

StudentZone——2023年6月

ADALM2000による実習： ウィンドウ・コンパレータを利用した 温度制御

著者：Doug Mercer、コンサルティング・フェロー
Antoniu Miclaus、システム・アプリケーション・エンジニア

目的

今回は、高速な電圧コンパレータを2つ使用してウィンドウ・コンパレータを実現する方法について検討します。続いて、この手法を採用した低消費電力のプログラマブル温度コントローラ「TMP01」をプログラムする方法を紹介します。

通常、ウィンドウ・コンパレータは2つの電圧コンパレータ（反転型と非反転型）で構成されます。それにより、2つの異なる電圧閾値の範囲内に入力信号が収まっているか否かを表す信号を出力します。上限の電圧閾値 $V_{REF(HIGH)}$ を通過する信号が検出されると、一方のコンパレータ（オペアンプがベース）がトリガされます。また、下限の電圧閾値 $V_{REF(LOW)}$ を通過する電圧が検出されると、もう一方のコンパレータがトリガされます。つまり、上限、下限を表す2つのリファレンス電圧を使用することになります。それらによって決まる電圧範囲をウィンドウと呼びます。

準備するもの

- ▶ アクティブ・ラーニング・モジュール「ADALM2000」
- ▶ ソルダレス・ブレッドボード
- ▶ ジャンパ線
- ▶ コンパレータ：「AD8561」（2個）
- ▶ NPN トランジスタ：「2N3904」（1個）
- ▶ 小信号ダイオード：「1N914」（2個）
- ▶ LED：色は任意（1個）
- ▶ 抵抗：10kΩ（3個）、20kΩ（1個）、470Ω（1個）

ウィンドウ・コンパレータ

まずはウィンドウ・コンパレータについて、具体的な例を基に検討を進めましょう。

背景

ここでは、図1の回路について考えます。この回路では、値が等しい3つの抵抗 R_1 、 R_2 、 R_3 で構成される分圧回路を使用しています。各抵抗で生じる電圧降下の値は同じです。つまり、各抵抗によって、リファレンス電圧 V_{REF} の1/3に相当する電圧降下が生じます。その結果、上限の電圧閾値 $V_{REF(HIGH)}$ は $2/3V_{REF}$ 、下限の電圧閾値 $V_{REF(LOW)}$ は $1/3V_{REF}$ に設定されます。

まず、入力電圧 V_{IN} が $V_{REF(LOW)}$ ($1/3V_{REF}$) よりも低い場合を考えます。その場合、図中で下側に位置するコンパレータの出力はハイになります。その結果、ダイオード D_2 は順方向にバイアスされます。すると、NPN トランジスタ Q_1 はベース電圧が正であることから飽和領域に入り、出力電圧はローのレベルになります。その結果、抵抗 R_5 とダイオード D_3 によって電圧降下が生じることから、LED には電源電圧よりもやや低い電圧が印加されます。このような回路の動作によって、LED が点灯することになります。

続いて、 V_{IN} が $V_{REF(LOW)}$ ($1/3V_{REF}$) よりも高く、 $V_{REF(HIGH)}$ ($2/3V_{REF}$) よりも低いケースを考えます。その場合、両方のコンパレータの出力がローになり、ダイオード D_1 、 D_2 は逆方向にバイアスされます。つまり、 Q_1 のベースには電圧が印加されません。その結果、 Q_1 は切断された状態になり、抵抗 R_6 にも R_5 、 D_3 にもコレクタ電流は流れません。したがって、出力電圧には電源電圧 $V+$ が現れます。



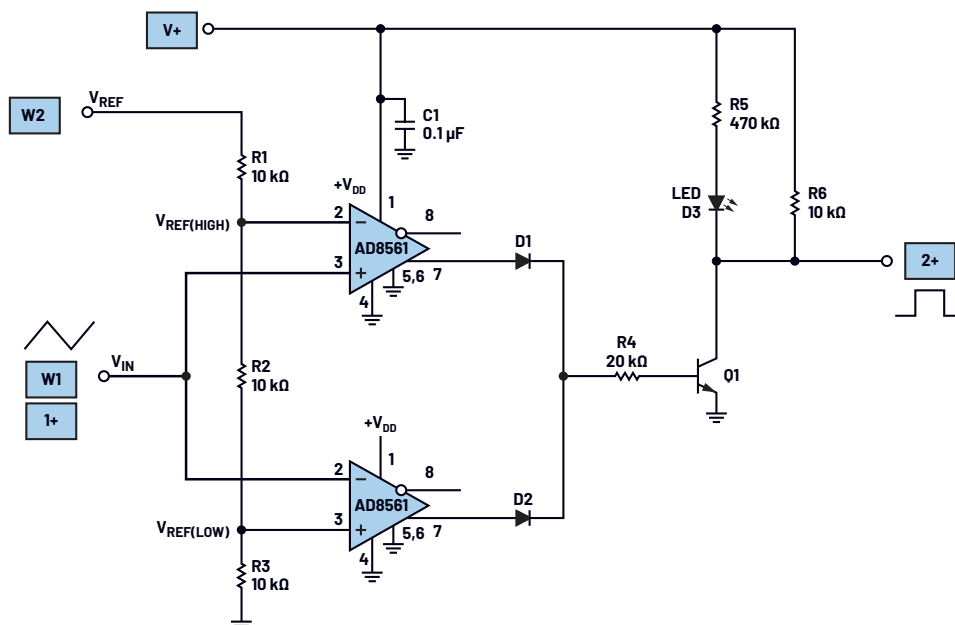


図1. ウィンドウ・コンパレータの回路図

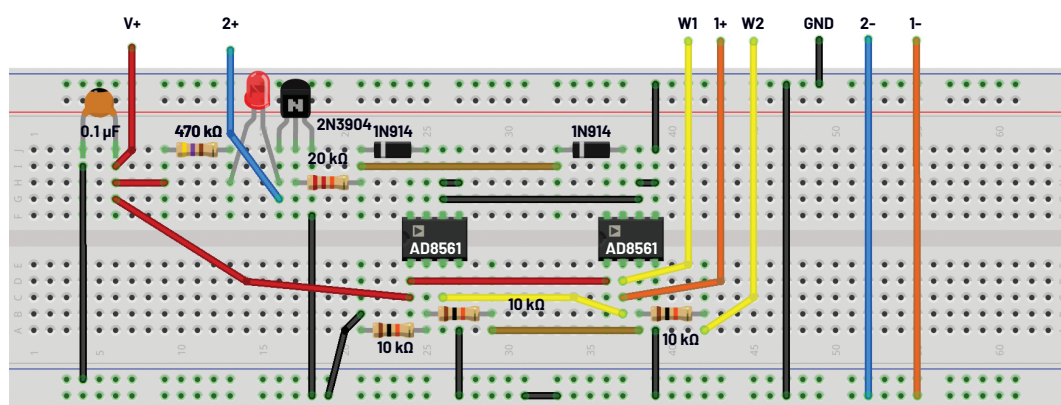


図2. 図1の回路を実装したブレッドボード

V_{IN} が $V_{REF(HIGH)}$ ($2/3V_{REF}$) よりも高い場合には、上側のコンパレータの出力がハイになります。それにより、D1は順方向にバイアスされます。すると、Q1はベース電圧が正であることから飽和領域に入り、出力電圧はローのレベルになります。その結果、抵抗R5とダイオードD3によって電圧降下が生じることから、LEDには電源電圧よりもやや低い電圧が印加されます。つまり、この場合もLEDが点灯することになります。

ハードウェアの設定

図1のウィンドウ・コンパレータの回路をブレッドボードに実装してください (図2)。

手順

1つ目の任意波形ジェネレータ (AWG1) を入力電圧 V_{IN} として使用します。具体的には、ピークtoピークの振幅が5V、周波数が100Hz、オフセットが2.5Vの三角波を生成するように設定します。AWG1の出力W1を回路に印加します。

2つ目の任意波形ジェネレータ (AWG2) は、5Vの固定値を出力するように設定します。その出力W2はリファレンス電圧として使用します。

この回路には、ADALM2000から5Vの電源電圧を供給します。オシロスコープは、チャンネル1に入力信号、チャンネル2に出力信号が表示されるように設定してください。

図3に示したのが、図1の回路の入出力波形の例です。この波形を見ると、入力電圧が上下限の閾値電圧の間にあるか否かによって動作が変化することがわかります。つまり、ウィンドウの機能が働いていることが見てとれます。

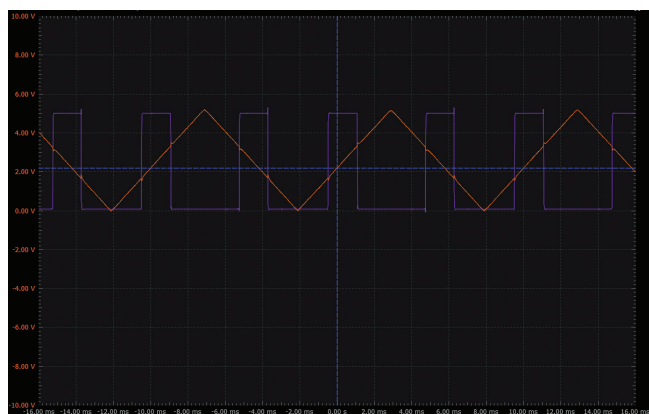


図3. 図1の回路の入出力波形

温度制御のアプリケーション

ウィンドウ・コンパレータを利用したアプリケーションの一例としては、シンプルな温度制御回路（温度センサー）が挙げられます。

背景

温度センサー「TMP01」は、図1に示した回路と同じようなコンパレータ回路を内蔵しています（図4）。外付けの抵抗R1、R2、R3として適切な値を選択すれば、このセンサーによって、温度が所望の範囲内（15℃～35℃）にあるか否かを監視することができます。

TMP01は、温度に比例した電圧を出力する温度センサーです。プログラムが可能なウィンドウ・コンパレータを備えていることを特徴とします。既定の温度に対応するセットポイント電圧を超えた場合に、2つのオープンコレクタ出力のうちの一方を有効化するようにプログラムすることが可能です。セットポイント電圧のプログラミングには、ドリフトの小さい電圧リファレンスを利用します。また、2つのオープンコレクタ出力を互いに接続し、1本のOR出力となるように構成します。それにより、周辺温度がウィンドウ内にある場合に論理レベルのハイが出力として得られるようになります。

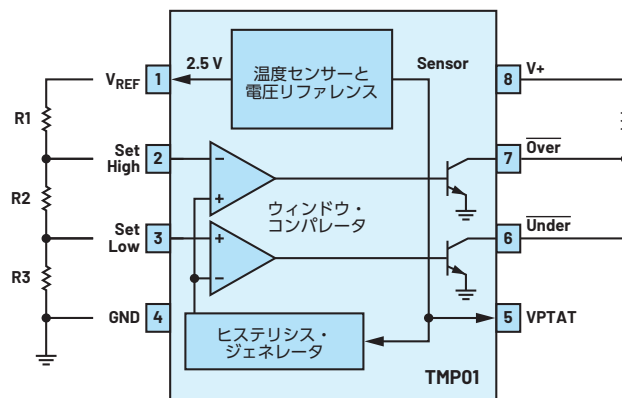


図4. TMP01の使用例。
同ICはウィンドウ・コンパレータを内蔵する温度センサーです。

TMP01のプログラム

ここでは、固定のセットポイントを使用する基本的なアプリケーションを例にとります。それには、シンプルな抵抗ラダーの分圧回路を利用します。所望のセットポイントをプログラミングする手順は以下のようになります。

- (1) 所望のヒステリシス温度を選択する。
- (2) ヒステリシス電流 I_{VREF} の値を計算する。
- (3) 所望のセットポイント温度を選択する。
- (4) コンパレータの Set High ピンと Set Low ピンに所望のセットポイント電圧を設定するために必要な個々の抵抗の値を計算する。

ヒステリシス電流の計算は簡単です。例えば、ヒステリシスを 2℃ に設定する場合、 I_{VREF} の値は 17μA となります。次に、 V_{PTAT} の温度係数を使用して、セットポイント電圧 $V_{SETHIGH}$ と V_{SETLOW} の値を求めます。 V_{PTAT} の温度係数は、 $5mV/K = 5mV / ([\text{摂氏温度}] + 273.15)$ で求められます。25℃ の場合であれば 1.49V です。続いて、これらのセットポイントを基に、分圧用の抵抗の値を計算します。それには以下に示す式を使用します。

$$\begin{aligned}
 V_{SETHIGH} &= (T_{SETHIGH} + 273.15) (5mV/^{\circ}C) \\
 V_{SETLOW} &= (T_{SETLOW} + 273.15) (5mV/^{\circ}C) \\
 R1 (\text{k}\Omega \text{単位}) &= (V_{VREF} - V_{SETHIGH}) / I_{VREF} = (2.5V - V_{SETHIGH}) / I_{VREF} \\
 R2 (\text{k}\Omega \text{単位}) &= (V_{SETHIGH} - V_{SETLOW}) / I_{VREF} \\
 R3 (\text{k}\Omega \text{単位}) &= V_{SETLOW} / I_{VREF}
 \end{aligned}$$

$R1 + R2 + R3$ の合計値は、所望のヒステリシス電流 I_{VREF} をリファレンスから得るために必要な負荷抵抗の値と等しくなります（以下参照）。

$$I_{VREF} = 2.5 \text{ V} / (R1 + R2 + 3)$$

V_{REF} は 2.5V なので、リファレンスに対応する負荷抵抗の値が 357kΩ 以上（出力電流が 7μA 以下）の場合、温度のセットポイントのヒステリシスは 0℃ となります。負荷抵抗の値がそれよりも大きい場合、出力電流が 7μA 未満に低下するだけで、デバイスの動作に影響はありません。ヒステリシスの大きさは、 V_{REF} に対する負荷抵抗の値を選択することによって決まります。

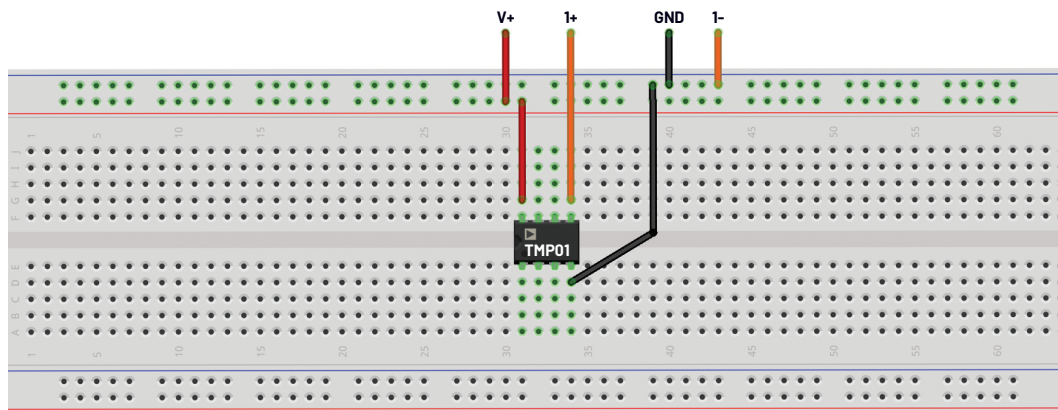


図5. 温度測定用の回路を実装したブレッドボード

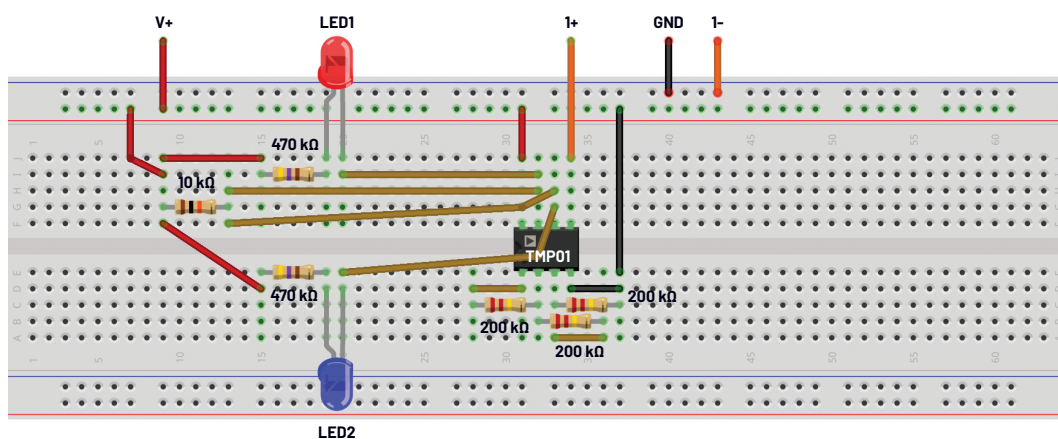


図6. 温度制御用の回路を実装したブレッドボード

課題

1. 図5の回路を実装してください。

1a. V_{PTAT} の出力値を測定し、実際の測定温度をケルビンと摂氏の単位で計算してください。

2. 図6の回路を実装してください。

2a. コンポーネントの値を確認し、回路図を作成してください。

2b. ブレッドボードの回路から得られる情報を使用して、次のパラメータの値を計算してください。

- ▶ I_{VREF}
- ▶ $V_{SETHIGH}$
- ▶ V_{SETLOW}
- ▶ $T_{SETHIGH}$
- ▶ T_{SETLOW}

2c. 温度のセットポイントのヒステリシスは何℃になりますか。その値を変更するにはどうすればよいでしょうか。

2d. この回路はどのように動作しますか。LED1（赤色）とLED2（青色）はどのような場合に点灯するのでしょうか。なぜそのようになるのか説明してください。

問題

1. 図1の回路について、 $V_{REF(LOW)}$ と $V_{REF(HIGH)}$ を、 $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 、 $W2$ を使った式で表してください。抵抗の値がすべて等しい場合、 $V_{REF(LOW)}$ と $V_{REF(HIGH)}$ の比はどのようになりますか。

答えは [StudentZone](#) で確認できます。



著者について

Doug Mercerは、1977年にレンセラー工科大学で電気電子工学の学士号を取得しました。同年にアナログ・デバイセズに入社して以来、直接または間接的に30種以上のデータ・コンバータ製品の開発に携わりました。また、13件の特許を保有しています。1995年にはアナログ・デバイセズのフェローに任命されました。2009年にフルタイム勤務からは退きましたが、名誉フェローとして仕事を続けており、Active Learning Programにもかかわっています。2016年に、レンセラー工科大学 電気／コンピュータ／システム・エンジニアリング学部 of the Engineer in Residence に指名されました。



著者について

Antoni Miclausは、アナログ・デバイセズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。アカデミック・プログラムや、Circuits from the Lab[®] 向けの組み込みソフトウェア、QAプロセス・マネジメントなどに携わっています。2017年2月から、ルーマニアのクルジュナポカで勤務しています。現在、バベシュボヨイ大学においてソフトウェア・エンジニアリングに関する修士課程にも取り組んでいます。また、クルジュナポカ技術大学で電子工学と通信工学の学士号を取得しています。