

StudentZone—2020年2月 ADALM2000による実習： オペアンプ・ベースのコンパレータ

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

オペアンプのスイッチ動作を利用すれば、電圧コンパレータを実現できます。電圧コンパレータは、2つの入力電圧の相対的な状態を判定するものです。判定結果は、コンパレータの2値出力（ハイ、ロー）によって表されます。比較の処理としては、2つの入力電圧の差をとり、得られた結果の符号が正になるのか負になるのかという判定が行われます。その符号に応じ、コンパレータがとり得る2つの値のうち1つが出力されます。

オペアンプをベースとするコンパレータでは、2つの入力 V_+ と V_- の差を単一の入力 V_D に置き換えて考えることができます。出力電圧 V_O は以下ようになります。

- ▶ $V_O = V_{OH}$ （ハイを出力）： $V_+ > V_-$ ($V_D > 0$) を意味します。
- ▶ $V_O = V_{OL}$ （ローを出力）： $V_+ < V_-$ ($V_D < 0$) を意味します。

出力電圧が切り替わる特定の入力電圧 V_I ($V_D = 0$) が、そのコンパレータのスレッシュホールド電圧（閾値） V_{Th} となります。

本稿では、以下に示す2種の主要な電圧コンパレータについて検討します。

- ▶ シンプルなコンパレータ：帰還回路がなく、スレッシュホールド電圧は1つだけです。
- ▶ ヒステリシス・コンパレータ：正帰還回路を備えており、スレッシュホールド電圧が2つ存在します。

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・ブレッドボードとジャンパ線のキット
- ▶ 抵抗：10k Ω （3個）、20k Ω （1個）
- ▶ オペアンプ：「OP97」（1個。アナログ・パーツ・キット [ADALP2000] の最新版に含まれる低スルー・レート品）または「OP37」

シンプルなコンパレータ

まずは、シンプルなコンパレータについて検討します。

背景

図1の構成により、オペアンプはシンプルなコンパレータとして機能します。この機能は、オペアンプの高いゲインと出力の飽和効果を利用することで実現されます。この回路は、基本的には2つの状態を持つ意思決定回路だと言えます。非反転入力（+）の電圧が反転入力（-）の電圧よりも高ければ、出力はハイになります。「ハイになる」というのは、オペアンプの最大出力値で飽和することです。逆に、非反転入力（+）の電圧が反転入力（-）の電圧よりも低ければ、出力はローになります。例えば、非反転入力に任意の入力電圧 V_{IN} を印加し、反転入力にDCリファレンス電圧 V_{REF} を印加するとします。その場合、 $V_{IN} > V_{REF}$ であれば出力はハイになり、 $V_{IN} < V_{REF}$ であれば出力はローになります。このように、図1の回路は2つの入力電圧を比較し、相対値に基づいて出力を生成します。オペアンプを使用する通常の回路とは異なり、入力と出力の間に帰還経路はありません。このような回路は、「オープンループで動作する」と表現されます。

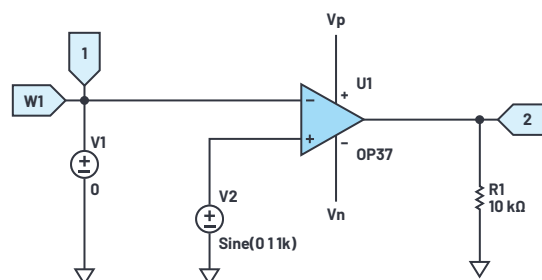


図1. オペアンプを使用して構成したコンパレータ回路

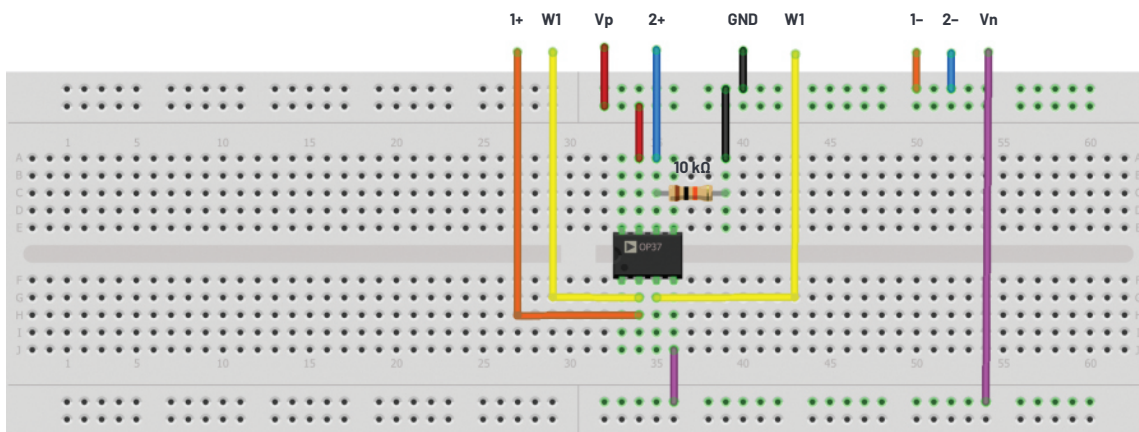


図2. 図1の回路を実装したブレッドボード

ハードウェアの設定

コンパレータは、様々な場面で使用されています。まずは、その基本動作を確認しておきましょう。ここでは、幅が可変の矩形波を生成する一般的な構成のコンパレータを取り上げます。

まず、電源がオフになっていることを確認し、回路を実装します。ここでは、ADALM2000が備える任意波形ジェネレータ (AWG) の1つの出力を V_{REF} として使用します。その振幅はゼロとし、出力オフセットを最低値まで下げてください。実験では、このオフセットの値をゼロから高めていきます。

もう一方の入力電圧 V_{IN} は、AWGのもう1つの出力によって生成します。ピークtoピークの振幅が2V、周波数が1kHzのサイン波を出力するように設定します。電源を投入し、 V_{REF} が0Vのときの出力波形をエクスポートしておきます。

続いて、 V_{REF} の値をゆっくりと上昇させ、何が起きるのか観察します。 V_{REF} が1Vのときの出力波形を記録しておいてください。更に、 V_{REF} が2Vを超えるまで高め続け、何が起きるのか観察します。ここまでの実験が完了したら、なぜそのような挙動を示すのか考察してください。

続いて、 V_{IN} として三角波を出力するように設定し、同様の実験を行います。観察した結果は、実験レポートとして記録しておいてください。

手順

AWGの出力を V_{IN} として使用し、ピークtoピークの振幅が2V、周波数が1kHzのサイン波を回路に印加します。オペアンプの電源電圧としては、ADALM2000のユーザ用電源を使用して±5Vを供給します。波形の表示には、ADALM2000のオシロスコープ機能を使用します。チャンネル1に入力信号が表示され、チャンネル2には出力信号が表示されるように設定してください。図3に示したのは、入出力波形の表示結果の例です。



図3. コンパレータの入出力波形

ヒステリシス・コンパレータ

続いて、ヒステリシス・コンパレータの実験を行います。ヒステリシスとは、システムに対する現在の入力だけでなく、それ以前の入力にも依存して変化を示す動作のことです。ヒステリシスを備える回路の出力は、入力に対する1つの厳密な関数とはなりません。そうではなく、タイム・ラグ、ディレイ、あるいは履歴に対する依存性が伴います。また、入力が減少するときの出力応答は、入力が増加するときの出力応答とは異なる性質を示します。

ヒステリシス・コンパレータの場合、2つの出力値 V_{OH} 、 V_{OL} に対応する2つのスレッシュホールド電圧 V_{ThH} 、 V_{ThL} が存在します。出力を入力に帰還（正帰還）し、スレッシュホールド電圧が出力に依存するように回路を構成します。具体的には、非反転入力に対し、抵抗分圧器で決まる特定の比率で出力電圧を帰還します。出力電圧の何割かを非反転入力に加えるということです。

ヒステリシス・コンパレータについては、ヒステリシスが移動する方向と、ある時点において有効なスレッシュホールド電圧は1つだけだということを考慮しなければなりません。

スイッチングのプロセスは正帰還によって維持され、入力信号によって出力のスイッチングがトリガされます。

非反転型のヒステリシス・コンパレータ

ヒステリシス・コンパレータは、いくつかの構成で実現できます。まずは、非反転型のヒステリシス・コンパレータを取り上げます。

背景

ここでは、非反転型のヒステリシス・コンパレータの例として、図4に示す回路を構成します。

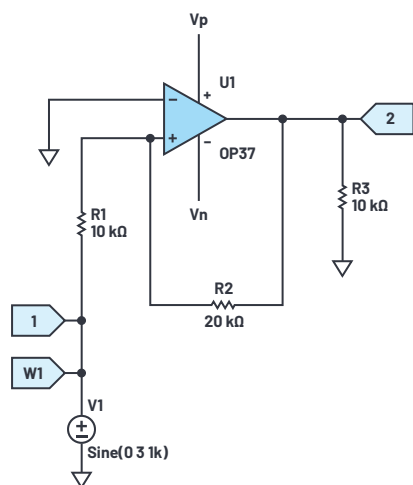


図4. 非反転型のヒステリシス・コンパレータ

この回路において、オペアンプの非反転入力には V_{IN} を印加します。回路の入力と出力の間には、抵抗 $R1$ 、 $R2$ を使用して構成した分圧回路を付加しています。これにより、非反転入力に対して出力電圧を一定の割合で正帰還します。帰還量は、 $R1$ 、 $R2$ の比によって決まります。図4の回路の場合、帰還量は $1/2$ になります。

スレッシュホールド電圧は、次式によって求めることができます。

$$v_D = v^+ - v^- = \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) v_{OUT} + \left(\frac{R2}{(R1 + R2)} \right) V_{IN} - 0 \quad (1)$$

$V_D = 0$ 、 $V_{IN} \rightarrow V_{Th}$ とすると、以下のようにスレッシュホールド電圧が得られます。

$$\begin{aligned} V_{ThL} &= -\left(\frac{R1}{R2} \right) V_{OH} \\ V_{ThH} &= -\left(\frac{R1}{R2} \right) V_{OL} \end{aligned} \quad (2)$$

ハードウェアの設定

ブレッドボードを使用し、図4に示した非反転型のヒステリシス・コンパレータ回路を図5のように実装します。

手順

AWGの出力を V_{IN} として使用し、ピークtoピークの振幅が6V、周波数が1kHzのサイン波を回路に印加します。オペアンプには、電源電圧として $\pm 5V$ を供給してください。最後に、チャンネル1に入力信号が表示され、チャンネル2に出力信号が表示されるようにオシロスコープを設定します。図6に、入出力波形の例を示しました。

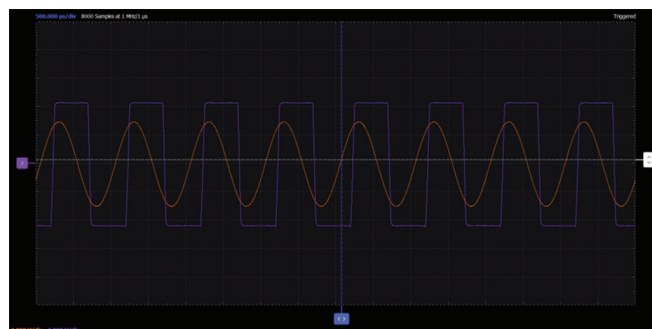


図6. 図4の回路の入出力波形

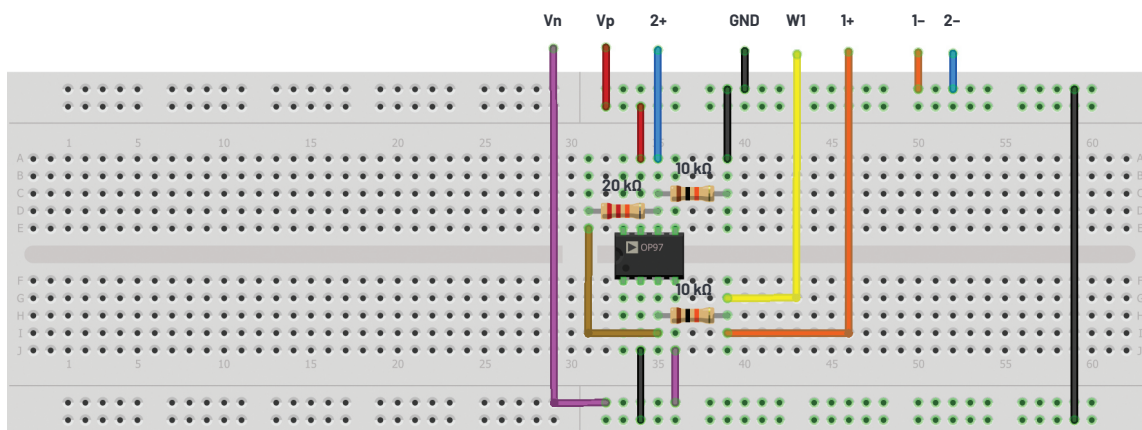


図5. 図4の回路を実装したブレッドボード

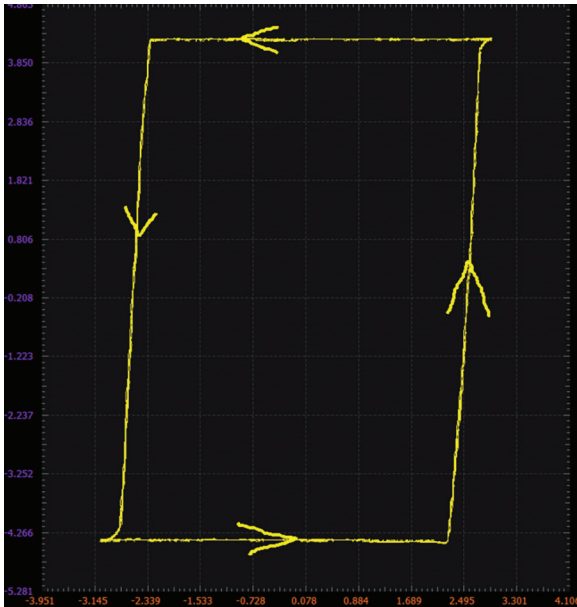


図7. 図4の回路のXYプロット

図7に示したのは、図4の回路のXYプロットです。これを見れば、非反転型のヒステリシス・コンパレータにおける入出力電圧の伝達特性を把握できます（矢印はスレッシュホールド電圧に対する信号の流れを表しています）。スレッシュホールド電圧の計算値を測定値と比較してみてください。

反転型のヒステリシス・コンパレータ

続いて、反転型のヒステリシス・コンパレータを取り上げます。

背景

ここでは、図8に示す反転型のヒステリシス・コンパレータについて検討することにします。

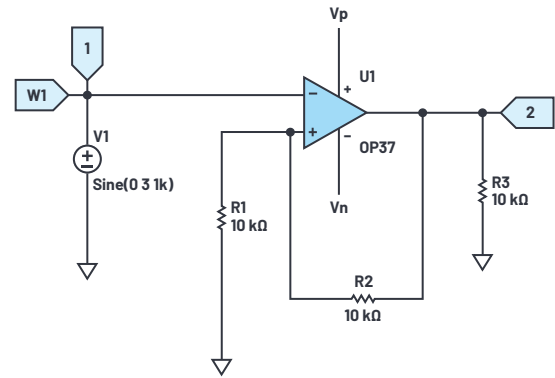


図8. 反転型のヒステリシス・コンパレータ

この回路では、オペアンプの反転入力に V_{IN} を印加します。回路の入力と出力の間には、抵抗 $R1$ 、 $R2$ で構成した分圧回路を配置しています。これにより、非反転入力に対して出力電圧を一定の割合で正帰還します。帰還量は、 $R1$ 、 $R2$ の比によって決まります。この回路の場合、帰還量は $1/2$ となります。

スレッシュホールド電圧は、次式によって求めることができます。

$$v_D = v^+ - v^- = \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) v_{OUT} - v_{IN} \quad (3)$$

$V_D = 0$ 、 $V_{IN} \rightarrow V_{Th}$ とすると、次のようにスレッシュホールド電圧が得られます。

$$\begin{aligned} V_{ThL} &= \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) V_{OL} \\ V_{ThH} &= \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) V_{OH} \end{aligned} \quad (4)$$

ハードウェアの設定

ブレッドボードを使用し、図8に示した反転型のヒステリシス・コンパレータ回路を図9のように実装します。

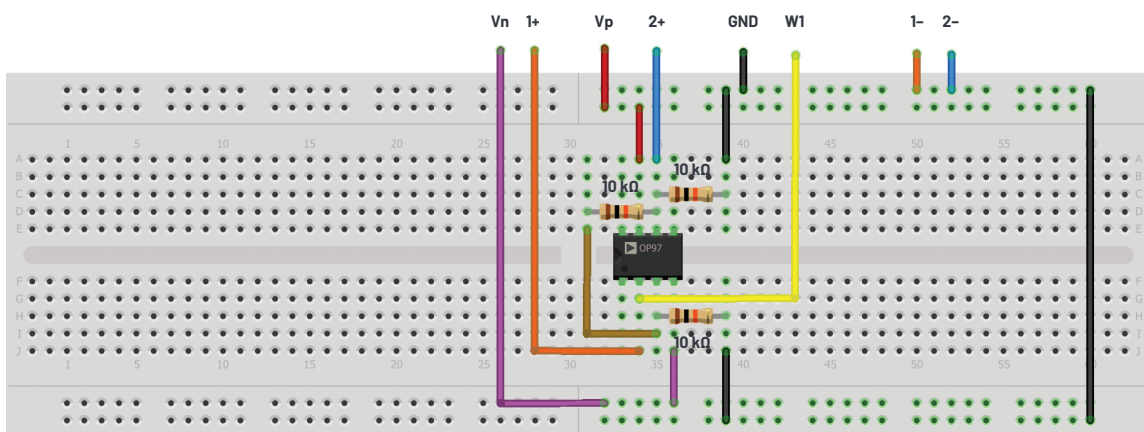


図9. 図8の回路を実装したブレッドボード

手順

AWGの出力を V_{IN} として使用し、ピークtoピークの振幅が6V、周波数が1kHzのサイン波を回路に印加します。オペアンプには、電源電圧として $\pm 5V$ を供給してください。オシロスコープは、チャンネル1に入力信号が表示され、チャンネル2に出力信号が表示されるように設定します。図10に入出力波形の例を示しました。

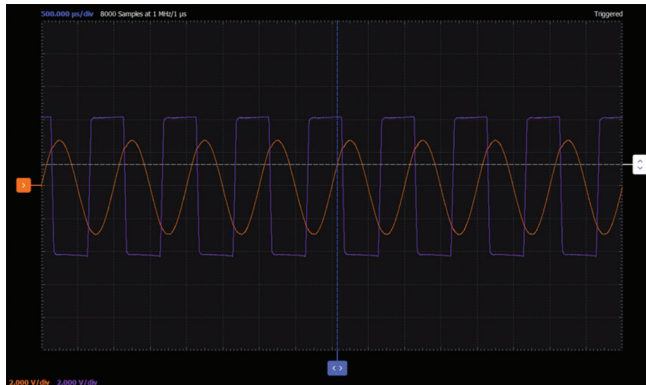


図10. 図8の回路の入出力波形

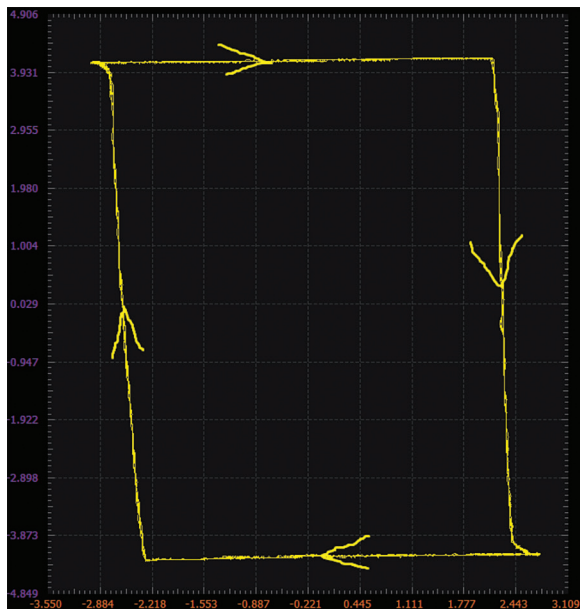


図11. 図8の回路のXYプロット

図11に示したのは、図8の回路のXYプロットです。これを見れば、反転型のヒステリシス・コンパレータにおける入出力電圧の伝達特性を把握できます（矢印はスレッシュホールド電圧に対する信号の流れを表しています）。スレッシュホールド電圧の計算値を測定値と比較してみてください。

スレッシュホールド電圧が非対称な反転型ヒステリシス・コンパレータ

もう1つ、反転型のヒステリシス・コンパレータを取り上げます。スレッシュホールド電圧が非対称である点を特徴とします。

背景

図12に示したのが、スレッシュホールド電圧が非対称な反転型ヒステリシス・コンパレータです。

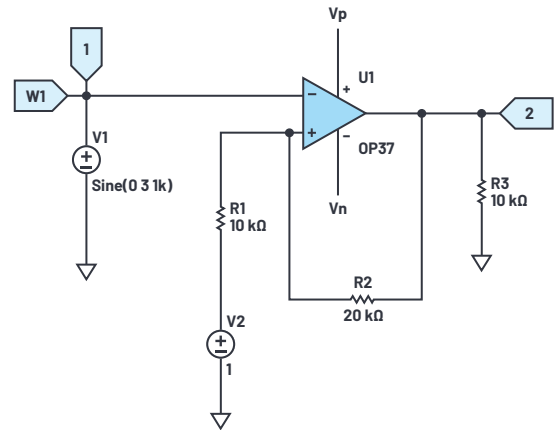


図12. スレッシュホールド電圧が非対称な反転型ヒステリシス・コンパレータ

図8の回路とは異なり、この回路では、リファレンス電圧 V_{REF} を追加で使用します。回路の入力と出力の間には、抵抗 $R1$ 、 $R2$ で構成した分圧回路を配置しています。これにより、非反転入力に出力電圧を一定の割合で正帰還します。

スレッシュホールド電圧は、次式によって求めることができます。

$$v_D = v^+ - v^- = \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) v_{OUT} + \left(\frac{R2}{(R1 + R2)} \right) V_{REF} - v_{IN} \quad (5)$$

$V_D = 0$ 、 $V_{IN} \rightarrow V_{Th}$ とすると、以下のようにスレッシュホールド電圧が得られます。

$$\begin{aligned} V_{ThL} &= \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) V_{OL} + \left(\frac{R2}{(R1 + R2)} \right) V_{REF} \\ V_{ThH} &= \left(\frac{R1}{(R1 + R2)} \right) V_{OH} + \left(\frac{R2}{(R1 + R2)} \right) V_{REF} \end{aligned} \quad (6)$$

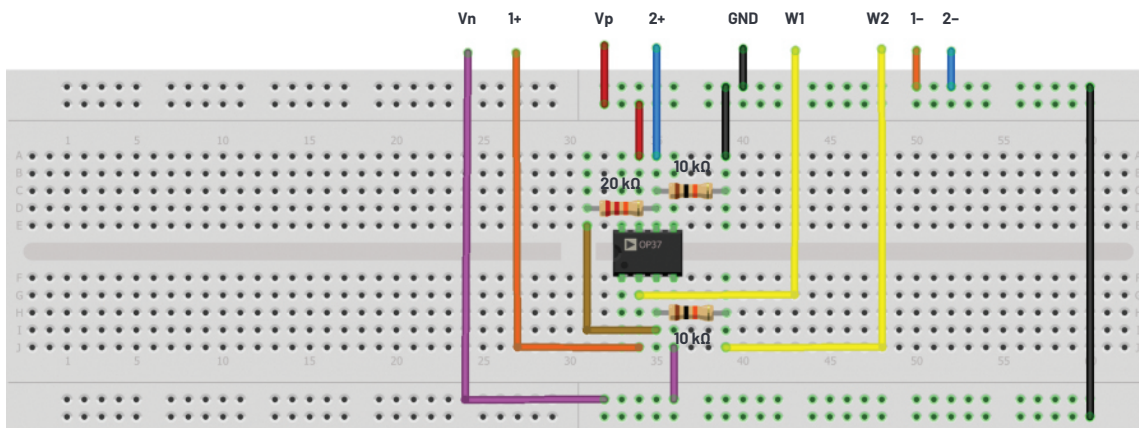


図 13. 図 12 の回路を実装したブレッドボード

ハードウェアの設定

ブレッドボードを使用し、図 12 に示した回路を図 13 のように実装します。

手順

AWG の出力を V_{IN} として使用し、ピーク to ピークの振幅が 6V、周波数が 1kHz のサイン波を回路に印加します。また、AWG のもう 1 つの出力を、値が 2V の V_{REF} として使用します。オペアンプには電源電圧として $\pm 5V$ を供給してください。オシロスコープは、チャンネル 1 に入力信号が表示され、チャンネル 2 に出力信号が表示されるように設定します。図 14 に、入出力波形の例を示しました。

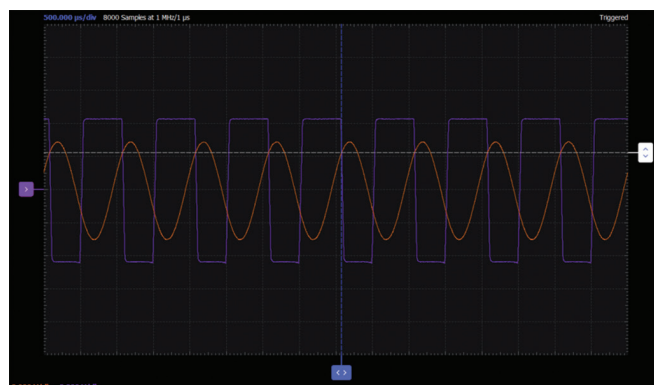


図 14. 図 12 の回路の入出力波形

図 15 に示したのは、図 12 の回路の XY プロットです。これを見れば、図 12 の反転型ヒステリシス・コンパレータにおける出力電圧の伝達特性を把握できます（矢印はスレッシュホールド電圧に対する信号の流れを表しています）。スレッシュホールド電圧の計算値を測定値と比較してみてください。

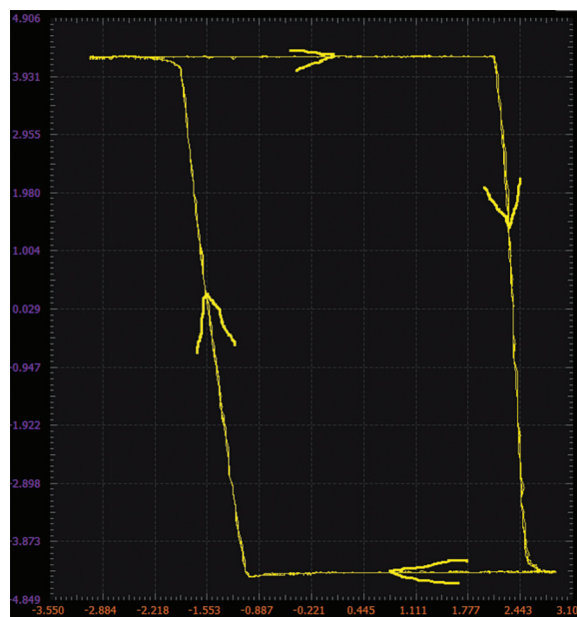


図 15. 図 12 の回路の XY プロット

問題

4 種のコンパレータ（シンプル、非反転型、反転型、スレッシュホールド電圧が非対称の反転型）について、スレッシュホールド電圧を計算してください。その値を、実験で得られたスレッシュホールド電圧と比較してください。

追加の実習

最後に、追加の実習を提示しておきます。図 12 に示したコンパレータ回路に変更を加え、電圧が負の値の場合には赤色の LED が点灯し、電圧が正の値の場合には緑色の LED が点灯するようにしてください。入力信号の周波数を 1Hz（またはそれ以下）まで下げれば、ターン・オン、ターン・オフの様子を目視で確認できます。LED に流れる電流が 20mA を超えないように、必ず電流制限抵抗を適用してください。

続いて、図16に示すように、複数の電圧レベルに対応する回路に拡張してみてください。

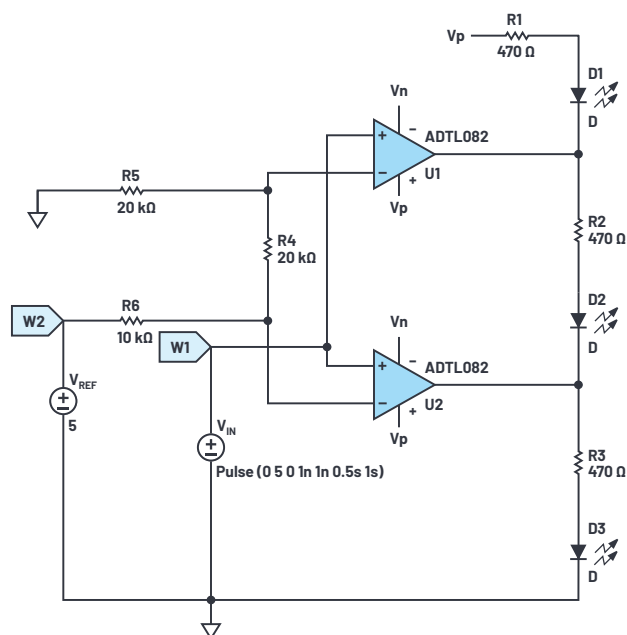


図16. LEDを使用した電圧レベルの表示計

準備するもの

- ▶ 抵抗：10k Ω（1個）、20k Ω（2個）、470 Ω（3個）
- ▶ LED：赤色、緑色、黄色のものを各1個
- ▶ オペアンプ：「ADTL082」（1個。2個のオペアンプを内蔵）

この回路では、2つの各コンパレータに対して1つのスレッシュホールド電圧を設定するために、R1、R2、R3を使用して分圧器を構成しています。設定されたスレッシュホールド電圧と入力電圧に基づき、1度に1個のLED（D1、D2、D3のうちいずれか）がオンします。

問題

- ▶ 図16の回路のスレッシュホールド電圧を求めてください。また、それぞれの入力電圧範囲に対し、どのLEDがオンになりますか。
- ▶ 図17のように、ブレッドボードに回路を実装してください。オペアンプには、電源電圧として±5Vを供給します。AWGの1つの出力によりV_{IN}を生成し、もう1つの出力により5VのV_{REF}を生成します。
- ▶ V_{IN}を0V～5Vの範囲で変化させ、LEDの動作を観察してください。

答えは[StudentZone](#)で確認できます。

なお、図16の回路は、ウィンドウ・コンパレータとして知られています。同コンパレータについては、[Temperature Control Using Window Comparator](#)（ウィンドウ・コンパレータによる温度の制御）をご覧ください。

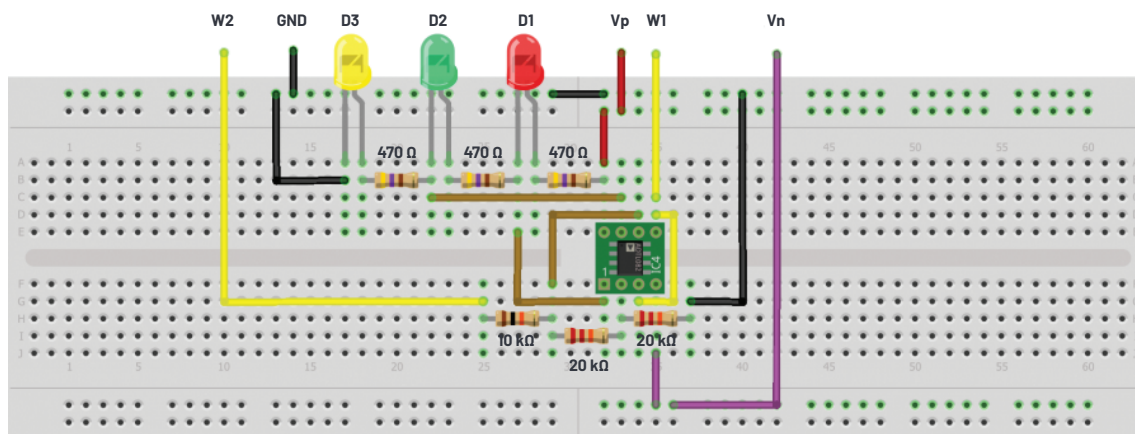


図17. 図16の回路を実装したブレッドボード



著者について

Doug Mercer (doug.mercer@analog.com) 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のEngineer in Residenceに指名されました。



著者について

Antoniu Miclaus (antoniu.miclaus@analog.com) 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オートメーション、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。



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

アナログ・デバイセズ株式会社

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、analog.com/jp/contact をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧ができます。

©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
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。
Ahead of What's Possibleはアナログ・デバイセズの商標です。

AD5402-0-2/20

VISIT [ANALOG.COM/JP](https://analog.com/jp)