)。リファレンス抵抗値の許容誤差が1%の場合、結果はすべて、予想範囲内でした。

## 9 設計ファイル

### 9.1 回路図

回路図のダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#)

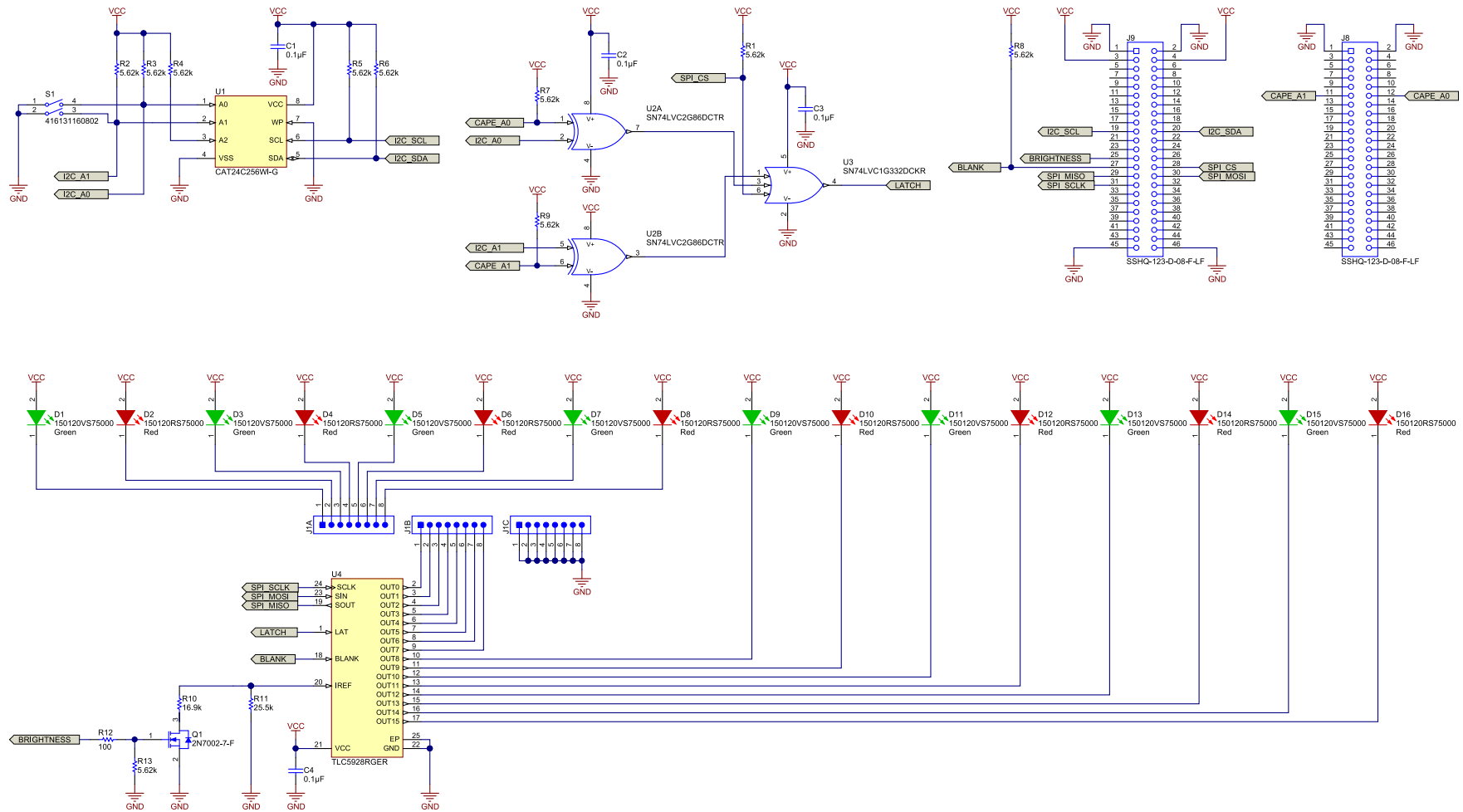


図 23. TIDA-00560回路図



## 9.2 部品表

部品表(BOM)のダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#)

## 9.3 PCBLEイアウトに関する推奨事項

### 9.3.1 レイヤ・プロット

レイヤ・プロットのダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#)

## 9.4 Altiumプロジェクト

Altiumプロジェクト・ファイルのダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#).

## 9.5 Gerberファイル

Gerberファイルのダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#).

## 9.6 組立図面

組立図面のダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#).

## 10 ソフトウェア・ファイル

ソフトウェア・ファイルのダウンロードについては、デザイン・ファイルを参照してください: [TIDA-00560](#).

## 11 参考資料

1. Texas Instruments, *16-Channel, Constant-Current LED Driver with LED Open Detection*, TLC5948 Data Sheet ([SBVS120](#))
2. Texas Instruments, *MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER*, MSP430G2553 Data Sheet ([SLAS735](#))
3. Texas Instruments, *PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I<sup>2</sup>C Bus*, PCF8574 Data Sheet ([SCPS068](#))
4. Texas Instruments, *8-BIT SHIFT REGISTERS WITH 3-STATE OUTPUT REGISTERS*, SN74HC595 Data Sheet ([SCLS041](#))
5. Texas Instruments, *HDC1000 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor*, HDC1000 Data Sheet ([SNAS643](#))
6. Texas Instruments, *AM335x Sitara™ Processors*, AM3359 Data Sheet ([SPRS717](#))
7. GitHub.com, *BeagleBone Black System Reference Manual – Revision B*, BeagleBone Black System Reference Manual .pdf (<http://bit.ly/1LQWUEI>)

### 11.1 商標

All trademarks are the property of their respective owners.

## 12 著者について

**LARS LOTZENBURGER**は、テキサス・インスツルメンツのシステム・エンジニアであり、産業用部門でのリファレンス・デザイン開発を担当しています。アナログ/デジタル回路の開発、PCB設計、組み込みプログラミングなどの幅広い経験を活かして開発に従事しています。ドイツ、ザクセン州ミットヴァイダのUniversity of Applied Scienceで電気工学の学位を取得しています。

## TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供されるものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関係する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的のみに使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的での、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他のような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示の保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。