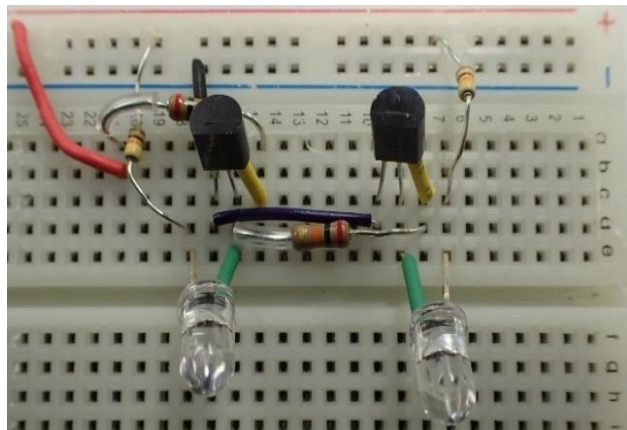
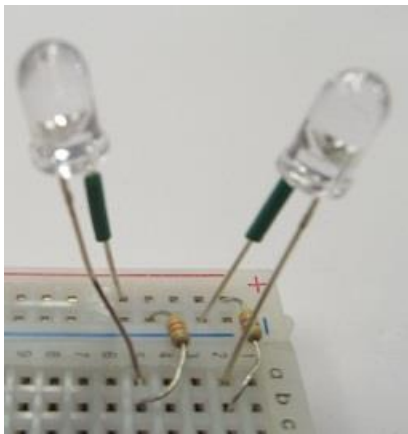


仙台市青葉少年少女発明クラブ 英語で電子回路の工作
Sendai City Aoba Boys and Girls Invention Club
Experiment of Electronic Circuits with English

プログラムのしくみを学ぶ 電子回路の実験

***Experiments on Electronic
Circuits to Understand the
Mechanism of Program***



会場：東北大学・カタールサイエンスキャンパスホール
Venue: Qatar Science Campus Hall・Tohoku University
日時：2019年10月26日、11月23日
Date: October 26, November 23, 2019

序文

この小冊子は 2019 年 10 月 26 日と 2019 年 11 月 23 日に行われる仙台市青葉少年少女発明クラブの英語で電子回路の工作の講座の資料としてプログラミングの入門者から、人工知能(AI)の分野の入門としても参考になるように準備しました。

現在のロボットはプログラム内蔵するしくみで動作しています。そのロボットのしくみはパルス回路によってプログラムを順次進行し、各ステップで、組み合わせ論理回路を介して入力された情報によって選択された応答を行います。繰り返される動作は繰り返しの数のデータを加算したりする作業はレジスタやメモリのアドレスを指定してそのアドレスのゲートを開いたり、閉じたりすることによって実行します。

実際のロボットの中央処理装置(CPU)の電子回路は非常に複雑ですが、その基本的な動作を行う電子回路は表紙の写真に例に示すような簡単な回路の工作実験で確認することができます。その体験が、人工知能を持つ電子装置を作ることやプログラムを作る際に現実に根をはった基礎になります。

なお、この小冊子は国際化が進展する将来を考慮してこの小冊子は日本語と英語で説明しています。この工作教室の指導のスタッフはこれをきっかけに優秀な技術者が育つことを期待しています。

Introduction

This booklet was written as the manual for a lecture of the workshop on electronic circuits with English at the Sendai City Aoba Boys and Girls Invention Club on Oct/26 & Nov/23, 2019. The purpose of this booklet is to understand the stored program system. It will be helpful to beginners in programing of the robots but also beginners in the field of artificial intelligence.

The current robot is operating by the stored program system where the program proceeds sequentially by the pulse circuit, and at each step, the response selected by the information entered through the combined logic circuit is performed and proceeds to the next step. Repeated actions are performed by opening or closing the gate of the address by specifying the address of the register or memory to be processed.

The electronic circuits of the central processing unit (CPU) of an actual robot are complex, but the electronic circuit that performs its basic operation is confirmed by the experiments. The sample of circuit is shown in the photograph on the cover. This booklet will help to understand how electronic circuits work in a stored program system. It must be useful for programing and making electronic devices with artificial intelligence.

This booklet is explained in Japanese and English in consideration of the future of internationalization. The teaching stuffs hope that excellent engineers will grow up.

目次	Index
第1章 発光ダイオード	Chap.1 Light Emitting Diode (LED)
1.1 発光ダイオードの形状と原理	1.1 Configuration and principle of LED
1.2 シリコンダイオードとLED	1.2 Silicon diode and LED
1.3 ダイオードの回路の図式解法	1.3 Graphical design method of a diode circuit
1.4 電子回路による知能	1.4 Intelligence by electronic circuit
第2章 トランジスタ	Chap. 2 Transistor
2.1 トランジスタの構造と記号	2.1 Structure and symbol of transistor
2.2 トランジスタの回路の図式解法	2.2 Graphical design of a transistor circuit
2.3 2段縦続接続の反転増幅回路	2.3 Serially connected two inverters
2.4 2段の反転増幅回路の組み立て	2.4 How to assemble two of inverters
2.5 フリップフロップ(記憶回路)	2.5 Flip-flop (Circuit of memory)
第3章 順序制御系の回路要素	Chap.3 Elements of Sequence Control System
3.1 マルチバイブレータ(発振器)	3.1 Multi-vibrator (Oscillator)
3.2 フリップフロップの2進計数動作	3.2 Binary counting operation of Flip-Flop
3.3 単安定マルチバイブレータ	3.4 Mono stable multi-vibrator
第4章 組み合わせ論理回路	Chap.4 Combinational Logic Circuits
4.1 論理積回路	4.1 AND circuit
4.2 論理和回路	4.2 OR circuit
第5章 プログラム内蔵方式の構成	Chap.5 Configuration of Stored Program System
5.1 データを転送する方法	5.1 How to transfer data
5.2 中央処理装置で繰り返される作業	5.2 Routine work of a CPU
第6章 ロボットの制御	Chap.6 Control of Robot
6.1 ロボットの動作のプログラム	6.1 Program on Motion of Robot
6.2 繰り返される動作のプログラム	6.2 Program on repeating of behaviors
[むすび]	[Epilogue]
参考文献	References

[使用する電子部品]

発光ダイオード (立ち上がり電圧1.8V)	2個
バイポーラトランジスタ (2SC1815)	2個
抵抗 470 Ω	2個
抵抗 20k Ω	2個
電解コンデンサ 33 μF	2個
セラミックコンデンサ 0.1 μF	1個
ブレッドボード	1個
単三乾電池	2個
電池ケース	1個

上記の部品はAmazonなどのwebサイトの通信販売で購入することができます。

[ブレッドボードと抵抗のカラーコード]

下図の左側に示すブレッドボードに電子部品の端子を挿入して電子回路を組み立てます。なお、ブレッドボードの+ラインの点と-ラインの接続点は、内部の垂直線で接続されています。しかし、a、b、c、d、e、およびf、g、h、i、jの点は内部の水平線で接続されています。なお、ブレッドボードを曲げると壊れる恐れがあるのでブレッドボードを曲げないで下さい。また、背面の黄色いシールを取り外すと、ブレッドボードの裏側の配線も剥がれることがあるのでシールを取り外さないでください。

電子回路では、回路を流れる電流を制御するために抵抗が使用されます。下図の右に示すカラーバンドが抵抗の数値と誤差を表すために使用されています。

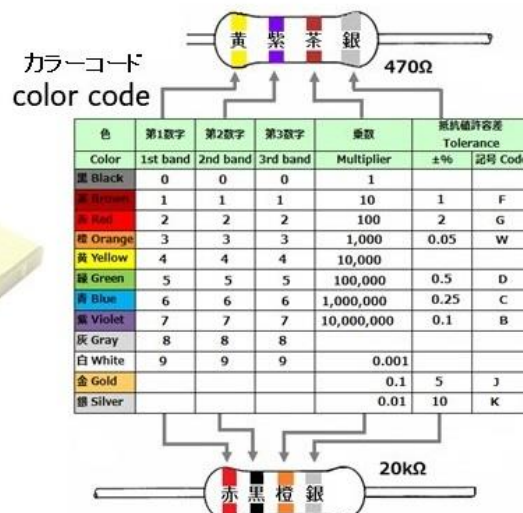
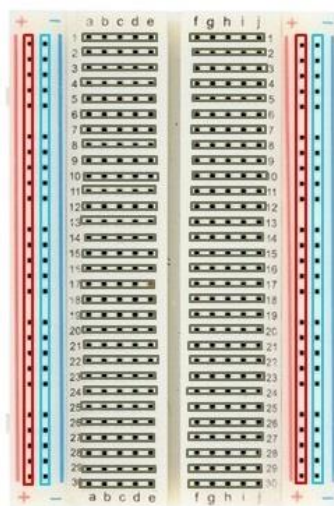
[Breadboard, & Color code of resistor]

Electronic circuits of experiments will be assembled on a bread board shown in left side of the figure below. Each terminal should be inserted into the breadboard. The plus points on the vertical lines and minus points on the vertical lines are connected under the board. On the other hand, the points of "a," b, c, d, e are connected at the under the board by each horizontal lines and f, g, h, i, j on each horizontal line are also connected. Please do not bend the breadboard, because there is a risk of breaking when you bend the breadboard. Also, if you remove the yellow seal on the back, the wiring on the back side of the breadboard may also be removed, so you should not remove the seal.

In electronic circuits, resistance is used to control the current flowing through the circuit. The color bands shown to the right of the figure below are used to represent the number value and error of the resistance.

Points of + line and points of - line are connected vertical lines.

But points of a, b, c, d, e, and f, g, h, i, j are connected vertical lines.



If you bend the breadboard, and it will break.

When you remove the seal, the breadboard will break.

第1章 発光ダイオード Chap.1 Light Emitting Diodes (LED)

1.1 発光ダイオードの形状と原理

1.1 Configuration and principle of LED

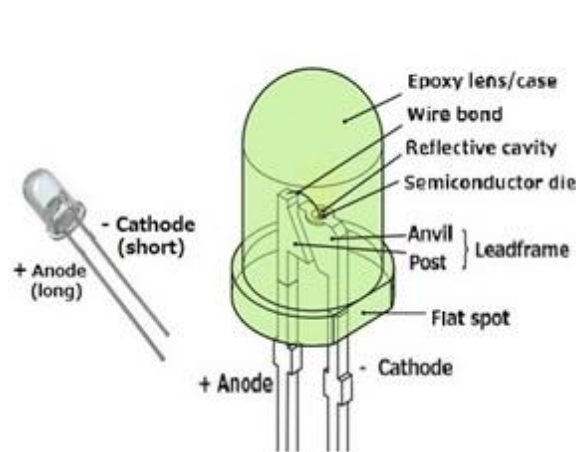


図1. LEDの外形
Fig.1 Configuration of LED

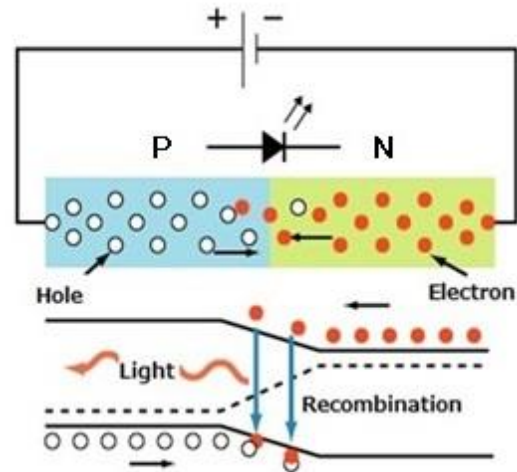


図2. LEDの原理
Fig.2 Principle of LED

図1に発光ダイオード(LED)の構成を示します。2本のダイオードのリード線は長さと同じではありません。陽極のリード線は長く、陰極のリード線は短いです。図2には、発光ダイオードの原理を示します。

図2の下図に示すようにN領域の伝導帯に赤丸で示した自由電子が多く、P領域の価電子帯に白丸で示した正孔が多く存在します。図2の上図に示すように電圧をかけるとLEDのP-N接合は順方向に電流が流れます。この時に、エネルギー準位の高いN領域の伝導帯の自由電子がP領域に拡散して、エネルギー準位の低いP領域の価電子帯に遷移して、エネルギーを光として放出します。反対の極性の電圧を加えると接合部には自由電子も正孔も無くなり電流は流れません。

Fig.1 shows configuration of a light-emitting-diode. The lead wires of the two diodes are not the same length. The lead of the anode is long, and the lead of the cathode is short.

Fig. 2 shows the principle of a light-emitting diode. As shown in the Fig.2, there are many free electrons in the conduction band of N-region, and there are many positive holes in the valence band of the P-region.

When the voltage of forward direction is applied as shown in the Fig.2, the current of P-N junction of the LED flows. In this case, free electrons in the conduction band of N-region diffuse into the P-region. It emits energy as light at the transition to the valence band of the P-region with low energy level. When the voltage of the opposite polarity is added, free electrons and positive holes are disappeared at the junction, and the current does not flow.

1.2 シリコンダイオードとLED

1.2 Silicon diode and LED

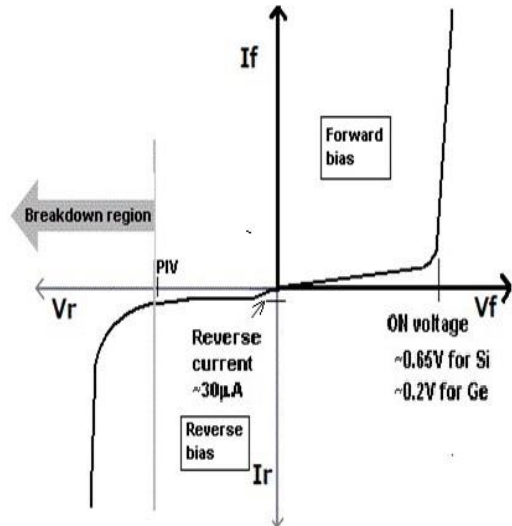


図3. ダイオードのV-I特性

Fig.3 V-I characteristics of Diode

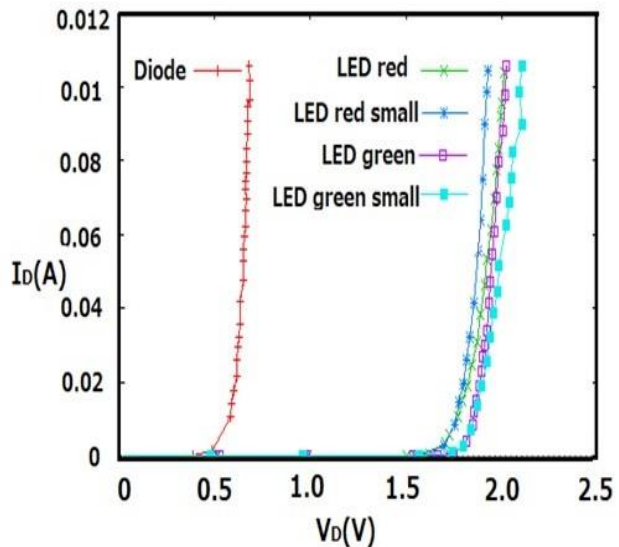


図4. シリコンダイオードとLEDのV-I特性

Fig.4 V-I curves of silicon diode and LED

図3はダイオードの電圧電流(V_D - I_D)特性を示します。ダイオードは順方向の印加電圧で電流が流れ、逆方向の電圧では流れません。図3の縮尺は前方方向と後方方向で異なります。

図4にシリコンダイオードとLEDの V_D - I_D 特性を示します。整流用に用いられるシリコンダイオードは電流が流れ始める電圧が0.7V程度です。他方、LEDは化合物半導体のP-N接合によりできているので電流が流れ始める電圧が高くなり1.8V程度です。この小冊子の実験ではLEDの立ち上がり電圧は約1.8ボルトで、発光の電流値は約2.5mA程度としています。

Fig.3 shows V-I characteristics of diode. The current flows by forward voltage, but it does not flow at the reverse voltage. The scales in this Fig.3 are different in the forward and backward directions.

Fig.4 shows the difference on V-I characteristics of silicon diode and LED. Silicon diode which is used as rectifier have a voltage of about 0.7V at which current begins to flow. On the other hand, LED is made by P-N junctions of compound semiconductors. And the voltage at which current rises is about 1.8V. As for LED that is used in this experiment, the turn on voltage of LED is about 1.8 volt. The value of current for an emission of light is about 2.5 mA.

1.3 ダイオードの回路の図式解法

1.3 Graphical design method of a diode circuit

$$V_{\text{supply}} = 3\text{V}, V_f = 1.8\text{V}, I_D = 2.55\text{mA} = 0.00255\text{A}, \\ R_1(\Omega) = V/I_D = (3 - 1.8)/0.00255 = 470\Omega$$

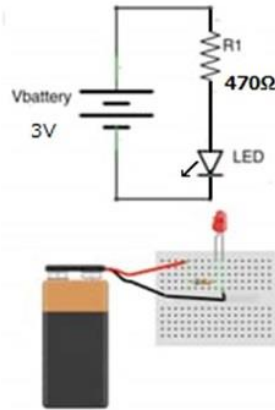


図5. 電流を制限する抵抗
Fig.5 Current Limiting Resistor

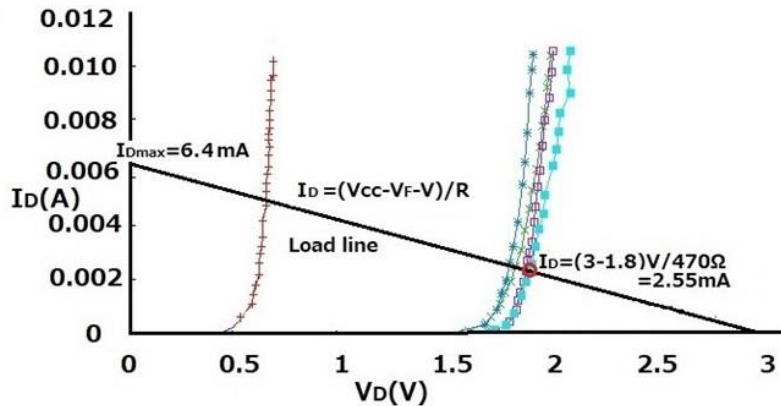


図6. LEDのV-I曲線と負荷線
Fig.6 V-I curve and Load line

図5にダイオードを用いた電子回路の例を示します。LEDを電源に直接に接続すると過電流が流れるので、LEDを保護のする抵抗を回路に挿入する必要があります。

抵抗の値は図式解法では、図6に示すようにダイオードの V_D - I_D 特性と電源側の V_D - I_D 特性（負荷線）を重ねて示し、その交点が両方の V_D - I_D 特性を同時に満足する動作点です[1]。ここで、電源側の V_D - I_D 特性は(1)式で表せます。この式が示す直線を負荷線（ロードライン）といいます。

$$I_D = (V_{CC} - V_f)/R_1 \quad (1)$$

流れる電流は電位差を抵抗の値(R_1)で割った値によって与えられます。電源電圧(V_{CC})が3ボルトでターンオン電圧が1.8ボルトによりLEDの特性を近似した場合、電流2.55mAを流すための抵抗値は1.2ボルトで2.55ミリアンペを割って与えられ、約 $R_1 = 470$ オームとなります。

Fig.5 shows a simple circuit. Since there is a possibility that the overcurrent will flow, the resistor to protect must be inserted. The value of resistor can be designed by a schematic method. That is overlaying the V_D - I_D characteristics of the diode and the V_D - I_D characteristics of the power supply side (load line) as shown in Fig.6. The V_D - I_D characteristic of the power supply side is expressed by Eq. (1).

$$I_D = (V_{CC} - V_f)/R_1 \quad (1)$$

A straight line shown by equation (1) is called a load line [1]. The value of resistance is given by Ohm's law, that is, the difference of voltage divided by current.

In case of the supply voltage is 3 V and turn-on-voltage of LED is 1.8 V, the resistance value for to flow a current 2.55 mA is given by $R = 1.2 \text{ V} / 2.55 \text{ mA}$, that is approximately 470 Ω .

1.4 電子回路による知能

1.4 Intelligence by electronic circuit

The circuit that displays output corresponding to the input
入力に対応した出力を表示する回路

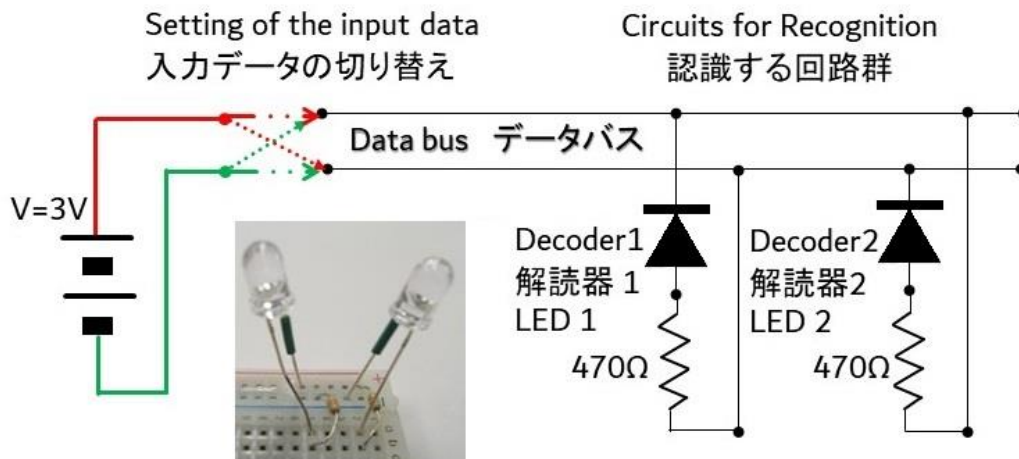


図7. 簡単な解読器
Fig.7 A simple decoder

LED は、電子回路で使用される最も基本的な出力デバイスの一つです。LED1 が発光するように接続すれば、その接続した状態にがなれば発光します。電池の極性を逆にして、LED2 が発光するように接続すれば電源の状態の違いを LED1 と LED2 により示すことができます。これは、IF 入力が $A=B$ であり、出力は C という論理で、何が起きているかという状態を表示することができる回路です。経験したことを記憶して再演することと知能の機能とすれば、図.7 の回路は知能のしくみを示すので、最も単純な人工知能の回路といえます。

LED is the simplest device that provides the signal to a user on the status of what's going on in a circuit. We can assume that the intelligence is the reaction due to what it had experienced, and the operation of intelligence is described by an If then rule, i.e. “if the input is corresponds the preconditions, then the output is as follows”.

The simplest circuit of artificial intelligence is shown in Fig.7. If a LED₁ had been connected at the state of light emitting, it will emit light when it becomes at the state of connected. When LED₂ had been connected at the state of reverse the polarity of the battery, LED₂ will emit light when it becomes at the state of reversed polarity of the battery. That is, the state of the power supply is indicated by LED₁ and LED₂. This circuit shown in Fig.7 possesses the mechanism of intelligence.

第2章 トランジスタ Chap.2 Transistor

2.1 トランジスタの構造と記号

2.1 Structure and symbol of transistor

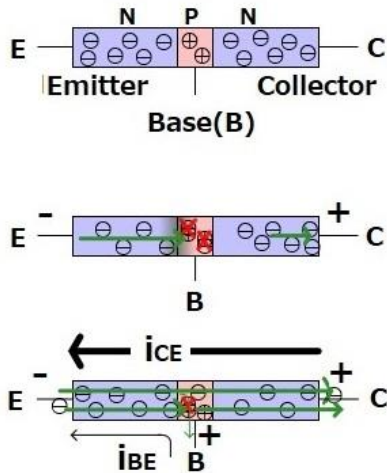


図8. トランジスタの構造
Fig.8 The structure of transistor

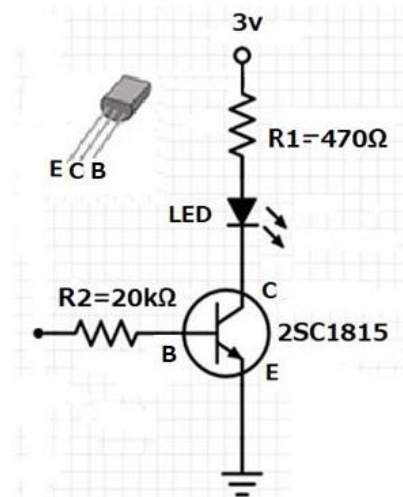


図9. 簡単なトランジスタ回路
Fig.9 A simple transistor circuit

バイポーラトランジスタは、図 8.に示すように半導体の単結晶に N P N と 3 層の領域を形成させて、それぞれをエミッタ(E)、ベース(B)、コレクタ(C)としています。

図 8. の上段に示すように電圧を加えていない状態では中央の P 領域のエネルギー準位が高くなっています。図 8. の中段に示すように C と E の間にだけ電圧を加えると、B と C の PN 接合がダイオードの逆方向になって電流は流れません。ところが、その状態で図 8. の下段に示すように中央の P 領域のエネルギー準位を下げるように B 領域に電圧を加えると B と C 間に電流が流れ、C と E の間に電流が流れるようになります。つまり、トランジスタは B に加える電圧によって C と E の間の電流を制御できるのです。

図 9 は反転増幅器として機能する簡単なトランジスタ回路を示しています。

Bipolar transistors consist of a N-P-N region in a single crystal of a semiconductor, each of which is referred to as emitter (E), base (B), and collector (C) as shown in Fig.8.

The energy level of the central P region is high when no voltage is applied as shown in the upper part of the Fig. 8. If the voltage is applied only between C and E as shown in the middle of Fig.8, the PN junction of B and C become the opposite direction and the current does not flow. However, when a voltage is added to the B region to lower the energy level of the central P region, as shown in the lower part of Fig.8, the current flows between B and C and it allows the current flow between E and C. In other words, the voltage applied to the B region is able to control the current between C and E.

Fig.9 shows a simple transistor circuit that functions as an inverter.

2.2 トランジスタの回路の図式解法

2.2 Graphical design of a transistor circuit

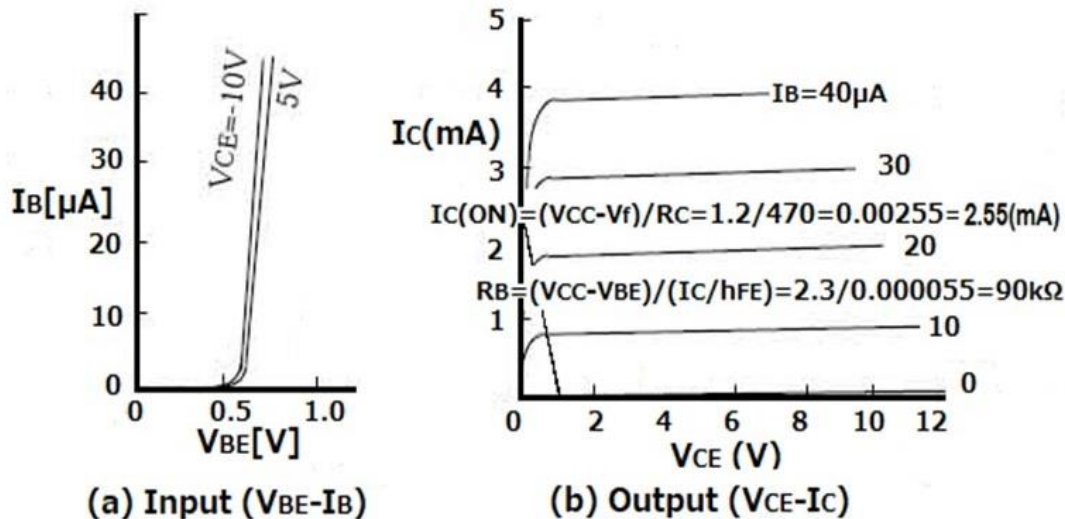


図10. バイポーラトランジスタの特性

Fig.10 Characteristics of bipolar transistor

図 10 にバイポーラトランジスタ 2SC1815 のコレクタ側の I_C - V_{CE} 特性を示します。コレクタ電流はベース電流によって制御され、ベース電流の電流増幅率 h_{FE} 倍が流れます。現在のバイポーラトランジスタの h_{FE} の典型的な値は 200 程度です。

トランジスタでは動作点をベース電流で設定します。図式解法では、図 6(b)に示すようにトランジスタの I_C - V_{CE} 特性と電源側の I_C - V_{CE} 特性（負荷線）を重ねて示します。ベース電流を変化すると動作点は負荷線に沿って変化します[1]。両方の I_C - V_{CE} 特性を同時に満足する交点が動作点です[1]。

動作点を与えるベース電流の設定は 1.3 節で記載した方法で決められます。

図 10 では $h_{FE} = 100$ であり、 $I_B = 0.025 \text{ mA}$ の場合、 $I_C = 2.5 \text{ mA}$ になります。

Fig.10 indicates I_C - V_{CE} characteristics on collector side of bipolar transistor 2SC1815. The collector current of I_C is varied depending on the base current of I_B . The current amplification rate is defined as $h_{FE} = I_C / I_B$. The typical value of current bipolar transistors is about $h_{FE} = 200$.

In the transistor, the operating point is set by I_B . the I_C - V_{CE} characteristics of the transistor as shown in Fig.6(b) and the I_C - V_{CE} characteristics on the power supply side (Load line) are overwritten in the same graph. When I_B changes, the operating point changes along the load line. The intersection that satisfies both I_C - V_{CE} characteristics at the same time is the operating point [1]. The setting of current of I_B is the manner described in Section1.3. Since $h_{FE} = 100$, $I_C = 2.5 \text{ mA}$ at $I_B = 0.025 \text{ mA}$ in case of Fig.10.

2.3 2段縦続接続の反転増幅回路

2.3 Serially connected two inverters

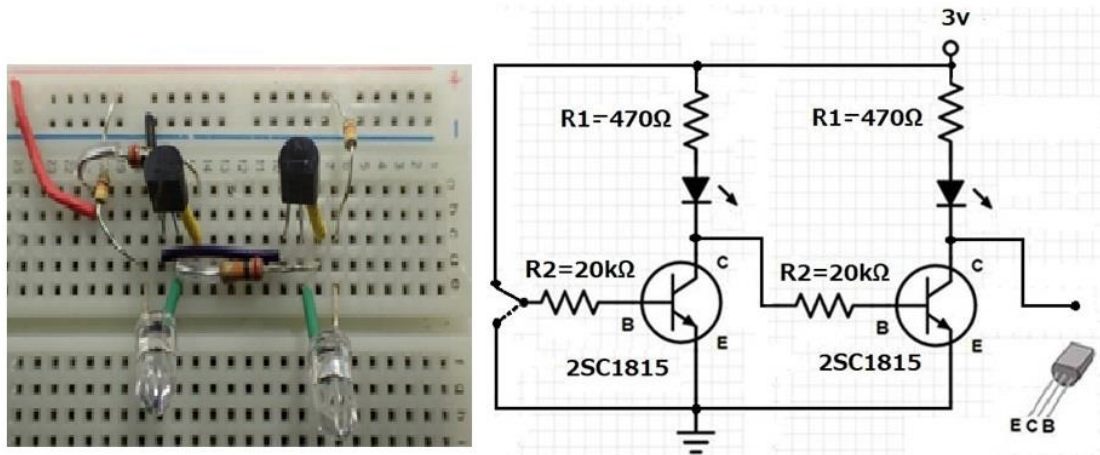


図11. 2段の反転増幅器
Fig.11 Two-stage of inverters

バイポーラトランジスタのコレクタ電流はベース電流によって制御されます。その際に、出力により入力を変化することなく信号の電力は低下しません。

図11に図9の反転増幅器を2段に接続して反転の動作を確認する実験回路を示します。図11の右側は回路図で、左側の写真は実際の回路の写真で回路図の部品の配置を参考にして配線します。

この回路で入力をスイッチONの状態 からOFF状態にし、逆にOFFからONの状態に変えると、各ステージの状態が反転することを確認できます。反転増幅器はNOT回路ともいわれています。なお、図11の実験回路では、 $R_2=20k\Omega$ にしています。この値は、トランジスタがスイッチONとして働く状態を維持するために余分に電流を供給するようにベース抵抗の値は小さく設定しています。

In the bipolar transistor, the current of collector is controlled by the base current. Here, the power of the signal does not reduce without change the input by the output. Fig.11 shows an experimental circuit that is connected two inverters. The picture on the left side of Fig.11 is a picture of the actual circuit. The right side of Fig.11 is a schematic.

The operation of inverter is revealed by a change of the input. The inverted amplifier is also referred to as a NOT circuit. That is, if you change the input state from NOT state of the switch to OFF state, the state of the second stage changes from OFF state to ON state.

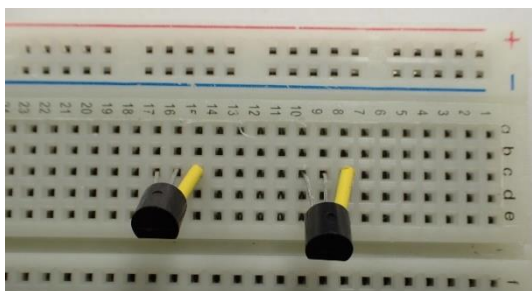
The value of base resistance $R_2=20k\Omega$ in the experimental circuit shown in Fig.11. Here, R_2 is set to supply the current that maintains the transistor at ON state.

2.4 2段の反転増幅回路の組み立て

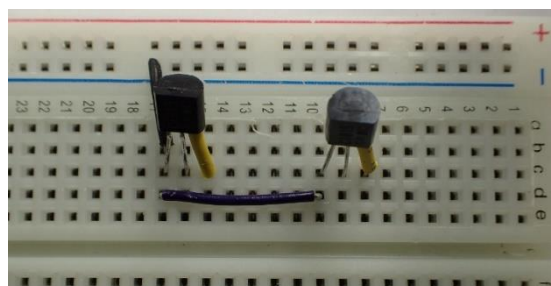
2.4 How to assemble two of inverters

下記の順番で下記の位置に注意深く配線して下さい。動作しない時は最初からやり直して下さい。

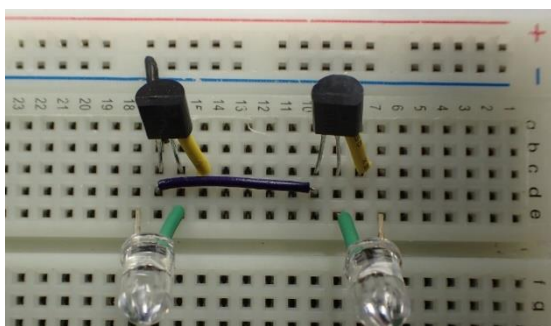
Please carefully wire in the following order. If you did not wire accurately. Try again from the beginning.



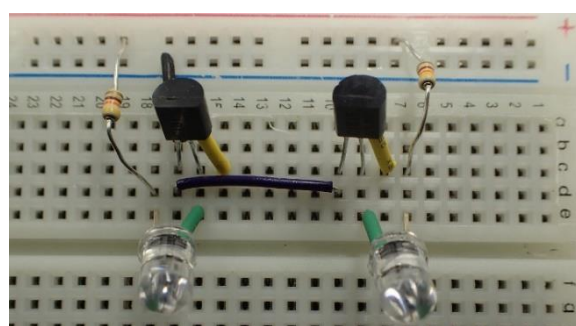
No.1 トランジスタの配線 Wiring of transistors



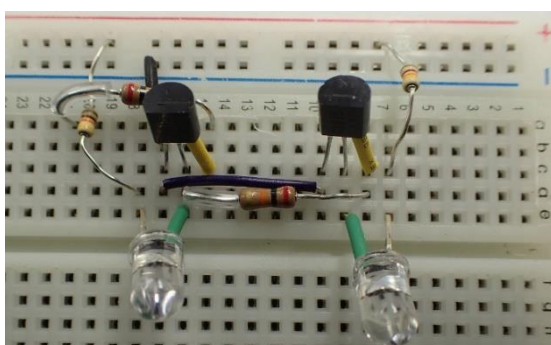
No.2 エミッタの配線 Wiring on Emitters



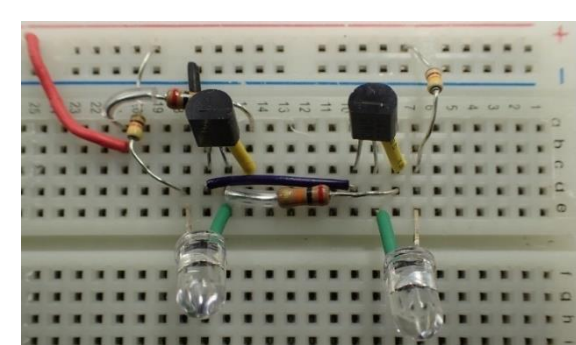
No.3 LEDの配線 Wiring of LED's



No.4 コレクタ抵抗 Resistor of Collector



No.5 ベース抵抗 Resistor of Base



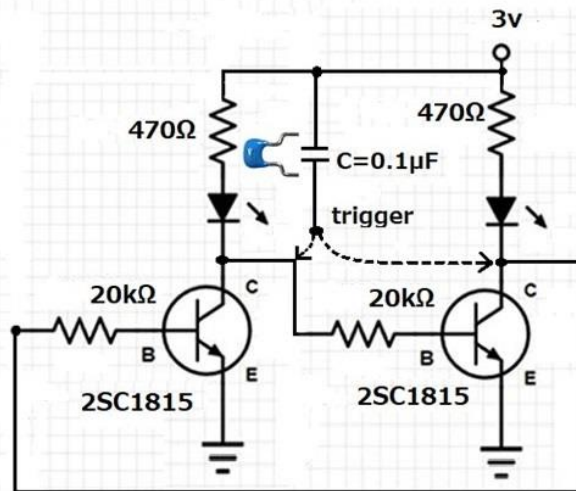
No.6 入力の配線 Wiring of input

[注意]

[ON]トランジスタのベース電流がOFF側のコレクタ抵抗とLEDを流れるため、[OFF]状態側のLEDがわずかに光を放ちます。

Since the base current for [ON] transistor flows through the collector resistor and LED at the OFF side, the LED at [OFF] state side emits slight light.

2.5 Flip-Flop (Circuit of memory)



フリップフロップは、回路の状態を保持します。
状態はトリガーによって変更されます。
フリップフロップはコンピュータの主要な要素です。

Flip-Flop keeps the state of the circuit.

The state is changed by a trigger.

Flip-flop is the main elements of a computer.

図12. フリップフロップ回路
Fig.12 Flip-Flop circuit

図 12 にフリップフロップの回路図を示しています。この回路は一方のトランジスタの ON となれば他方は OFF となります。トランジスタのベースに電流を流すことによって低レベル状態[0]として設定し、電流が流れない状態になればそのトランジスタの電圧が高レベルの状態[1]になります。そこで、どちらかのトランジスタのコレクタの電圧を出力と指定します。

フリップフロップ回路はレジスタ(置数器)として出力のデータを保持するので、データの処理ができます。コンピュータをレジスタマシンと呼ぶことがある程、レジスタはコンピュータで重要な役割を担います。コンピュータではレジスタのデータを組み合わせ論理回路によって処理したデータを転送します。次の入力には前の処理の結果も入力することができるので、フリップフロップ回路の入出力の処理のタイミングの制御で順序を決め時間の進行で行われます。

Fig.12 shows a circuit diagram of flip-flops. This circuit is OFF when it becomes ON of one transistor and the other is OFF. By passing current to the base of a transistor, it is set as a low-level state [0], and if the current does not flow, the voltage of the transistor becomes a high-level state [1]. Therefore, specify the voltage of the collector of either transistor as the output.

The flip-flop circuit holds the output data as a register, so that data can be processed. Since the registers play an important role in a computer, the computer is termed as a register machine. The computer combines data from the register and transfers data processed by logic circuits. The next input may also contain the results of the previous processing, so it is done in the progress of time. The processing is controlled by the timing of the input and output of the flip-flop circuit.

第3章 順序制御系の回路要素

Chap.3 Elements of Sequence Control System

図13にデータの処理を示します。Fig.13 shows a data processing.



図13 状態の遷移

Fig.13 Transition of the state

3.1 マルチバイブレータ(発振器)

3.1 Multi-vibrator (Oscillator)

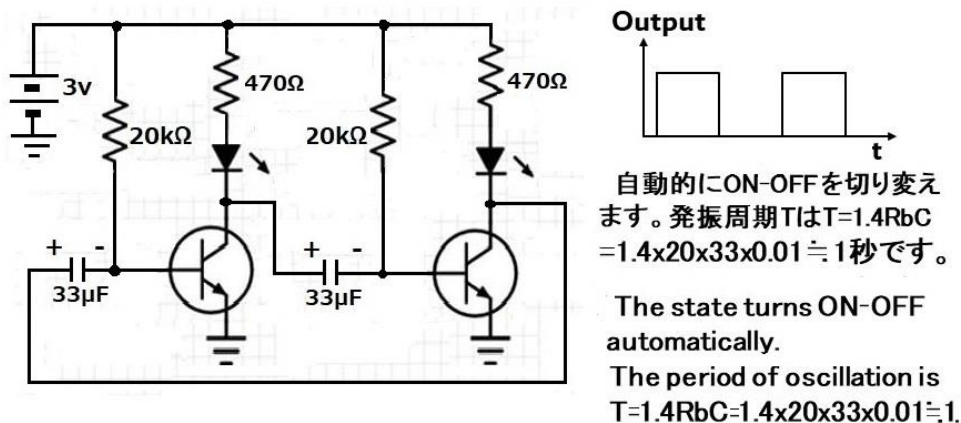


図14 マルチバイブレータ(発振器)
Fig.14 Multi-vibrator (oscillator)

転送のタイミングの制御の信号は発振器で発生したクロックを用いて作ります。

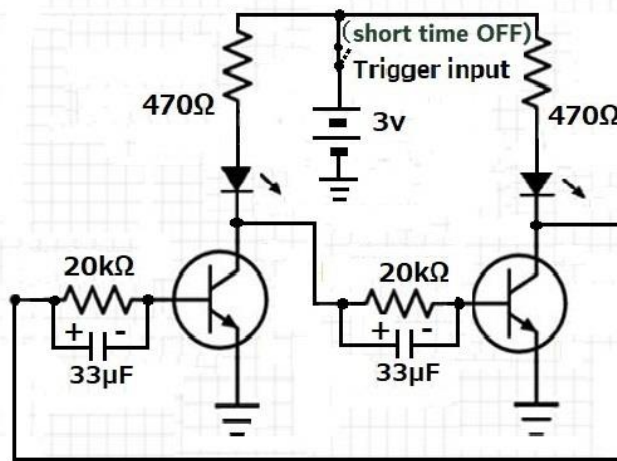
図 14 に矩形波の発振器であるマルチバイブレータを示します。マルチバイブレータの状態は、OFF 状態から ON 状態に、ON 状態から OFF 状態に自動的に変更されます。振動の周期は、結合コンデンサ(C_c)およびベース抵抗(R_b)の値によって与えられます。その周期 T は $T = 1.4CR_b$ であたえられ、その数値は約 1 秒です。

出力はどちらかのトランジスタのコレクタ端子から取り出します。

The clock signal generated by the oscillator is used to create a signal for timing control. The circuit shown in Fig.14 shows a multi-vibrator. The state of multi-vibrator changes from "Off" state to "On" state and from "On" state to "Off" state automatically. The period of oscillation is given by the value of coupling condenser "C" and base resistor "R_b". The period "T" is equal to 1.4 times of "C" multiplied "R_b", the numerical value of the period is about 1 second.

3.2 フリップフロップの2進計数動作

3.2 Binary counting operation of Flip-Flop



トリガー（極短時間OFFする）度に状態が切り替わります。

電解コンデンサー（33μF）はメモリーとして機能します。

電解コンデンサーには極性があります。

The state is changed at each trigger (short time OFF).
The capacitor (33μF) as a memory.
The Electrolytic capacitor has a polarity.

図15 計数動作をテストする回路

Fig.15 The circuit that tests counting operation

図 15 は、フリップフロップでベース抵抗と並列にコンデンサ(C)を接続すると短時間だけ電源を OFF することで状態が変更され、二進の計数の動作を確認できます。ここで、33 マイクロファラドのコンデンサがメモリーとして機能します。

OFF のトランジスタのコレクタと ON のトランジスタのベースの間の電位差は $V_{CC} - V_{LED} - V_{BE} = 3 - 1.8 - 0.7 = 0.5(V)$ です。他方、ON のトランジスタのコレクタと OFF のトランジスタのベースの間の電位差はほぼ 0 です。そこで、電源を短時間切断するとトランジスタに電流が流れ始める際に、充電されているコンデンサが ON となっていたトランジスタのベース電流を抑制するので、OFF となっていたトランジスタのベース電流が先に流れて、状態が反転します。

なお、使用した電解コンデンサには極性があります。

Fig.15 shows the circuit in which the capacitor (C) is connected in parallel with the base resistor in the flip-flop. The state of this circuit is changed by turning the power OFF for a short time. That is, each capacitor 33μF acts as a memory, and this circuit works as a binary counter.

The potential difference between the collector of OFF transistor and the base of ON transistor is $V_{CC} - V_{LED} - V_{BE}$. On the other hand, the potential difference between the collector of ON transistor and the base on OFF transistor is approximately zero. Therefore, when the power supply is cut for a short time, the current begins to flow to the transistor as follows. The base current of ON transistor is suppressed by the charge of capacitor, so the base current of the OFF transistor begins flow earlier. So, the state reverses.

In addition, the electrolytic capacitor used has polarity.

3.3 単安定マルチバイブレータ

3.3 Mono stable multi-vibrator

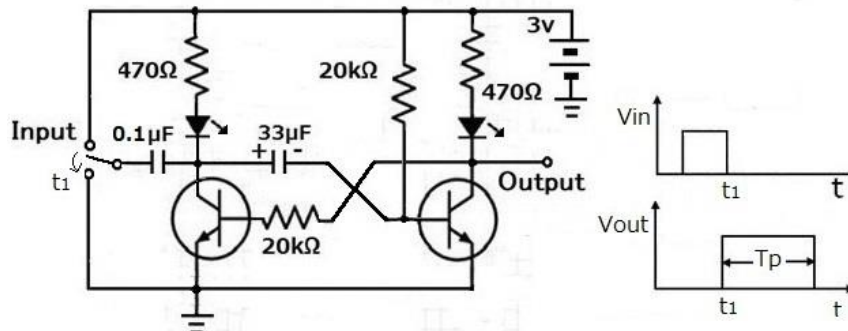


図16 モノマルチバイブレータ
Fig.16 Mono multi-vibrator

図 16 に単安定マルチバイブレータの回路図を示します。この回路に右上の図のように入力電圧が低レベルになると決まったパルス幅の高い正のパルスを発生します。そこで、この回路はパルス遅延要素に用いられます。

この回路は待機状態では入力側のトランジスタが OFF 状態で出力側のトランジスタが ON です。入力側のトランジスタのコレクタの電圧低下がコンデンサを通して出力側のトランジスタのベース電圧を下げてその変化が循環して、出力側のトランジスタが OFF 状態になり、発光ダイオードは発光せず、コレクタ電圧は高いレベルになります。しかし、一旦はコンデンサ($33\mu\text{F}$)に待機状態で充電された電荷により OFF 状態になりますが、やがてベース端子に $R=20\text{k}\Omega$ を通して 電源から時間をかけて充電することにより、ON 状態に復帰します。

なお、この遷移動作を 4.2 で述べたマルチバイブレータが繰り返しています。

Fig.16 shows a schematic of a single-stable multi-vibrator. When the input voltage is at a low level as shown in the figure in the right side of this circuit, a positive pulse with a fixed pulse width is generated. Therefore, this circuit is used for pulse delay elements.

In the standby state, the transistor on the input side is OFF and the transistor on the output side is ON. The voltage drop of the collector of the input side of the transistor lowers the base voltage of the transistor on the output side through the capacitor, and the change circulates, the transistor on the output side becomes OFF state, then, the light emitting diode does not emit light, and the collector voltage is high. However, the OFF state will be returned to ON state by charging capacitor $33\mu\text{F}$ from the power supply through the $R=20\text{k}\Omega$. The time interval of OFF state is fixed by the circuit. Note that the multi-vibrator describes this transition behavior in 4.2.

第4章 組み合わせ論理回路

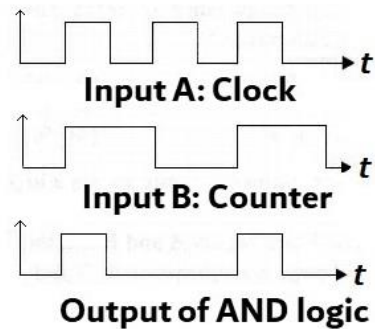
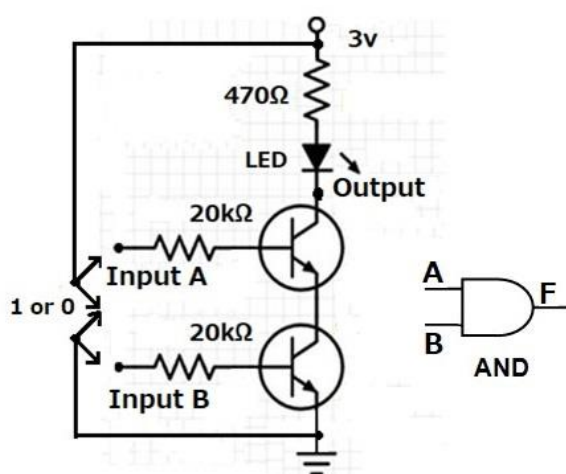
Chap.4 Combinational logic circuits

4.1 論理積回路

4.1 AND circuit

AND Circuit outputs ON only if all inputs are ON.

全ての入力がONの場合だけ出力がONとなる回路



Truth table 真理値表

Input A	Input B	Output F
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

図17. 論理積回路

Fig.17 AND circuit

図 17 の左に AND 回路を示し、中央に記号を示します。AND 回路は、図 17 の右下の真理値表に示すように全ての入力が ON の場合にオンに出力されます。

AND 回路の多数の入力を一つの出力に絞る機能は入力信号を認識する回路のプログラム可能な論理素子アレイ(PLA)として使われています[2]。PLA の AND 平面では、全ての入力に反転したデータも並列にして、ON 状態となった全ての出力を一つの AND 回路の入力群にして、書き込んだ状態になった時だけ出力させる組織を作っています。

Fig.17 left side is the circuit that has the function of “AND” logic, and the symbol is shown in the center. The output of AND circuit is 1 at the case that every input become 1 as shown in the truth table at the bottom right of Fig.17. The AND circuit changes many inputs to one output. This ability to narrow down many inputs to a single output is used as a Programmable Logic Array (PLA) for the recognition [2].

In the AND plane of the PLA, every inputting lines include inverted input together, and all inputting lines in the ON state are connected as inputs of an AND circuit as the implementation, the circuit is output only when the data become the same as written.

4.2 論理和回路

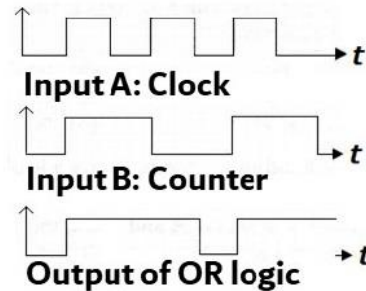
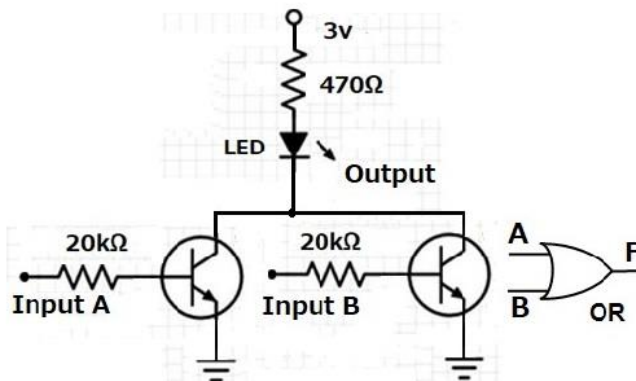
4.2 OR circuit

Output of OR circuit become 1 in case of any inputs become 1.

一方の入力および両方の入力にデータが入力した場合に出力する回路

OR circuit is an element of the adder.

OR 回路は加算器の要素になります。



Truth table 真理値表

Input A	Input B	Output F
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

図18. 論理和回路

Fig.18 OR circuit

図 18 の左側に OR 回路を示し、中央部に OR 回路の記号を示します。OR 回路は図 18 の右下に示す真理値表に示すように入力のいずれかが ON になった場合に ON を出力します。様々な動作で共用する多数の筋肉の様な組織においては出力の指令を幾つもの筋肉に配信します。その回路網に出力要素の入力の回路に一つでも入力があれば出力する OR 回路が使われます。そこで、それぞれの駆動器の出力は入力群の論理積の論理和になります[3]。PLA では OR 回路は出力部に使われています[2]。高度な回路網では AND 回路で結ばれる入力群と OR 回路で結ばれる出力群は階層構造によって要素の可動効率をあげています。このネットワーク構造は言語表現と同じです。

Fig.18 shows an OR circuit. The or circuit symbol is shown at the center of the figure. OR circuit prints ON when one of the inputs is ON, as shown in the truth table. The function of changing one input to many outputs of an OR circuit is used for circuits that deploy output commands at the output unit. The drive is shared with various outputs. Therefore, it can be shared with various outputs using the OR circuit as the input of each drive such as PLA [2].

In general, one of the outputs is expressed by logical OR of the logical AND of the inputs. Although the connection between inputs and the outputs has the meaning, the high efficiency of elements is achieved by the layered structure in an advanced network of circuits. This network structure is the same as linguistic expression.

第5章 プログラム内蔵方式の構成

Chap.5 Configuration of Stored Program System

図 19 の上段に示すようなプログラムでは、下の段に示すような回路でデータが転送されます。ここで、配線群(バス)はコンピュータの重要な要素です。

In a program shown upper of Fig.19, the data are transferred in the processor shown in under of Fig.19. Wires (buses) are important elements in the data processing.

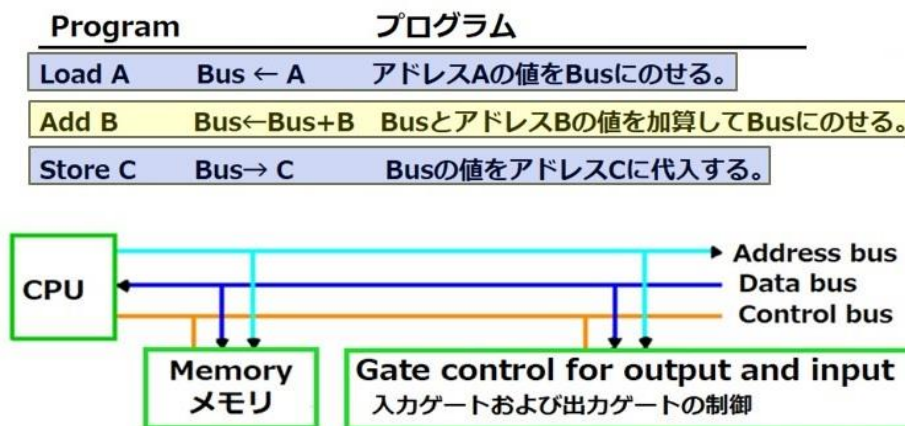


図19. データ処理におけるバスの役割
Fig.19. Role of Bus in data processing

5.1 データを転送する方法

5.1 How to transfer data

プログラム内蔵方式ではメモリに格納されたプログラムはタイミングコントロール信号でレジスタに呼び出されて処理されます。

まず、アドレス・データとコマンドが制御バスにロードされます。データの転送は、割り当てられたアドレスの出力をデータバスに接続され、書き込むアドレスのゲートを開くことによって実行されます。このような操作の時間進行のタイミング信号は、クロック(3.1 発振器)とカウンタ(3.2 計数器)によって得られます。

Most of today's computers use the stored program system where the program is stored in the memory. The programs are executed by sequential control. That is, the stored data are loaded on the register at the timing of control signal. Owing to this mechanism, the computer is sometimes called as a register-machine. The address and commands are loaded on the control bus. The data are transferred at the timing of opened the gate to be written within the time when the gate of memory to be read opens. The timing pulse of such sequential operations is given by clock and counter.

5.2 中央処理装置で繰り返される作業

5.2 Routine work of a CPU

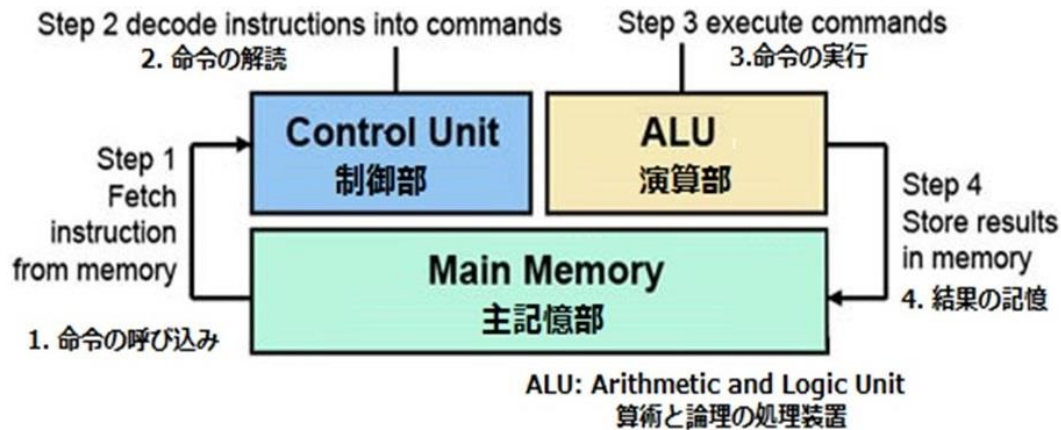


図20. 中央処理装置の繰り返し作業

Fig.20 Machine Cycle of Central Processing Unit

図 20 に典型的な中央処理装置(CPU)の構成を示します。CPU で実行すべき命令の位置はプログラム カウンタで指定されます。夫々の動作はそれぞれの解読回路によって選定されて実行されます。その稼働のタイミングはクロック信号により与えられます。ジャンプ命令で条件分岐したり、ループするサブルーチン进行操作する際にはプログラム カウンタを操作します。

メモリに記憶したプログラムの一つのステップが図 20 に示すように 4 つに分けられた CPU の一連の動作によって実行されます。ステップ 1 では メモリから命令を取得します。ステップ 2 では命令を解読します。ステップ 3 では命令を実行します。ステップ 4 ではメモリに結果を保存します。

Typical configuration of CPU is shown in Fig.20. It works sequentially according to the program that is stored in the memory. The program counter specifies the location in memory of the instruction to be executed. Each instruction stored in the memory has an instruction code that specifies what to do and an operand that indicates the information used in the instruction. The operation is identified by its own decoding circuit and it carried out at regular times by the clock signal. If there is a jump instruction, it manipulates the program counter in order to manipulate subroutines by branching, looping.

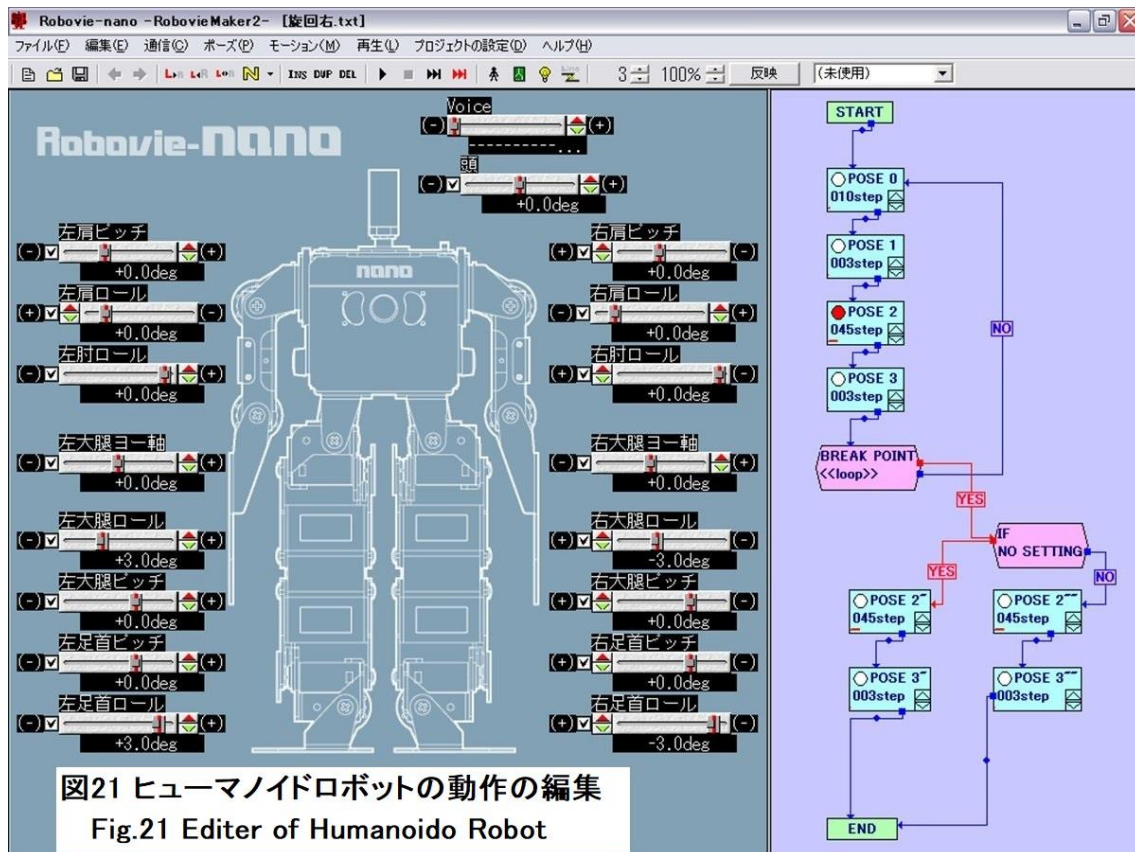
The routine operation of a CPU is divided into four parts as shown in Fig.20. Step 1 takes instructions from memory. Step 2 deciphers the instructions. Step 3 executes the instruction. Step 4 saves the results in memory. Each operation is identified and carried out by its own decoder.

第6章 ロボットの制御

Chap.6 Control of Robot

6.1 ロボットの動作のプログラム

6.1 Program on Motion of Robot



人間型のロボットは関節部にサーボ モーターがあります。サーボモーターは、回転軸の角度を検出するセンサの角度と、指令された角度と差を自動的になくすようにして、指令された角度に保ちます。市販の小型のロボットではプログラムが容易に作成できるように設定値を表示しする専用のソフトウェアが準備されています。

図21に示す例[4]では右側の赤丸印の姿勢(POSE)が左の図で表示されており、その動作の遷移時間を下の段に表示されています。サンプルのプログラムが準備されていて、その例を参考にしてオリジナルな動作が作成できます。

A humanoid robot possesses many servo motors. The servo motor detects the difference between the angle of the sensor on the axis of rotation and the angle to be set, and it eliminate the difference automatically. So, it keeps the angle at the programmed value. Commercially available robots usually have their own editor for the programing as shown in Fig.21 [4]. Here, the [POSE] of which is marked by the red circle on the right is displayed in the Fig.21 on the left, and the transition time of the operation is displayed in the lower column of the [POSE].

You can use the example program as a guide to create your original behavior.

6.2 繰り返される動作のプログラム

6.2 Program on repeating of behaviors

プログラム内蔵方式ではメモリのアドレスを指定して、データを処理します。

Data are processed by specifying the address of the memory in a stored program system.

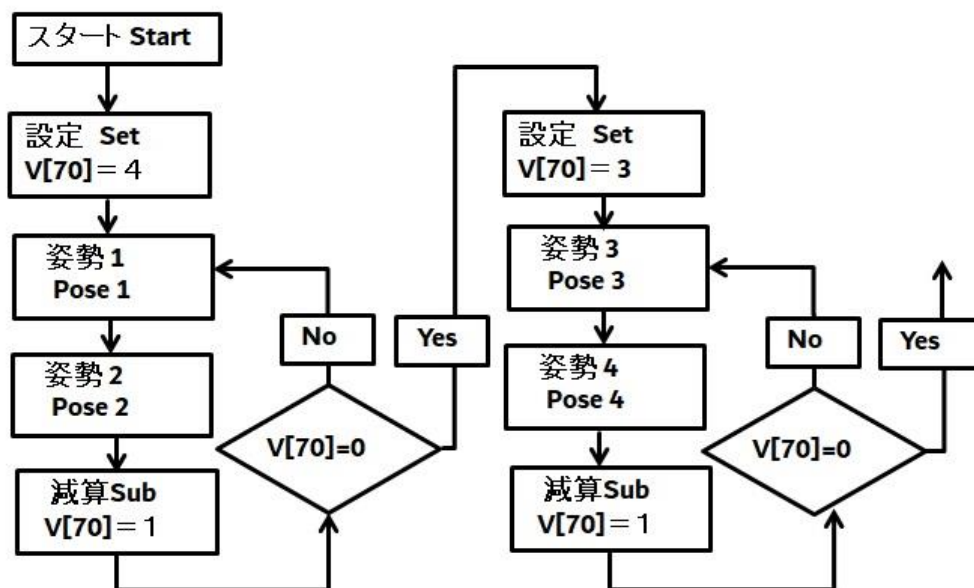


図22 繰り返される動作の制御

Fig.22 Control of repeating behavior

図22では4回の繰り返される動作と3回の繰り返される別の動作を行うプログラムを示しています。ここでは、繰り返しの数を記憶するメモリの場所を70番地V[70]として、初期を設定し、データを動作の終わりに70番地のメモリの数値を1減算する処理をして、その結果の数値が0になるまでループさせています。

プログラム内蔵方式を実現する回路のしくみから繰り返し動作がこのようなプログラムなることが理解できます。

Fig.22 shows a program that performs four times of repeated behaviors and three times of repeated the other behaviors. The location of the memory to remember the number of repetitions is set to No.70(i.e. V[70]), and the initial is set, the data is subtracted by one from the memory of No.70 at the end of the operation, and the resulting number is looped until the number becomes zero.

This program is understandable from the mechanism of the circuit which realizes the stored program.

[あとがき] [Epilogue]

今日のコンピュータやロボットはプログラム内蔵方式であり、複雑な電子回路によって動作しています。プログラミングする際には回路はブラックボックスとして扱われるのが常です。ところがプログラムはプログラムを扱う電子回路群に依存しています。そのしくみを理解することによって様々なプログラミングに柔軟に対処できます。

ハードウェアを理解することは困難だと考えられてきましたが、その壁を乗り越えることにより新たな技術の発展を生み出す可能性があります。そこで、基本となる電子回路を制作して、実際に動作させる体験によりプログラム内蔵方式のしくみを理解するという試みをしました。この小冊子は情報を処理する仕組みを理解するために小学生が実験できる電子回路とその仕組みがどのように実用されているか説明しています。この小冊子が新しい技術が誕生することに貢献することを期待しています。

Today's computer or robot is a stored program system. Since the device is realized by many electronic circuits, the electronic circuits are usually treated as a black box. However, the program relies on the electronic circuits that handle the program. By understanding how the circuits handle the data, we can easily deal with a variety of programming. It has been thought that it is difficult to understand the hardware. But overcoming that barrier may create new technological developments. Therefore, we tried to make a basic electronic circuit and understand the mechanism of the stored memory.

This booklet describes the experiments of electronic circuits those are possible to carry out by student of elementary school, and explanations to understand how hardware works were included. That is not as difficult as expected. The staffs hope that this booklet will contribute to the birth of new technologies in the future.

[参考文献]

- [1]. Donald L. Schilling, Charles Belove, Electronic Circuits: Discrete and Integrated, McGraw-Hill Co. Inc, 山中惣之助, 宇佐美與一訳, “トランジスタと IC のための電子回路 (1 アナログ編)”, 1982/4.
- [2]. Carver Mead, Lynn Conway, “Introduction to VLSI systems”, Addison-Wesley Pub. Co, 1980, 菅野卓雄, 榊 裕之 (監訳), 超 LSI システム入門, 培風館, 1981.
- [3]. John W. Carter, “Digital Designing with Programmable Logic Devices”, Prentice Hall, 1997.
- [4]. ロボット用小型 CPU ボード 「VS-RC003」専用ソフトウェア, Robovie Maker II, V-stone, 2007.

本小冊子の著作権は下記著者が所有しています。著者に無断で出版すること、および本小冊子の図面を出版物に出典の記載することなく掲載することを禁止します。

The copyright of this booklet is owned by the following authors. It is prohibited to publish this booklet without the author's permission or to include the drawings of this booklet in the publications without describing of its source.

著者: 唐澤 信司 Author: Shinji Karasawa

E-mail: shinji-karasawa@kbh.biglobe.ne.jp