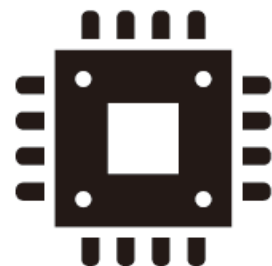


C 言語ではじめる Raspberry Pi 徹底入門

章末問題 Chapter 4 ～ Chapter 9

第 4.1 版



目 次

目 次.....	2
はじめに.....	4
解答例のソースコードのダウンロードの方法.....	4
電子部品と GPIO の対応表.....	7
全体の回路図.....	8
Chapter 4 章末問題.....	10
【問題 4-1】 LED を2つの点灯パターンで交互に点灯させるプログラム.....	11
【問題 4-2】 2 進数でカウントアップのプログラム.....	11
【問題 4-3】 左シフトを繰り返す LED 点灯のプログラム.....	12
【問題 4-4】 左シフトと右シフトを繰り返す LED 点灯のプログラム.....	12
【問題 4-5】 キーボードから入力された数値を 2 進数で LED に表示するプログラム.....	13
Chapter 5 章末問題.....	14
【問題 5-1】 タクタイルスイッチで LED を点灯させるプログラム(その1).....	17
【問題 5-2】 タクタイルスイッチで LED を点灯させるプログラム(その2).....	17
【問題 5-3】 タクタイルスイッチで LED を点滅させるプログラム(その1).....	18
【問題 5-4】 タクタイルスイッチで LED を点滅させるプログラム(その2).....	18
【問題 5-5】 複数の割込み処理をするプログラム.....	19
【問題 5-6】 3入力の多数決プログラム.....	20
【参考 5-1】 割込み処理でオルタネート動作させるプログラム.....	21
【参考 5-2】 ビットフィールドで LED と SW の変数を表現するプログラム.....	26
Chapter 6 章末問題.....	29
【問題 6-1】 ソフトウェア方式 PWM でデューティ比を変えるプログラム.....	30
【問題 6-2】 ソフトウェア方式 PWM で約 440Hz の矩形波を発生させるプログラム.....	30
【問題 6-3】 ハードウェア方式 PWM で約 440Hz の矩形波を発生させるプログラム.....	31
【問題 6-4】 電子ピアノのプログラム.....	32
【問題 6-5】 電子オルゴールのプログラム(その1).....	35
【問題 6-6】 電子オルゴールのプログラム(その2).....	42
Chapter 7 章末問題.....	43
【問題 7-1】 温度測定部の関数をライブラリに登録する.....	43
【問題 7-2】 温度を LCD に表示するプログラム(その1).....	44
【問題 7-3】 摂氏と華氏に切り替えて LCD に表示するプログラム.....	44
【問題 7-4】 測定した温度データをファイルに保存するプログラム.....	45
【参考 7-1】 起動したときに LCD に IP アドレスを表示させる.....	47
Chapter 8 章末問題.....	49
【問題 8-1】 D/A 変換処理の関数をライブラリに登録する.....	49
【問題 8-2】 A/D 変換処理の関数をライブラリに登録する.....	50

【問題 8-3】 D/A 変換して出力した電圧を A/D 変換するプログラム	50
【問題 8-4】 A/D 変換した値を LCD に表示するプログラム	51
【問題 8-5】 A/D 変換した値を横棒グラフで LCD に表示するプログラム	51
【問題 8-6】 可変抵抗で LED の明るさを制御するプログラム	53
【問題 8-7】 可変抵抗で圧電サウダの周波数を制御するプログラム	54
【問題 8-8】 電圧を測定してファイルに保存するプログラム	55
【問題 8-9】 sin 関数で正弦波の信号を出力するプログラム	56
Chapter 9 章末問題	58
【問題 9-1】 静止画のエフェクトを確認するプログラム	59
【問題 9-2】 人を検知したら Pi カメラで撮影するプログラム	59
参考文献/参考資料	62

はじめに

「C 言語ではじめる Raspberry Pi 徹底入門」(以下、「徹底入門」)の学習内容を利用して、読者が応用力を習得するために章末問題を作成しました。そのため、章末問題を解くためには、「徹底入門」の知識、開発環境、ハードウェア等が必要になります。

章末問題には、複数の割込み処理、電子オルゴールにおける楽譜の配列化、測定した時刻とデータのファイル化、人感センサの活用などの応用的な内容が含まれています。新たに追加した技術的な内容については解説を加えています。

各問題の解説については、解答例のソースコードにコメントを記述しましたが、少し複雑な問題についてはヒントしてフローチャートや部分的なソースコードを掲載しています。「徹底入門」を読み返しながら、取り組んでください。また、問題とは別に、「ビットフィールドの使い方」などの参考事例も載せました。

解答例のソースコードは、著者の GitHub の Web サイトからダウンロードできますが、「答は一つではない」ので、ご自身の着眼点やアイデアを大切に、チャレンジしてください。

章末問題の学習法は自由ですが、「徹底入門」の各 Chapter を学んだ直後に取り組むと、より学習効果が期待できるでしょう。

解答例のソースコードのダウンロードの方法

Raspberry Pi(以下、ラズパイ)の Web Browser で、著者の GitHub の Web サイトを開きます。著者の GitHub の Web サイトの[View on GitHub]をクリックします(図 1-101)。

<https://tamamori2020.github.io/raspi-gh1/>

図 1-101: 著者の GitHub のホームページ



ディレクトリを開いて個々のファイルをダウンロードできますが、サイト内のファイルを一括してダウンロードする方法を説明します。図 1-102 に示す Web サイトの①[Code] (①) ⇒ [Download ZIP] (②) をクリックします。ダウンロードが完了すると、ラズパイのダウンロードフォルダに「raspi-gh1-master.zip」ファイルが保存されます。

図 1-102: 著者の GitHub のダウンロードのページ

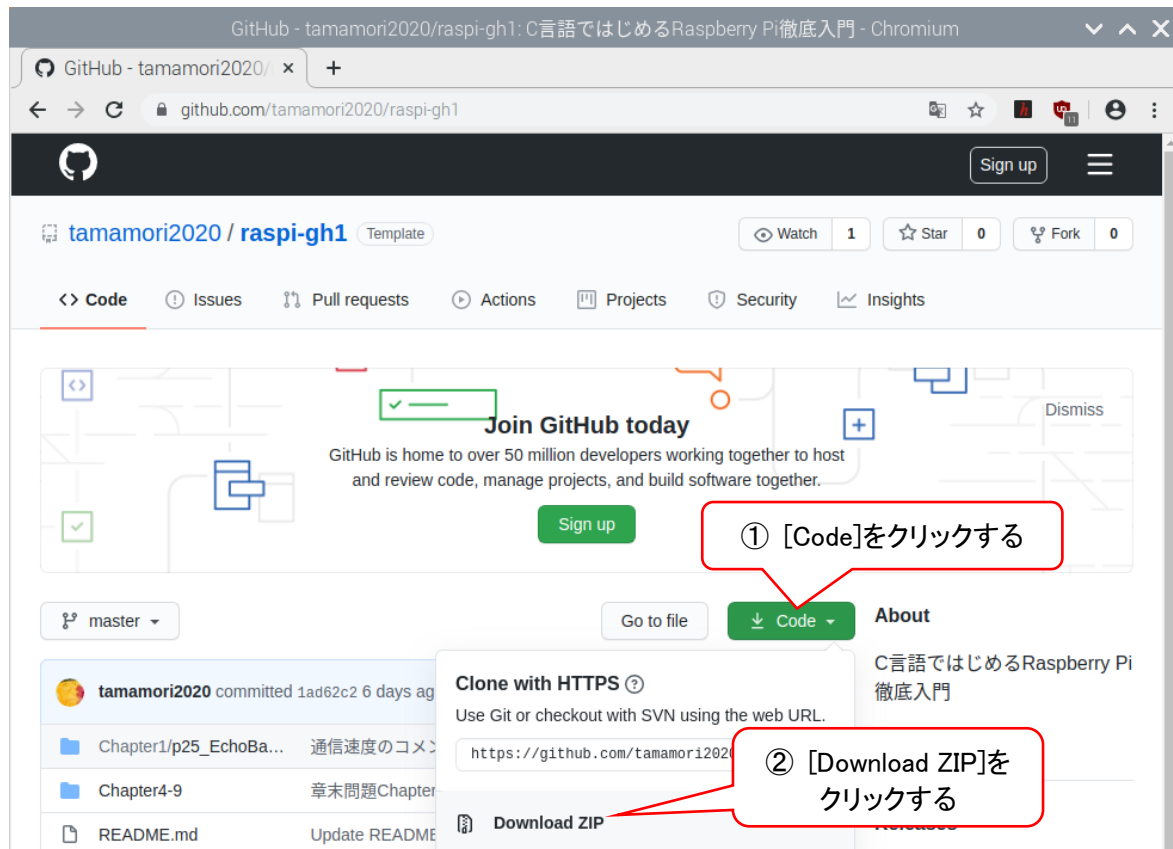


図 1-103 のようにダウンロードフォルダを開いて、「raspi-gh1-master.zip」を右クリック① ⇒ [ここでファイルを展開] ② をクリックします。展開が終了すると、「raspi-gh1-master」フォルダが作成されます。そのフォルダをダブルクリックして、「Chapter4-9」フォルダ内のすべての内容を「/home/pi/MyApp」にコピーします。

図 1-103: ZIP ファイルの展開の方法



「Chapter4-9」フォルダには、「未完成ライブラリ」と「完成ライブラリ」の2つのフォルダがあります。7章以降の章末問題では、「徹底入門」で作成したライブラリ libMyPi.a に関数を追加していきます。

章末問題でライブラリの登録の課題を行う場合は、「徹底入門」で読者が作成したファイル MyPi.c と MyPi.h を使用してください。読者のファイルが無い場合は、「未完成ライブラリ」のファイルを「/home/pi/MyApp」にコピーして使用してください。

また、章末問題のソースコードを直ぐに動作確認したい場合は、「完成ライブラリ」のファイルを「/home/pi/MyApp」にコピーして使用してください。なお、「完成ライブラリ」にあるライブラリ libMyPi.a は、Pi 3/3B+および Pi 4B で動作を確認していますが、将来的にラズパイや WiringPi のバージョンアップ等により動作しない場合があります。本章末問題は、「徹底入門」の前付に準じます。

必ずお読みください

本書では、次のようなシステム構成を前提に解説しています。

- 本体 : Raspberry Pi 3/3B+および4B
- OS : Raspbian (Buster) 2019-09-30版 (NOOBS Ver.3.2.1)
- ディスプレイ : HDMI仕様
- キーボード・マウス : USB仕様
- SDカード : microSD SDHC 16GB スピードクラス10
- ネットワーク環境 : Raspberry Piに内蔵した無線LAN (Wi-Fi) でインターネットに接続

本書は、Windows PCやインターネットの一般的な操作を一通りできる方を対象にしているため、基本的な操作方法などは解説していません。C言語や電子回路の基本的な知識についても、習得されていることを前提にしています。電子部品や工具などを使用する際は、ケガなどをされないようにご注意ください。また、電子部品は静電気に弱いので取り扱いにもご注意ください。

本書のサポートページについて

本書で利用するソースコードなどが記述されたサンプルファイルと追加情報や、正誤表、本書発行後にバージョンアップなどにより設定手順などに変更が生じた場合の補足情報は、本書サポートページに掲載しています。

- 本書サポートページ
<https://gihyo.jp/book/2020/978-4-297-11299-8>

本書に記載された内容は、情報の提供のみを目的としています。したがって、本書を用いたご利用は、必ずお客様自身の責任と判断によって行ってください。これらの情報によるご利用の結果について、技術評論社および著者はいかなる責任も負いません。

本書記載の情報は、2020年1月現在のものを掲載していますので、ご利用時には変更されている場合もあります。また、ソフトウェアに関する記述は、とくに断わりのないかぎり、2020年1月時点での最新バージョンをもとにしています。それぞれバージョンアップされる場合があり、本書での説明とは内容などが異なってしまうこともあり得ます。本書ご購入の前に、必ずバージョン番号などをご確認ください。

本書の配線図は「Fritzing」(<https://fritzing.org/>)を使って描いたものを使用しています。

以上の注意事項をご承諾いただいたうえで、本書をご利用願います。これらの注意事項をお読みいただくだけでなく、お問い合わせいただいても、技術評論社および著者は対処しかねます。あらかじめ、ご承知おきください。

本書で記載されている会社名、団体名、製品名、サービス名などは、一般に関係各社・団体の商標または登録商標です。なお、本書では™、®などは明記していません。また、本書では、通称やそのほかの名称で記述する場合がありますが、あらかじめご了承ください。

著者のサポートページにも有益な情報をアップしていますので、是非ご参照ください。

<http://raspi-gh1.blogspot.com/>

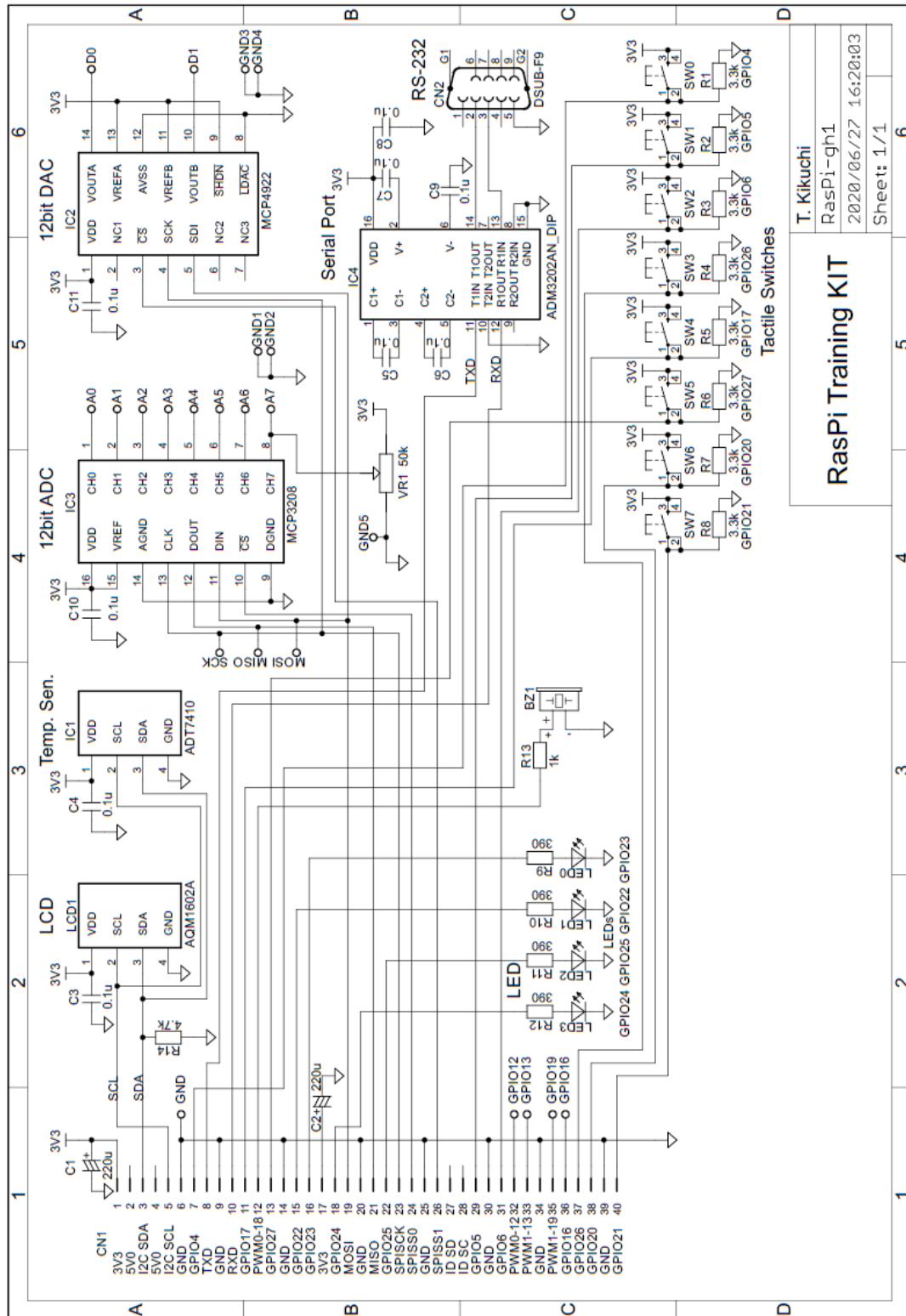
電子部品と GPIO の対応表

電子部品		GPIO	端子	方向	備 考
LED	LED0	GPIO 23	16	出力	Chapter4 出力=HIGH→点灯 出力=LOW →消灯
	LED1	GPIO 22	15		
	LED2	GPIO 25	22		
	LED3	GPIO 24	18		
タクトイル スイッチ	SW0	GPIO 4	7	入力	Chapter5 押す→入力=HIGH 離す→入力=LOW
	SW1	GPIO 5	29		
	SW2	GPIO 6	31		
	SW3	GPIO 26	37		
	SW4	GPIO 17	11		
	SW5	GPIO 27	13		
	SW6	GPIO 20	38		
	SW7	GPIO 21	40		
圧電サウナダ		GPIO 18 /PWM	12	出力	Chapter6 章末問題 Chapter6 から Chapter9
LCD モジュール AQM1602	GPIO 3 /SCL		5	入出力	Chapter7 I ² C バス アドレス 0x3e 表示 16 文字×2 行
	GPIO 2 /SDA		3		
温度センサ ADT7410	GPIO 3 /SCL		5	入出力	Chapter7 I ² C バス アドレス 0x48 測定範囲 -40℃～+105℃
	GPIO 2 /SDA		3		
D/A コンバータ MCP4922	GPIO 11 /SCK		23	出力	Chapter8 SPI バス 出力電圧範囲 0V～3.3V
	GPIO 10 /MOSI		19	出力	
	GPIO 7 /SS1		26	出力	
A/D コンバータ MCP3208	GPIO 11 /SCK		23	出力	Chapter8 SPI バス 入力電圧範囲 0V～3.3V
	GPIO 9 /MISO		21	入力	
	GPIO 10 /MOSI		19	出力	
	GPIO 8 /SS0		24	出力	
シリアルポート ADM3202ANZ	GPIO 14 /TXD		8	出力	Chapter14 通信速度 115,200bps
	GPIO 15 /RXD		10	入力	

全体の回路図

Chapter4 から Chapter9 までの全体の回路図を図 1-104 に示します。参考までに、シリアルポートの RS-232 通信回路を含めています。

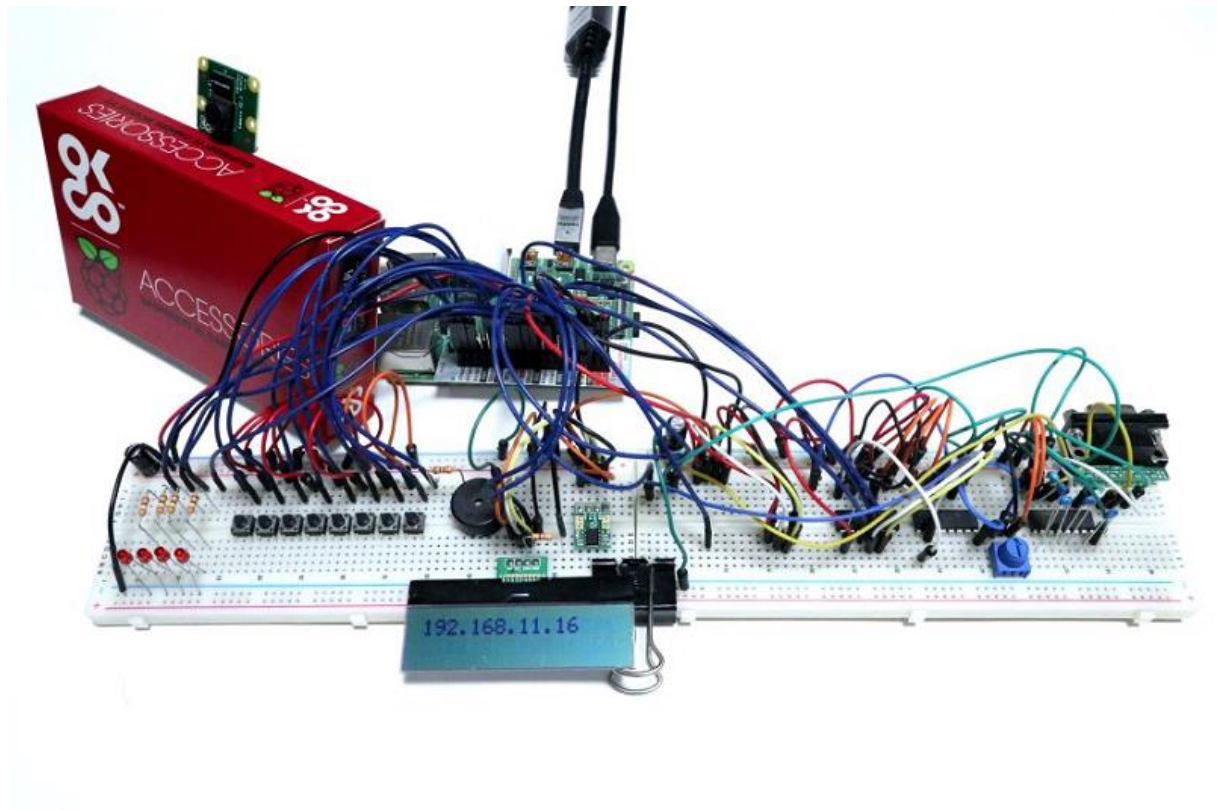
図 1-104: 回路図



T. Kikuchi	
RasPi-gh1	
2020/06/27 16:20:03	
Sheet: 1/1	6

RasPi Training KIT

図 1-105: ブレッドボードによる試作回路



Chapter 4 章末問題

「徹底入門」の図 4-21 (P. 94) の配線図を使用します(図 4-101)。各 LED と GPIO の対応を表 4-101 に示します。

図 4-101: 章末問題の配線図

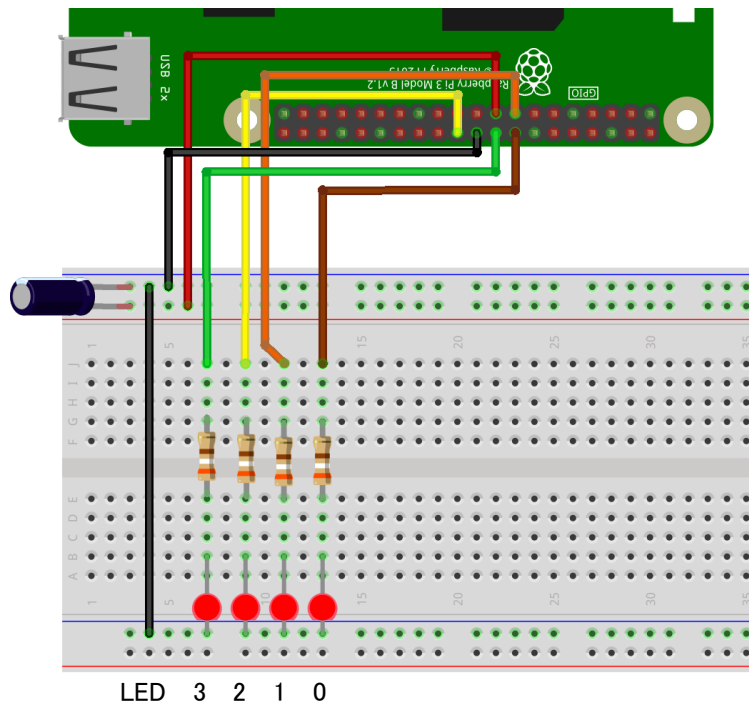


表 4-101: LED と GPIO の対応表

LED	信号名
LED0	GPIO23
LED1	GPIO22
LED2	GPIO25
LED3	GPIO24

【問題 4-1】 LED を2つの点灯パターンで交互に点灯させるプログラム

表 4-102 に示すように、LED0～LED3 の 2 つの点灯パターンを 0.5 秒間隔で交互に点灯させ、10 回繰り返します。繰り返しが終了したら、LED を消灯します。ファイル名を「List4_Ex01.c」とします。

表 4-102: 点灯パターン

パターン	LED3	LED2	LED1	LED0
1	○	●	○	●
2	●	○	●	○

10 回、繰り返し終了

3	○	○	○	○
---	---	---	---	---

【問題 4-2】 2 進数でカウントアップのプログラム

表 4-103 に示すように、2 進数でカウントアップする点灯パターン 0000、0001、0010～1110、1111 を 0.5 秒間隔で繰り返し点灯するプログラムを作成します。ファイル名を「List4_Ex02.c」とします。

表 4-103: 2 進数でカウントアップする点灯パターン

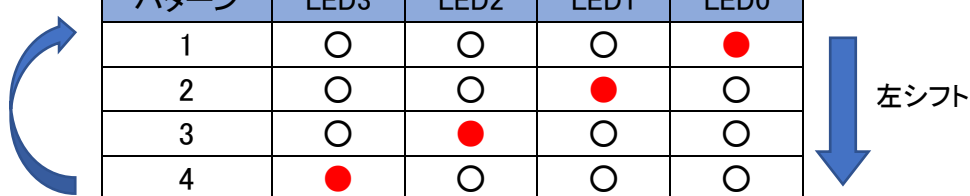
パターン	LED3	LED2	LED1	LED0
0	○	○	○	○
1	○	○	○	●
2	○	○	●	○
3	○	○	●	●
4	○	●	○	○
5	○	●	○	●
6	○	●	●	○
7	○	●	●	●
中 略				
14	●	●	●	○
15	●	●	●	●

カウントアップ

【問題 4-3】 左シフトを繰り返す LED 点灯のプログラム

表 4-104 に示すように、LED の点灯パターン 1～4 が 0.5 秒間隔で繰り返し点灯するプログラムを作成します。ファイル名を「List4_Ex03.c」とします。

表 4-104: 左シフトの点灯パターン



パターン	LED3	LED2	LED1	LED0
1	○	○	○	●
2	○	○	●	○
3	○	●	○	○
4	●	○	○	○

【問題 4-4】 左シフトと右シフトを繰り返す LED 点灯のプログラム

表 4-105 に示すように、LED の点灯パターン 1 ～ 6 が 0.5 秒間隔で繰り返し点灯するプログラムを作成します。ファイル名を「List4_Ex04.c」とします。

表 4-105: 左シフトと右シフトの点灯パターン



パターン	LED3	LED2	LED1	LED0
1	○	○	○	●
2	○	○	●	○
3	○	●	○	○
4	●	○	○	○
5	○	●	○	○
6	○	○	●	○

【問題 4-5】 キーボードから入力された数値を 2 進数で LED に表示するプログラム

ターミナルに「0から15までの値を入力してください>>>」と表示させます。キーボードから0～15の数値を入力して「Enter」が押されたら、入力された数値が2進数でLEDに表示させます。また、0～15以外が入力されたら「入力の値が範囲外です」と表示して、すべてのLEDを消灯します。ファイル名を「List4_Ex05.c」とします。

● 実行例

0から15までの値を入力してください>>>5

LED の表示

○●○●

0から15までの値を入力してください>>>20

○○○○○

入力の値が範囲外です

Chapter 5 章末問題

「徹底入門」の図 5-19 (P. 116) の配線図に 6 個のタクトイルスイッチ回路を追加します(図 5-101)。各スイッチと GPIO の対応を表 5-101 に示します。Raspberry Pi 4B では、WiringPi のバージョン 2.52 において pullUpDnControl 関数が無効です。そのため、抵抗 $3.3\text{k}\Omega$ でプルダウンします。Pi 3/3B+では pullUpDnControl 関数が有効なので抵抗は不要です。

図 5-101: 章末問題の配線図

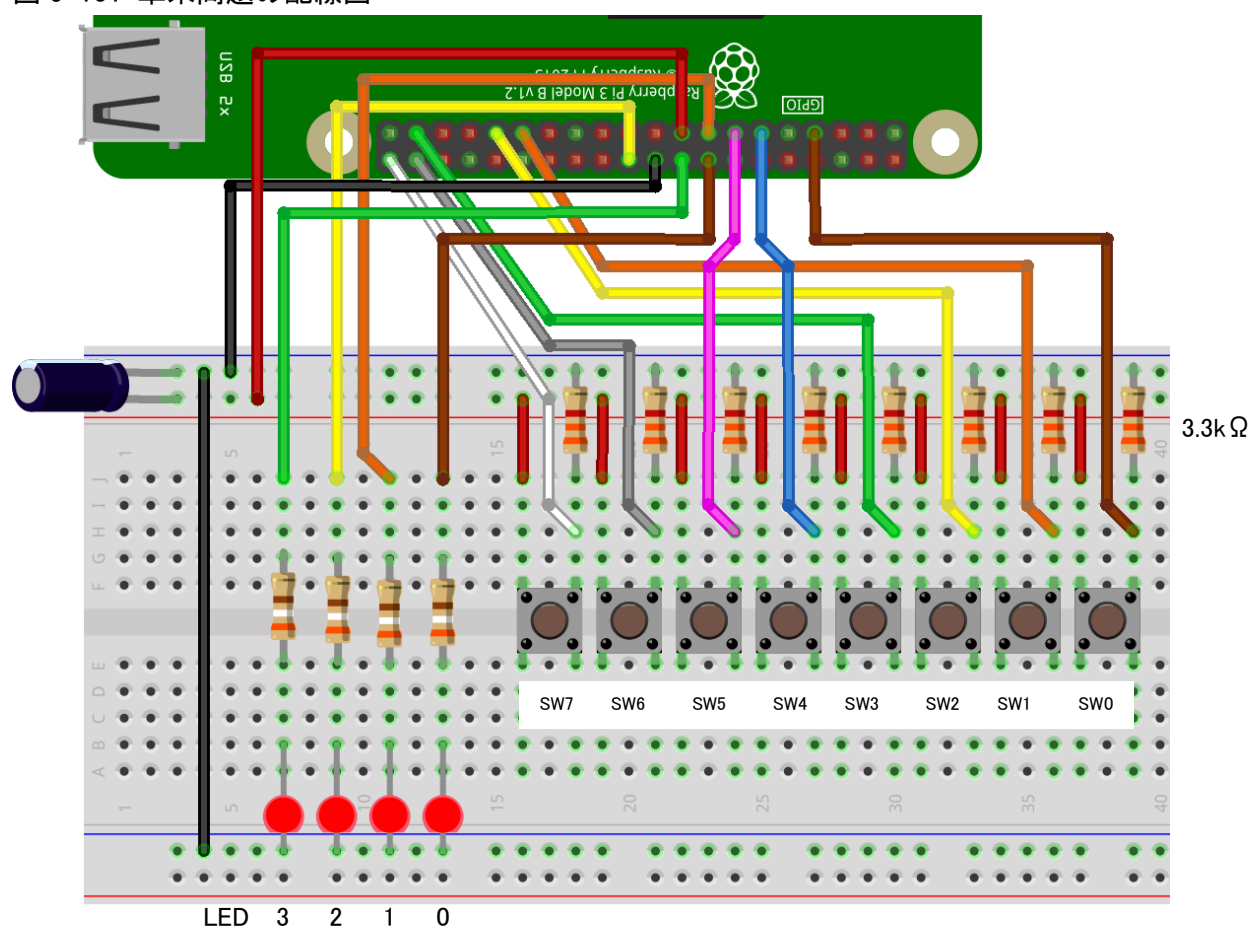


表 5-101: タクトイルスイッチと GPIO の対応表

タクトイルスイッチ	信号名
SW0	GPIO4
SW1	GPIO5
SW2	GPIO6
SW3	GPIO26
SW4	GPIO17
SW5	GPIO27
SW6	GPIO20
SW7	GPIO21

CPU 使用率を抑制する方法

「徹底入門」のリスト 5-1:List5-1_Sw01.c (P. 101) は、SW0 を押している間、LED0 を点灯させるプログラムです。短い行数を while(1) 文で高速に無限ループするために、CPU 使用率が高まります。CPU の使用率は消費電力や発熱量に比例するため、抑制が必要です。そこで 1ms の時間待ちを無限ループに挿入して、ループ回数を減らして CPU の使用率を抑制します。1ms 程度の時間待ちはスイッチ操作のレスポンスへの影響は少ないと思われます。

「徹底入門」では WiringPi の delay 関数を使用してきましたが、ここでは Linux OS に標準で装備されている usleep 関数を使用する例を紹介します。

usleep 関数で CPU の使用率を抑制したソースコード「List5-1_Sw01A.c」を示します。

- ① usleep 関数を使用する場合は、ヘッダファイル unistd.h をインクルードします。
- ② usleep 関数は μs 単位で値を設定するので、1ms の場合は usleep(1000) とします。

リスト:List5-1_Sw01A.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>          //EXIT_SUCCESS
#include <unistd.h>          //usleep ①
#include <wiringPi.h>        //digitalRead,digitalWrite,etc

#define SW0      4          //GPIO4 を SW0 と定義
/* LED の GPIO を配列で定義 */
const int ledGpio[4] = {23,22,25,24}; //グローバル定数

int main (void){
    int i;
    wiringPiSetupGpio();    //BCM の GPIO 番号を使用
    for(i = 0; i < 4; i++){ //LED0 から LED3 を出力に設定
        pinMode(ledGpio[i], OUTPUT);
    }
    pinMode(SW0, INPUT);    //SW0 を入力に設定

    while(1){
        if(digitalRead(SW0) == HIGH){    //SW0 の状態を取得
            digitalWrite(ledGpio[0], HIGH); //SW0 が HIGH なら LED0 を点灯
        }
        else {
            digitalWrite(ledGpio[0], LOW); //SW0 が LOW なら LED0 を消灯
        }
        usleep(1000);    //CPU 使用率の抑制のため ②
    }
    return EXIT_SUCCESS;
}
```


コマンドで CPU 使用率と温度を確認する方法

CPU の使用率はターミナルから、ps コマンドで確認することができます。「%CPU」の列の数値が使用率(%)です。

図 5-102: ps コマンドの実行

```
pi@raspberrypi:~$ ps au
USER      PID %CPU %MEM    VSZ   RSS TTY      STAT START   TIME COMMAND
root        526  0.0  0.0   5620  2448 tty1      Ss   08:49    0:00 /bin/login -f
root        527  0.2  1.6 143496 64076 tty7      Ssl+ 08:49    0:35 /usr/lib/xorg/X
pi          695  0.0  0.0   5044  3588 tty1      S+   08:49    0:00 -bash
pi         2663  0.0  0.0   5068  3680 pts/0    Ss   13:30    0:00 bash
pi         2940  0.0  0.1  13040  4812 pts/0    SL+  13:31    0:00 stress-ng -c 1
pi         2941 99.3  0.1  13300  4232 pts/0    R+   13:31    0:52 stress-ng -c 1
pi         3052  2.0  0.0   5068  3688 pts/1    Ss   13:32    0:00 bash
pi         3061  0.0  0.0   6340  2588 pts/1    R+   13:32    0:00 ps au
```

また、vcgencmd コマンドで CPU の温度 (°C) を確認できます。

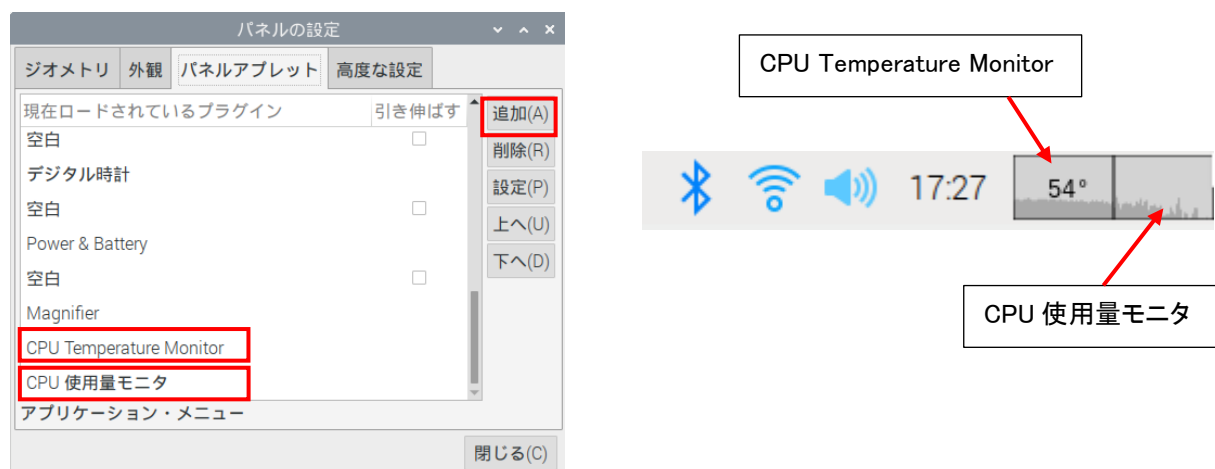
図 5-103: vcgencmd コマンドの実行

```
pi@raspberrypi:~$ vcgencmd measure_temp
temp=57.9'C
```

パネルで CPU 使用率と温度を確認する方法

デスクトップ画面のタスクバーを右クリックして「パネルのアイテムの追加・削除」をクリックして、「パネルの設定」を表示させます。「パネルアプレット」のタブから、「CPU Temperature Monitor」と「CPU 使用量モニタ」をタスクバーに追加します。温度と使用量がグラフで表示されます。

図 5-104: パネルの設定と CPU の温度と使用量のアプレット



【問題 5-1】 タクタイルスイッチで LED を点灯させるプログラム(その1)

SW0～SW3 のタクタイルスイッチを押している間、表 5-102 に対応する LED が点灯するプログラムを作成します。タクタイルスイッチを離すと LED は消灯します。ファイル名を「List5_Ex01.c」とします。

表 5-102:タクタイルスイッチと LED の対応表

タクタイルスイッチ番号	LED 番号
SW0	LED0
SW1	LED1
SW2	LED2
SW3	LED3

【問題 5-2】 タクタイルスイッチで LED を点灯させるプログラム(その 2)

SW0～SW7 のタクタイルスイッチを押している間、表 5-103 に対応する LED が点灯するプログラムを作成します。タクタイルスイッチを離すと LED は消灯します。ファイル名を「List5_Ex02.c」とします。

表 5-103:タクタイルスイッチと LED の対応表

タクタイルスイッチ番号		LED 番号
SW0	SW4	LED0
SW1	SW5	LED1
SW2	SW6	LED2
SW3	SW7	LED3

【問題 5-3】 タクタイルスイッチで LED を点滅させるプログラム(その 1)

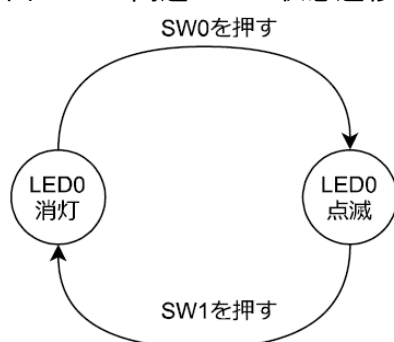
図 5-105 に示すように、SW0 を押すと LED0 が 1 秒間隔で点滅し、SW1 を押すと LED0 の点滅が一時停止し、SW0 を押すと再スタートするプログラムを、割込み処理を使わないで作成します。ファイル名を「List5_Ex03.c」とします。

なお、解答例のソースコードでは、LED0 の 1 点滅毎に SW1 の状態をチェックしているため、SW1 を約 2 秒間長押ししないと一時停止しません。

● ヒント

- SW1 が押されたら LED0 の点滅のループを break 文で抜けるのも一案です。

図 5-105: 問題 5-3 の状態遷移図



【問題 5-4】 タクタイルスイッチで LED を点滅させるプログラム(その 2)

問題 5-3 のプログラムでは、SW1 を長押ししないと一時停止しない欠点がありました。割込み処理を使用して、SW1 を長押ししなくても一時停止するプログラムに改良してください。ファイル名を「List5_Ex04.c」とします。

【問題 5-5】複数の割込み処理をするプログラム

表 5-104 に示すように、SW0～SW7 のタクトイルスイッチと割込み処理を利用して、LED0～LED2 の点灯パターンを出力します。表 5-104 の入力の「1」はスイッチを押した状態を表し、出力の「1」は LED の点灯を表しています。スイッチを離しても、LED は点灯パターンを保持します。なお、表 5-104 は「8 入力 3 出力のエンコーダ」の真理値表と同じです。ファイル名を「List5_Ex05.c」とします。

表 5-104: 8 個のタクトイルスイッチと 3 個の LED の対応表

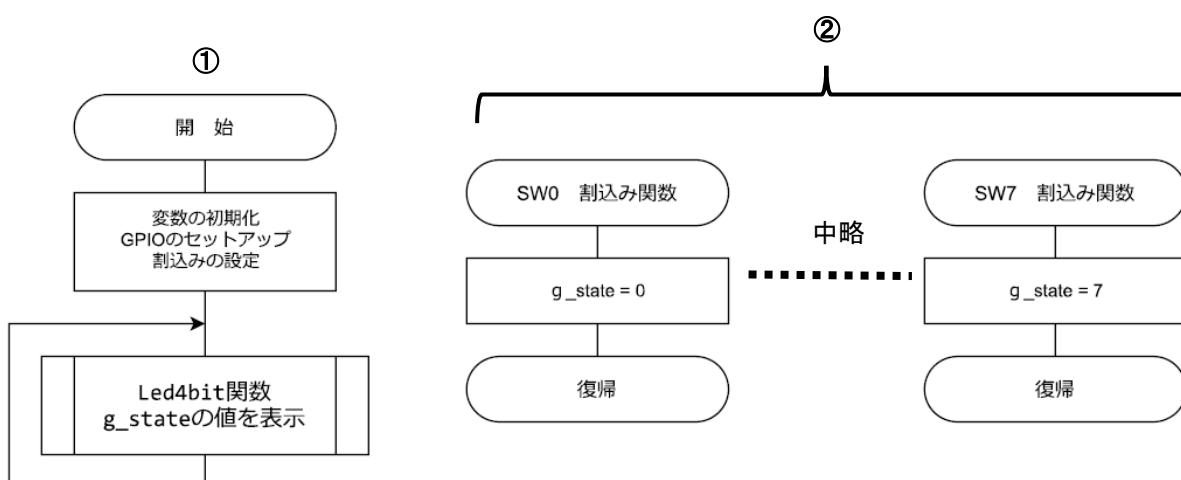
入力								出力		
SW7	SW6	SW5	SW4	SW3	SW2	SW1	SW0	LED2	LED1	LED0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

● フローチャート

フローチャートを図 5-106 に示します。main 関数、SW0 割込み関数から SW7 割込み関数のフローチャートは独立していますが、グローバル変数 `g_state` を共有しています。

- ① main 関数では、`g_state` の値を LED に繰り返し表示します。`g_state` の値を変更するのは SW0 から SW7 の割込み関数の処理になります。
- ② 各 SW が押されたら、対応する割込み関数は立ち上がりエッジで動作します。各割込み関数では、表 5-104 に示した出力の値を `g_state` に代入します。

図 5-106: 複数の割込み処理のフローチャート



【問題 5-6】 3入力の多数決プログラム

SW0、SW1、SW3 の任意の 2 つ以上のスイッチが押されて HIGH になったとき、多数決の出力として LED0 を点灯させるプログラムを作成します。ファイル名を「List5_Ex06.c」とします。

【参考 5-1】 割込み処理でオルタネート動作させるプログラム

「徹底入門」のリスト 5-4:List5-4_Alt02.c でバウンス対策したプログラムでは、main 関数がスイッチ信号の電圧を（能動的に）繰り返し読むことによって、バウンス現象を回避することができました。一方、割込み処理は、（受動的な）割込みの発生という不連続な処理のため同じ方法が使えません。では、割込み処理でオルタネート動作させるには、どうしたらよいのでしょうか？

- ・ 「時刻」を利用します。

割込みが発生した時刻を記録し、二つの割込みの時刻から時間間隔を求めます。求めた時間が、バウンス現象の数十ミリ秒より長ければスイッチを押している、離している操作と判断して処理し、短ければバウンス現象として無視すればよいのです。

- ・ 割込みの間隔 > 数十ミリ秒 のとき、「スイッチの操作(必要な信号)」
- ・ 割込みの間隔 < 数十ミリ秒 のとき、「バウンスが発生(不要な信号)」

時刻は wiringPi の millis 関数を利用して取得することができます。時刻と言っても、時・分・秒の単位ではありません。millis 関数は、wiringPiSetup 関数を実行を開始した時から現在までの時間をミリ秒単位でのカウント値で返します。約 49 日後にオーバーフローしてゼロに戻り、カウントを再開します。

【書式】 `unsigned int millis (void) ;`

また、割込み処理を利用すると、main 関数がスイッチの電圧の状態を繰り返し読む必要がないので、他の処理に専念できるメリットがあります。図 5-107 を利用して、外部割込み wiringPiISR 関数と millis 関数を利用したバウンス対策の考え方を説明します。ここでは次の 3 つの点を前提とします。

前提 1. スwitchのバウンスの振動時間は数十ミリ秒以内に収束する。

前提 2. スwitchを押したり離したりする時間の間隔は、バウンスの振動時間よりも長い。

前提 3. 外部割込み wiringPiISR 関数は全ての有効なエッジを検出する。スイッチを押して離した信号は、「立ち上がり」で始まり「立ち下がり」で終わる。

本対策では、スイッチを押した時刻だけでなく、スイッチを離した時刻も利用するため、スイッチ信号の「立ち上がり」と「立ち下がり」の両方のエッジを使用します。図 5-104 のスイッチの各パルス幅は、バウンスの振動時間よりも長いときはスイッチが押されたと判断して「長」として、短いときはバウンスの振動として「短」で示しています。

操作 1 ではスイッチを押したときの立ち上がりエッジで、LED の出力信号を論理否定（点

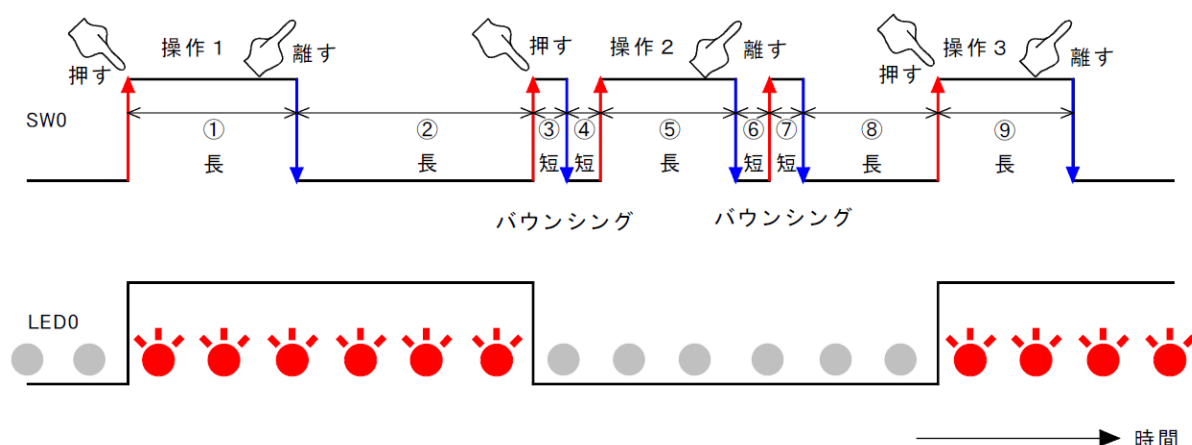
灯) させます。スイッチを離したときの立ち下がりエッジの時刻より、スイッチを押していた時間間隔 (①長) が求められます。

次に、操作2では、信号の前後にバウンスが発生しています。スイッチを押した立ち上がりエッジの時刻からスイッチを離していた間隔 (②長) が求められます。2 つの長い間隔 (①長と②長) の検出により、LED への出力信号を論理否定 (消灯) させています。なお、間隔③と④は短いためバウンスの振動として無視します。⑤の間隔は長いのでスイッチの操作とします。また、スイッチを離したときに発生したバウンスの間隔⑥と⑦は短いので、無視します。

操作3でスイッチを押したときの立ち上がりエッジの時刻より、スイッチを離していた間隔 (⑧長) が求められます。2 つの長い間隔 (⑤長と⑧長) の検出により、LED の出力信号を論理否定 (点灯) させます。

以上のことから、スイッチを押したときと離したときの長い間隔が2回に1回の割合で LED への出力信号を論理否定します。このことは、出力信号の周波数を入力信号の 1/2 にする 2 分周回路の動作と同じです。

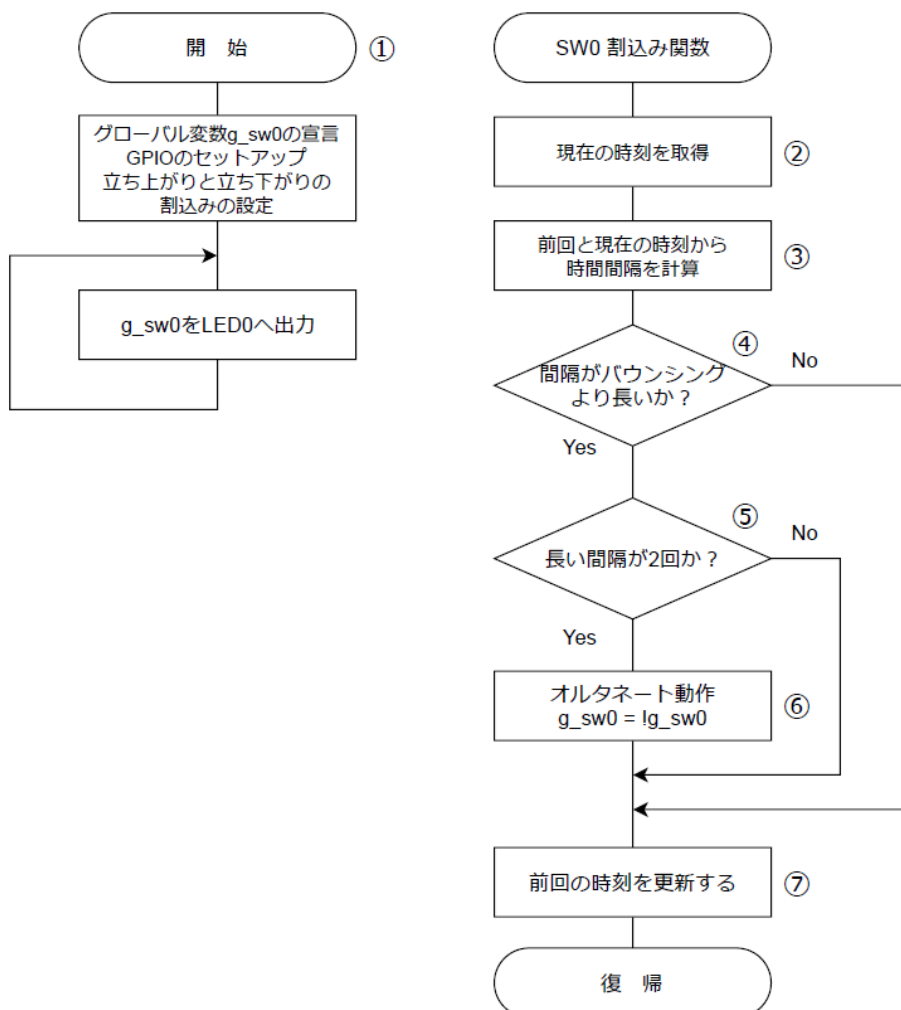
図 5-107: バウンス対策のモデル図



● フローチャート

割込み処理を使用したバウンス対策のフローチャートを図 5-108 に示します。

図 5-108: 割込みを利用したバウンス対策のフローチャート



- ① main 関数と SW0 割込み関数で共通に使用するグローバル変数(g_sw0)を宣言します。g_sw0 は、オルタネート動作を記憶します。main 関数では、GPIO のセットアップと割込みの設定を行います。また、g_sw0 の値を LED0 へ永久ループで出力します。
- ② SW0 の割込みが発生したら、現在の時刻を取得します。
- ③ 前回と現在の時刻から時間間隔を求めます。
- ④ 時間間隔が数十ミリ秒以下の短いときは、バウンスの発生と判断して、流れ線「No」により⑦の前の時刻を更新して割込み処理を終了します。また、時間間隔が数十ミリより長い間隔ときは、スイッチの操作信号として判断して⑤へ行きます。
- ⑤ 長い間隔が 2 回に 1 回の割合で、⑥のオルタネート動作が発生します。長い間隔が 1 回目のときは、流れ線「No」により⑦の前の時刻を更新して割込み処理を終了します。長い間隔が 2 回目のときは、流れ線「Yes」により⑥へ行きます。
- ⑥ g_sw0 を論理否定することで、オルタネート動作となります。
- ⑦ 前回の時刻に、現在の時刻で代入して更新します。

● ソースコード

ソースコードはリスト 5-101 のとおりです。ファイル名を「List5_Ref01.c」とします。

リスト 5-101: List5_Ref01.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>          //EXIT_SUCCESS
#include <unistd.h>          //usleep
#include <wiringPi.h>        //wiringPiSetupGpio,pinMode,etc

#define LED0      23        //GPIO23 を LED0 と定義
#define SW0       4         //GPIO4 を SW0 と定義
#define INTERVAL  50        //バウンス対策時間 (ms) ①

/* グローバル変数 */
static volatile int g_sw0; //SW0 操作の変数 ②

/* プロトタイプ宣言 */
void IntSw0(void);          //SW0 の割り込み関数

int main(void){
    wiringPiSetupGpio();     //BCM の GPIO 番号を使用
    pinMode(LED0, OUTPUT);  //LED0 を出力に設定
    pinMode(SW0, INPUT);    //SW0 を入力に設定
    pullUpDnControl(SW0,PUD_DOWN); //SW0 にプルダウン抵抗をつける
    wiringPiISR(SW0, INT_EDGE_BOTH, IntSw0); //両方のエッジでの割り込み設定 ③

    g_sw0 = 0; ④
    while(1){
        digitalWrite(LED0,g_sw0);
        usleep(1000);
    }
    return EXIT_SUCCESS;
}

void IntSw0(void){
    static unsigned int t0Now; //現在の時刻
    static unsigned int t0Old; //前回の時刻
    unsigned int t0Diff;       //時間間隔
    static int alt0;            ⑥

    t0Now = millis();           //現在の時刻の取得
    t0Diff = t0Now - t0Old;     //前回の時刻より間隔の取得 ⑦
    if(t0Diff > INTERVAL){ ⑧
        if(alt0 == 0){
            g_sw0 = !g_sw0;
        }
        alt0 = !alt0; ⑨
    }
    t0Old = t0Now; ⑩
}
```

- ① バウンスングの振動が収束する時間(ミリ秒)です。「徹底入門」のリスト 5-4: List5-4_Alt02.c では対策時間を 20ms としましたが、割り込み処理を利用する場合は動作確認より 50ms としています。また、スイッチの構造等によって対策時間は異なるので、動作確認などにより適切な値を設定してください。
- ② グローバル変数 `g_sw0` はスイッチのオルタネート動作を記憶します。`g_sw0` は `main` 関数と `IntSw0` 関数で共有して使用するためグローバル変数にします。`static` 記憶クラス指定子は、ローカル変数とグローバル変数を修飾する場合で役割が異なります。ローカル変数を修飾した場合、ローカル変数は値を記憶し、関数が呼び出されるごとに初期化されません。グローバル変数を修飾した場合、グローバル変数の有効範囲を本ファイル内だけに限定させます。本事例ではファイルは一つですが、複数のソースファイルから構成される場合、他のファイルからグローバル変数がアクセスされることを抑止します。
 また、コンパイラが最適化のために無駄と解釈された変数は削除される可能性があります。そのため、削除されたくない変数には `volatile` 修飾子として宣言して、コンパイラに対して最適化の抑止を指示します。特に、割り込み処理で使用する変数がループ文で変化しない場合、無駄と解釈される可能性があります。そのため `volatile` 修飾することにより、割り込み処理など要因で変数の値が変化することを明示します。なお、コンパイラのオプションで最適化を無効にしている場合は必要ないかもしれませんが、ソースコードでも明示することにより意図が第三者に伝わります。
- ③ `SW0` が立ち上がりと立ち下りの両方のエッジで割り込みが発生するように設定します。
- ④ `g_sw0` を 0 で初期化し、`LED0` を消灯させます。
- ⑤ `g_sw0` を永久ループで `LED0` へ出力します。なお、単純なループにより、CPU の使用率を抑制するために `usleep(1000)` を挿入しています。
- ⑥ `t0Old` と `alt0` のローカル変数は `static` 記憶クラス指定子で修飾されているため、割り込み関数が終了しても値を記憶します。変数 `alt0` は、長い間隔が 2 回発生したことを確認するための変数として使用します。
- ⑦ 現在の時刻を `millis` 関数で取得して、変数 `t0Now` に代入します。前回の時刻 `t0Old` から時間間隔 `t0Diff` を計算します。
- ⑧ 時間間隔 `t0Diff` が `INTERVAL` より長い場合(スイッチの操作)はオルタネート動作⑨へ行き、短い場合(バウンスングの発生)は⑩の `t0Old` を更新して、割り込み処理を終了します。
- ⑨ ここでは、長い間隔が 2 回に 1 回の割合で、グローバル変数 `g_sw0` をオルタネート動作させます。`alt0` が論理否定されているのがポイントで、`alt0` は割り込み関数が呼び出されるごとに交互に 0 と 1 の値になります。`if` 文により `alt0` が 0 のときだけ、`g_sw0` を論理否定させるため、2 回に 1 回の割合になるのです。
- ⑩ `t0Old` の値を更新して、`main` 関数へ復帰します。

● 動作確認

List5_Ref01.c をビルドして実行します。バウンスング対策したオルタネート動作を確認します。

List5-4_Alt02.c と比較して、割り込み処理を使用すると `main` 関数がシンプルになり、他の仕事に専念させることが可能です。また、複数のタクタイルスイッチへの対応も容易です。ファイル名を「List5_Ref01A_4Sw.c」とします。なお、スイッチの構造、押し方、実装方法によっては、バウンスング現象が除去しきれない場合があります。マクロ定義した `INTERVAL` の値を少し大きくしてみてください。また、マルチタスク OS 環境では CPU の負荷状態にも影響を受ける場合があります。

【参考 5-2】ビットフィールドで LED と SW の変数を表現するプログラム

ビットフィールドはマイコンの組込みプログラミングではよく使用されます。例えば、SW0 の情報は 1bit ですが、その情報を保存するために int 型を用いるのは、メモリ容量が少ないマイコンではメモリの利用効率から好ましくはありません。そのため、一般にはビットフィールドを使用してメモリを節約します。ラズパイは Arduino uno などのマイコンに比べてメモリが潤沢にあるのですが、参考までにビットフィールドの使用例を紹介しましょう。

● ビットフィールドとは

ビットフィールドは、1 バイト(8 ビット)の変数の定義に使用します。8 ビット未満のビットも定義することができます。ビットフィールドは構造体(struct)のメンバーとして宣言します。

リスト 5-102 に SW0 から SW7 のビットフィールドの使用例を示します。構造体を利用してビットフィールドを B0 から B7 で定義します。LSB は SW0 です。さらに、共有体(union)で、8 ビットのフィールドを 1 バイトとして参照できるようにします。このビットフィールドに各 SW の値を格納するプログラムを別途作成します。

- ビット SW.BIT.B0 SW0 のビット参照。
- バイト SW.BYTE SW0 から SW7 のバイト参照。

リスト 5-102:ビットフィールドの使用例

```
union {  
    unsigned char BYTE;  
    struct{  
        unsigned char B0:1;    //SW0  
        unsigned char B1:1;    //SW1  
        unsigned char B2:1;    //SW2  
        unsigned char B3:1;    //SW3  
        unsigned char B4:1;    //SW4  
        unsigned char B5:1;    //SW5  
        unsigned char B6:1;    //SW6  
        unsigned char B7:1;    //SW7  
    }BIT;  
}SW;
```

● ソースコード

【問題 5-2】の問題をビットフィールドで記述したソースコードをリスト 5-103 に示します。ファイル名を「List5_Ref02.c」とします。

リスト 5-103: List5_Ref02.c

```
#include <stdio.h>           //printf  
#include <stdlib.h>          //EXIT_SUCCESS  
#include <unistd.h>           //usleep  
#include <wiringPi.h>         //wiringPiSetupGpio,pinMode,etc
```

```

/* LED と SW の GPIO を配列で定義 */
const int ledGpio[4] = {23,22,25,24};           //グローバル定数
const int swGpio[8] = {4,5,6,26,17,27,20,21};
/* LED のビットフィールド */
union {
    unsigned char BYTE;
    struct {
        unsigned char B0:1;    //LED0
        unsigned char B1:1;    //LED1
        unsigned char B2:1;    //LED2
        unsigned char B3:1;    //LED3
        unsigned char :4;      //空の 4bit
    }BIT;
}LED;

/* SW のビットフィールド */
union {
    unsigned char BYTE;
    struct{
        unsigned char B0:1;    //SW0
        unsigned char B1:1;    //SW1
        unsigned char B2:1;    //SW2
        unsigned char B3:1;    //SW3
        unsigned char B4:1;    //SW4
        unsigned char B5:1;    //SW5
        unsigned char B6:1;    //SW6
        unsigned char B7:1;    //SW7
    }BIT;
}SW;

/* プロトタイプ宣言 */
void Led4bit(int ledData);
void Sw8bit(void);

int main (void){
    int i;
    wiringPiSetupGpio();           //BCM の GPIO 番号を使用
    for(i=0;i<4;i++){             //LED0-LED3 を出力に設定
        pinMode(ledGpio[i], OUTPUT);}
    for(i=0;i<8;i++){             //SW0-SW7 を入力に設定
        pinMode(swGpio[i], INPUT);}
    for(i=0;i<8;i++){             //SW0-SW7 をプルダウン抵抗をつける
        pullUpDnControl(swGpio[i],PUD_DOWN);}

    while(1){
        Sw8bit();                 //SW 入力
        LED.BIT.B0 = SW.BIT.B0 | SW.BIT.B4;
        LED.BIT.B1 = SW.BIT.B1 | SW.BIT.B5;
        LED.BIT.B2 = SW.BIT.B2 | SW.BIT.B6;
        LED.BIT.B3 = SW.BIT.B3 | SW.BIT.B7;
        Led4bit(LED.BYTE);        //LED 出力
        usleep(1000);             //CPU 使用率の抑制のため
    }
    return EXIT_SUCCESS;
}

```

```

}

void Led4bit(int ledData)
{
    int i;
    for (i = 0; i < 4; i++){
        digitalWrite(ledGpio[i], ledData&1); //LSB の LED0 から順番に出力する
        ledData = ledData >> 1; //LSB だけの値にして 1bit 出力
    } //1bit 右シフト
}

void Sw8bit(void){
    int i,k;
    SW.BYTE=0;
    for(i=7; i>=0; i--){
        k=digitalRead(swGpio[i]);
        SW.BYTE = SW.BYTE << 1; //1bit 左シフト
        SW.BYTE = SW.BYTE + k;
    }
    // printf("%d¥n",SW.BYTE); //デバッグ用
}

```

● 動作確認

List5_Ref02.c をビルドして実行します。List5_Ex02.c と同じ動作になることを確認します。なお、ビットフィールドのメモリ上の割付け順序はコンパイラに依存しますので、本ソースコードを他の処理系に移植する場合は注意してください。

Chapter 6 章末問題

「徹底入門」の図 6-12 (P. 130) の配線図において、Pi 4B 用にプルダウン抵抗をタクトイルスイッチに実装しました (図 6-101)。

図 6-101: 章末問題の配線図

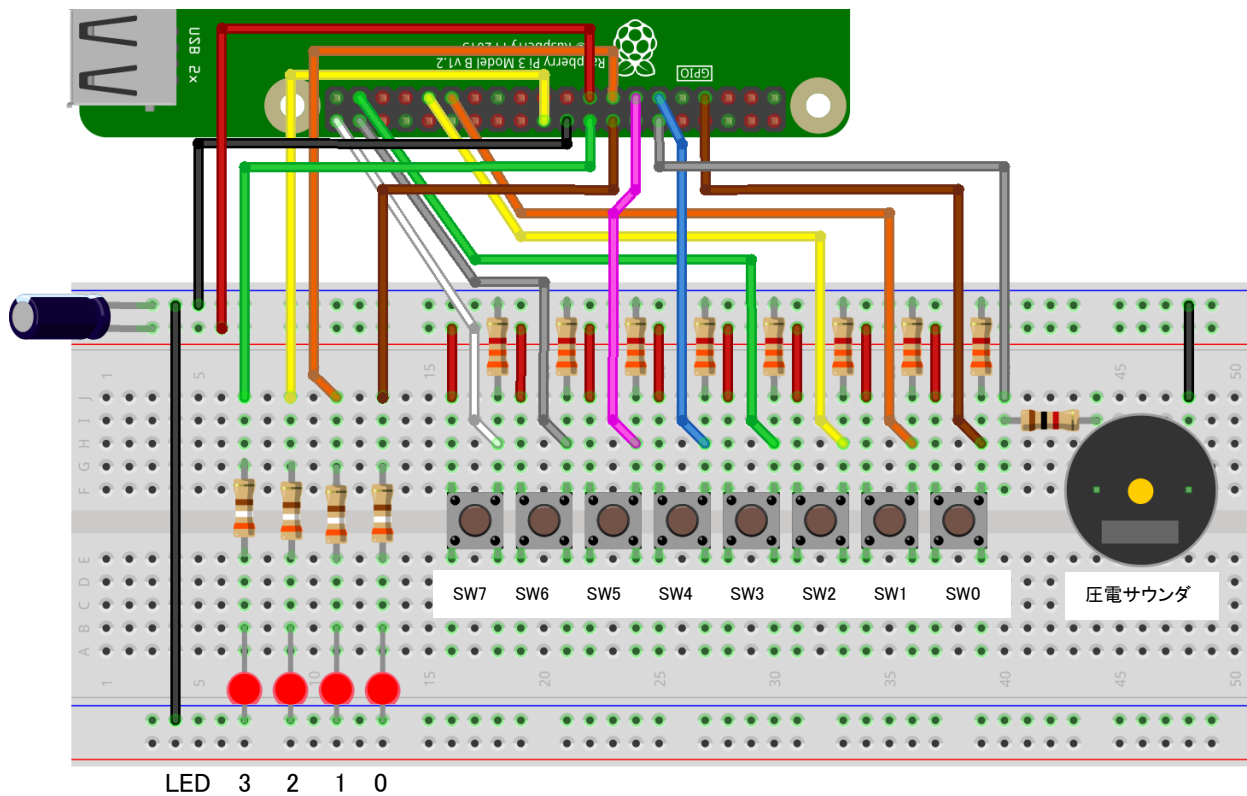


表 6-101: 圧電サウンダと GPIO の対応表

圧電サウンダ	信号名
BZ1	GPIO18

【問題 6-1】 ソフトウェア方式 PWM でデューティ比を変えるプログラム

ソフトウェア方式の PWM を利用して、LED0 (GPIO23) を表 6-102 に示すタクトイルスイッチに対応したデューティ比で点灯させるプログラムを作成します。タクトイルスイッチが押されていないときのデューティ比は 0%とします。ファイル名を「List6_Ex01.c」とします。

表 6-102: タクトイルスイッチを押したときのデューティ比

スイッチ番号	SW7	SW6	SW5	SW4	SW3	SW2	SW1	SW0
デューティ比	100%	87.5%	75%	62.5%	50%	37.5%	25%	12.5%

- 条件
 - PWM の周波数 f_{pwm} 100Hz

【問題 6-2】 ソフトウェア方式 PWM で約 440Hz の矩形波を発生させるプログラム

タクトイルスイッチ SW0 を押している時だけ、ソフトウェア方式の PWM で約 440Hz の矩形波を出力して圧電サウンダを鳴らすプログラムを作成します。ファイル名を「List6_Ex02.c」とします。

- 条件
 - デューティ比 約 50%
- ヒント
 - 440Hz の周期[ms]を求め、ソフトウェア方式の PWM 信号の最小変化幅(100 μ s)で割った値が `softPwmCreate` 関数の引数 `pwmRange` になります。

【問題 6-3】 ハードウェア方式 PWM で約 440Hz の矩形波を発生させるプログラム

タクトイルスイッチ SW0 を押している時だけ、ハードウェア方式の PWM で約 440Hz の矩形波を出力して圧電サウンダを鳴らすプログラムを作成します。ファイル名を「List6_Ex03.c」とします。

- 条件
 - ・ デューティ比 約 50%
 - ・ PWM 信号の階調(range) 100
- ヒント
 - ・ 内部クロックの分周を設定する pwmSetClock 関数への引数 divisor の値を 440Hz 用に設定します(「徹底入門」p.126)。
 - ・ Pi 4B の場合、divisor は内部クロック(54MHz)÷(440Hz × 100(range))より、求められます。



＜ソフトウェア方式とハードウェア方式の音色の違いについて＞

題意の 440Hz の周期は約 2.273ms です。両方式の PWM 信号の最小変化幅の違いにより、出力信号の周波数の精度が異なります。

- ソフトウェア方式の最小変化幅は 100us のため、周期 T は 2.3ms または 2.2ms です。
 $2.3\text{ms} = 434.8\text{ Hz}$, $2.2\text{ms} = 454.5\text{ Hz}$ となり、440Hz からズレています。
- ハードウェア方式の最小変化幅が 10us の場合、周期 T は 2.27ms です。
 $2.27\text{ms} = 440.5\text{ Hz}$ になります。

【問題 6-4】 電子ピアノのプログラム

ハードウェア方式の PWM で GPIO18 から表 6-102 に示す音名の矩形波を出力して、電子ピアノとなるプログラムを作成します。PWM 信号の 1 周期の階調(range)を 100 としたとき、表 6-103 の分周値(divisor)を `pwmSetClock` 関数の引数とすると、音名の周波数が出力されます。なお、分周値は Pi 3/3B+ と Pi 4B で異なります。各タクトイルスイッチと音名の対応は図 6-103 のとおりです。ファイル名を「List6_Ex04.c」とします。

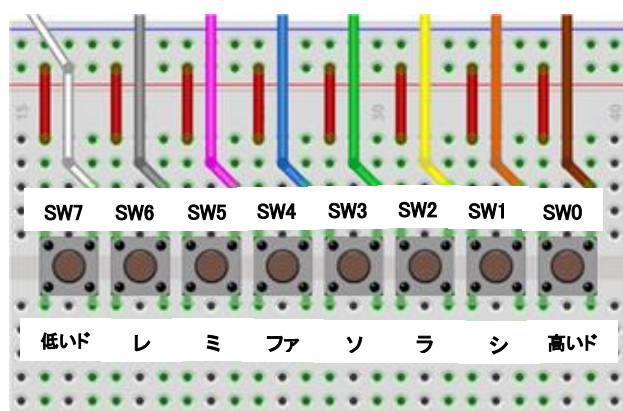
● 条件と仕様

- ・ デューティ比 約 50%
- ・ PWM 信号の階調(range) 100
- ・ PWM 信号の波形のモード PWM_MODE_MS
- ・ スイッチを 1 本指の操作による単音とし、和音に対応しない。

表 6-103: 音名と分周値の関係

スイッチ	音名	周波数 (Hz)	周期 (ms)	分周値(divisor)	
				Pi 3/3B+	Pi 4
SW7	(低い)ド	261.63	3.82	734	2064
SW6	レ	293.66	3.41	654	1839
SW5	ミ	329.63	3.03	582	1638
SW4	ファ	349.23	2.86	550	1546
SW3	ソ	392.0	2.55	490	1378
SW2	ラ	440.0	2.28	436	1227
SW1	シ	493.83	2.02	389	1093
SW0	(高い)ド	523.25	1.91	367	1032

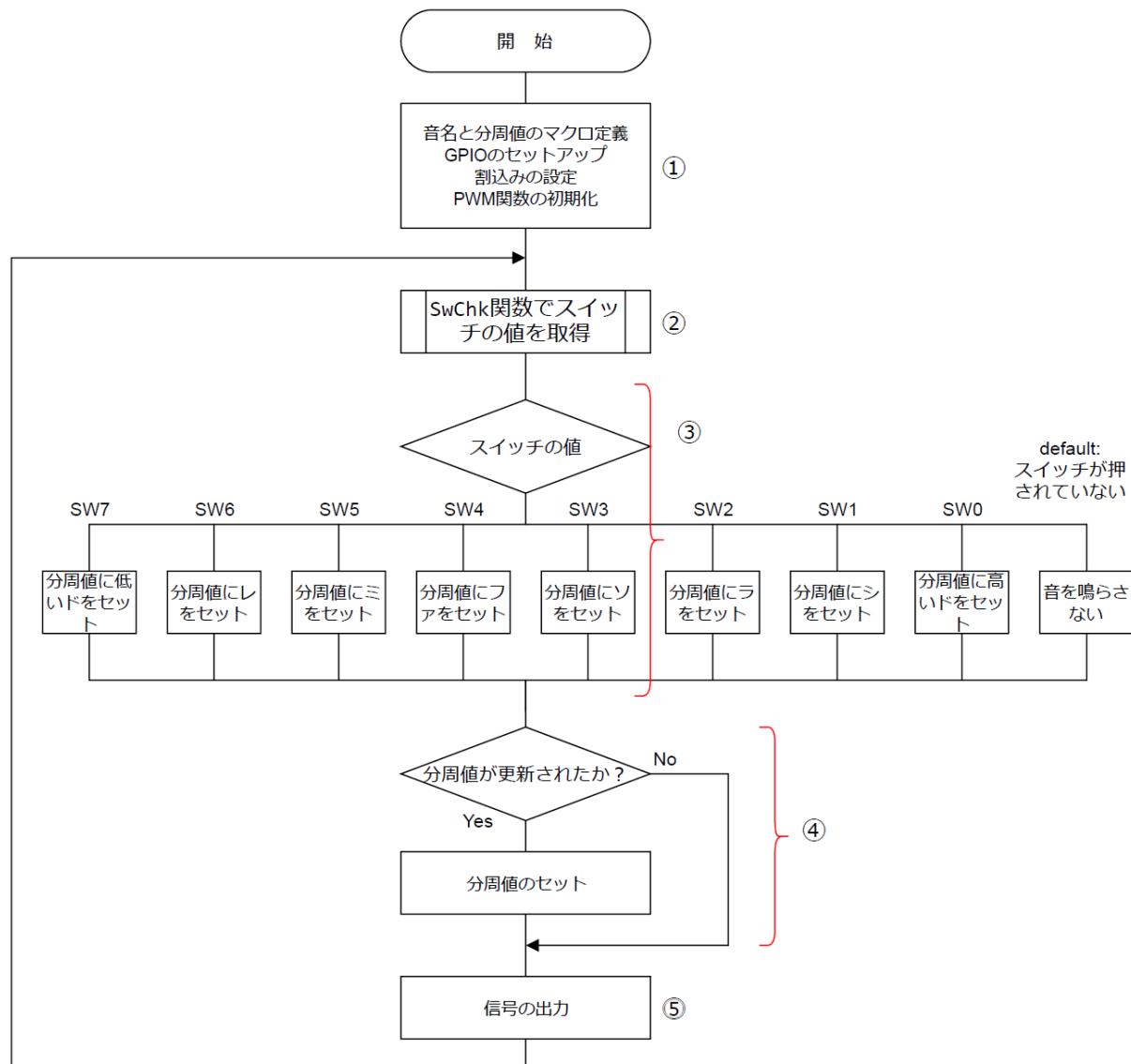
図 6-102: タイルスイッチと音名の対応



● フローチャート

参考までに、main 関数とタクタイルスイッチの状態を検査する SwChk 関数のフローチャートを図 6-103 と図 6-104 に示します。

図 6-103 : 電子ピアノの main 関数のフローチャート



- ① 表 6-103 の音名と分周値をマクロ定義します。分周値は Pi3/3B+と Pi4B で異なります。
- ② SwChk 関数で、押されているスイッチの情報(番号)を取得します。
- ③ スイッチの番号に応じて、各音名の分周値をセットします。スイッチが押されていないときは、音を鳴らさないようにします。
- ④ pwmSetClock 関数で分周値をセットしますが、スイッチを押し続けている場合、重ね書きにより音が濁ります。そのため、分周値が更新されたときだけ、分周値をセットします。
- ⑤ 音名に対応した周波数の信号を出力して、②へ戻ります。

図 6-104 : 電子ピアノの SwChk 関数のフローチャート

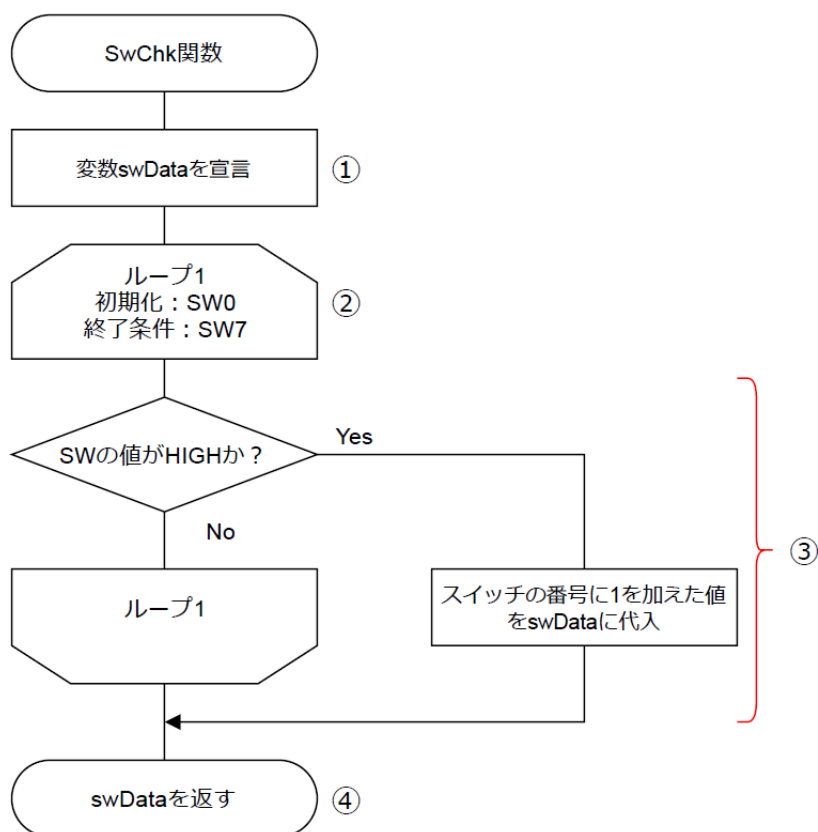


表 6-104: SwChk 関数の戻り値

戻り値	0	1	2	3	4	5	6	7	8
スイッチ の状態	押されて いない	SW0	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7

- ① 戻り値の変数 swData を宣言します。
- ② SW0 からスイッチの状態を順番に調べます。
- ③ スイッチが押されると GPIO は HIGH になります。押されたときはスイッチ番号に1を加えた値（表 6-104）を swData に代入し、④へ行きます。また、押されていないときは②のループに戻ります。
- ④ 表 6-104 の戻り値を返します。

【問題 6-5】電子オルゴールのプログラム(その1)

SW0（再生ボタン）を押したら、ハードウェア方式の PWM で GPIO18 から電子オルゴールが動作するプログラムを作成します。SW1（停止ボタン）を押したら、電子オルゴールを停止します。また、SW0 を押したら最初から再生します。ファイル名を「List6_Ex05.c」とします。

- 条件
 - ・ デューティ比 約 50%
 - ・ PWM 信号の階調(range) 100
 - ・ PWM 信号の波形のモード PWM_MODE_MS

- ヒント

参考例として、音名または休符を発生する `g` 関数を紹介します。`g` 関数への引数(オクターブ、階名、時間)を配列にして楽譜を作成すれば、1 音符毎に `g` 関数で音名を鳴らして曲を再生します。

```
void g(int oct, int solfa, int length);
```

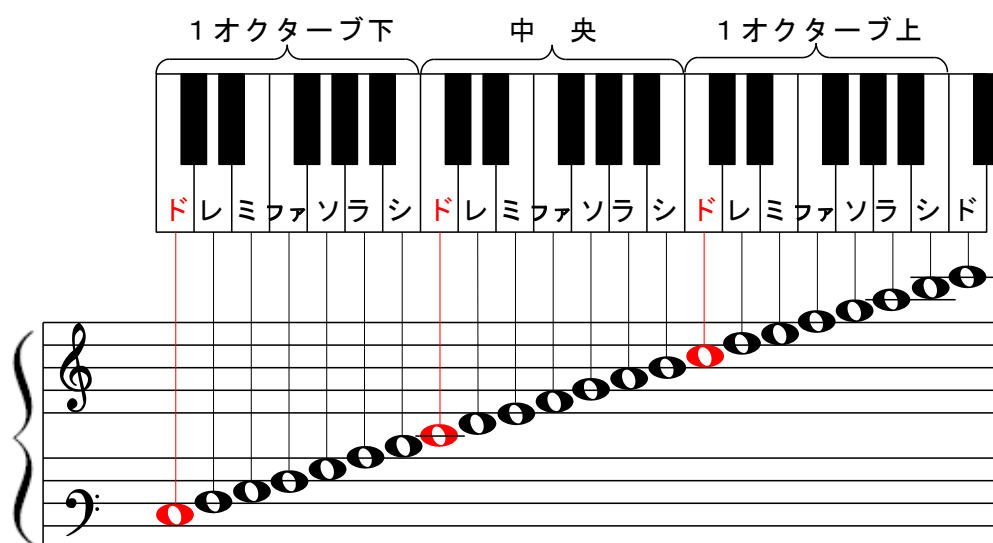
`g` 関数には `oct`、`solfa`、`length` の 3 つの引数があります。これらの引数の役割について説明します。

- ・ 引数 `oct` はオクターブのことです。3 オクターブから1つを選択します(表 6-105)。引数 `oct` と引数 `solfa`(階名)により、音名(鍵盤)が決まります(図 6-105)。ここでの階名とは七音(ドレミファソラシ)に呼び分けた名称のことで、音名とは個々の音の絶対的な高さを表す名称です。

表 6-105: オクターブと引数 `oct`

オクターブ	1 オクターブ下	中央	1 オクターブ上
マクロ名	OL	OC	OH
引数 <code>oct</code>	3	4	5

図 6-105: オクターブと音名(鍵盤)の位置



- 引数 solfa は階名のことです。休符は階名ではありませんが、0 に割り当てています(表 6-106)。

表 6-106: 階名と引数 solfa

階名	休符	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ
マクロ名	REST	DO	DOS	RE	RES	MI	FA	FAS	SO	SOS	RA	RAS	SI
引数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

- 引数 length は音の時間の長さ(ミリ秒)です。4 分音符(quarter note)の時間の長さは、1 分を楽譜のテンポ(BPM:Beats Per Minute)で割った値になります。例えば、テンポが 120 のとき、1 分 ÷ 120 より 4 分音符の時間の長さは 0.5 秒になります。

● 音名の周波数の計算方法

引数オクターブと引数階名から、式 6-101 により音名の周波数を計算し、ラズパイの内部クロックの分周値 divisor を求めます。

式 6-101 の f は周波数、 d は指数で、各音名の周波数を表 6-107 に示します。式 6-101 の d に 0 を代入すると、周波数 f は、440Hz となりラの音になります。440Hz(ラ)は調律の際の音高(ピッチ)の標準になっています。1 オクターブは 12 音階になっているので、 $(^{12}\sqrt{2})^d$ を 12 回乗算すると 1 オクターブ上のラになり周波数 f は 880Hz です。

$$f = 440 \times (^{12}\sqrt{2})^d \quad [\text{式 6-101}]$$

表 6-107: 中央のオクターブの音名の周波数

音名	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ
d	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
f Hz	261.6	277.2	293.7	311.1	329.6	349.2	370.0	392.0	415.3	440.0	466.2	493.9

g 関数のソースコードはリスト 6-101 のとおりです。

```
リスト 6-101: void g(int oct, int solfa, int length)
#define PI4B
#ifdef PI4B
    #define CLK 54000000 //Pi4B の内部クロック Hz
#else
    #define CLK 19200000 //Pi3B/3B+の内部クロック Hz
#endif
#define RANGE 100 //PWM range

#define OL 3 //1 オクターブ下
#define OC 4 //中央のオクターブ
#define OH 5 //1 オクターブ上

#define REST 0 //休符
#define DO 1 //ド
#define DOS 2 //ド#
#define RE 3 //レ
#define RES 4 //レ#
#define MI 5 //ミ
#define FA 6 //ファ
#define FAS 7 //ファ#
#define SO 8 //ソ
#define SOS 9 //ソ#
#define RA 10 //ラ
#define RAS 11 //ラ#
#define SI 12 //シ

void g(int oct, int solfa, int length){
    int d = 0; //指数 式 6-101
    int f = 0; //周波数
    int divisor; //分周値 pwmSetClock 関数の引数
    int value; //Ton 時間 pwmWrite 関数の引数
    if(solfa !=0){
        d = solfa - 10;
        if (oct == OL){ //1 オクターブ下のとき
            d -= 12;
        }
        if(oct == OH){ //1 オクターブ上のとき
            d+=12;
        }
        f = 440 * pow(2,(double)d/12)+0.5; //べき乗計算の pow 関数
        divisor = CLK / (f*RANGE);
        pwmSetClock(divisor); //内部クロックの分周の設定
        value = RANGE/2; //デューティ比 50%
    }else{
        value = 0;
    }
    pwmWrite(BUZZER, value);
    delay(length);
}
```

①

②

③

④

⑤

⑥

⑦

⑧

⑨

⑩

- ① 内部クロック、オクターブ、階名のマクロ定義です。リスト 6-101 の記述例では、Pi4B の内部クロックが選択されますが、先頭行の「#define PI4B」をコメントアウトすると、Pi3/3B+の内部クロックが選択されます。
- ② 変数 d(指数)と変数 f(周波数)は、音名の周波数の計算(式 6-101)に使用します。
- ③ 変数 divisor と変数 value は PWM 信号の発生に使用します。
- ④ solfa が休符以外のときは、音名の周波数を計算します。
- ⑤ 表 6-104 でマクロ定義した引数 solfa の値から、式 6-101 の d(表 6-105)を求めます。
- ⑥ g 関数の引数 oct が OL のときは1オクターブ下のため d の値から 12(1オクターブの音階)を減算し、oct が OH のときは1オクターブ上のため d の値に 12 を加算します。OL と OH の値は、表 6-103 で定義してあります。
- ⑦ べき乗の pow 関数を使用して、式 6-101 を構成します。小数点第一位を四捨五入のため、「+0.5」を式に入れています。pow 関数を使用する場合、数学のヘッダファイル math.h をインクルードします。さらに、gcc コマンドに数学オプションの「-lm」を追加します。geany のビルドコマンドの設定を次のようにします。

```
gcc -Wall -o "%e" "%f" -lwiringPi -lpthread -g -O0 -lm
```

- ⑧ 音名の周波数から分周値(divisor)を求めて内部クロックを分周し、PWM 信号のデューティ比を 50%に設定します。value は PWM 信号のパルスオンの時間 Ton のことです。
- ⑨ 休符の場合は、value を 0 にして PWM 信号の出力信号を 0V にします。
- ⑩ length の時間(ミリ秒)の長さで、1音または休符を出力します。

● 楽譜の作成と再生方法

例えば、中央のオクターブの「低いド」から1オクターブ上の「高いド」までを鳴らして、休符する楽譜を考えます。楽譜は g 関数の引数の順で配列[オクターブ、階名、時間の長さ]を作成するのが簡単です(リスト 6-102)。楽譜の終わりに休符を入れて PWM 信号の出力を止めます。変数 qN は 4 分音符(quarter note)のことです。

楽譜を再生するには、for 文などで配列の先頭から順番に配列の要素を g 関数の引数に代入して、1音毎に鳴らします。for 文の中で SW1 を検出するようにすれば、再生を停止させることが可能です。なお、参考として「さくらさくら」(図 6-107)の楽譜を載せますが、お気に入りの曲で電子オルゴールを作成してみましょう。

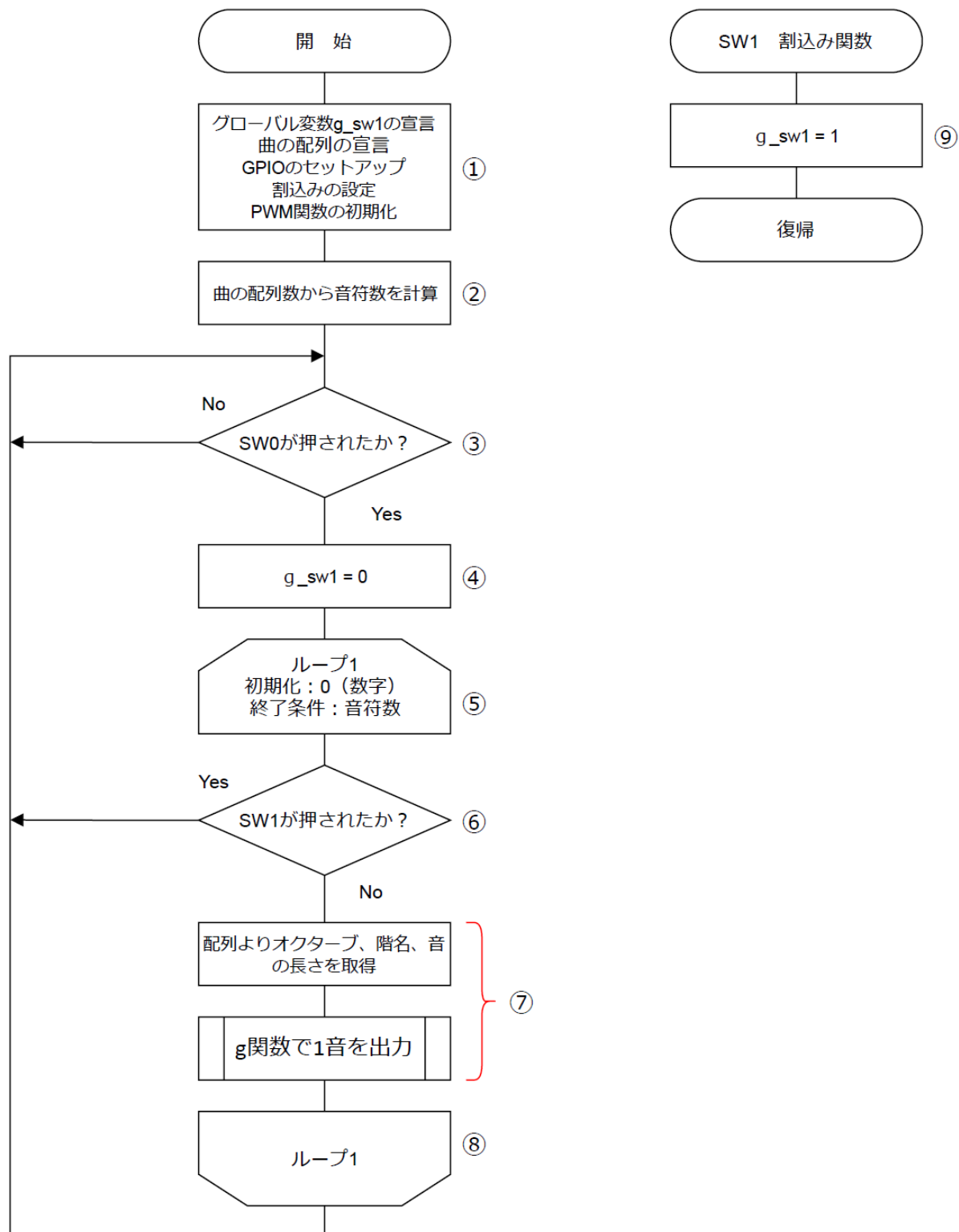
リスト 6-102: 簡単な楽譜の例

```
int music[9][3] = {
    {OC, DO, qN},           //ド
    {OC, RE, qN},           //レ
    {OC, MI, qN},           //ミ
    {OC, FA, qN},           //ファ
    {OC, SO, qN},           //ソ
    {OC, RA, qN},           //ラ
    {OC, SI, qN},           //シ
    {OH, DO, qN},           //ド(1オクターブ上)
    {OC, REST, qN}};
```

● フローチャート

参考までに、main 関数と SW1 の割込み関数のフローチャートを図 6-106 に示します。

図 6-106: 電子オルゴールのフローチャート



- ① main 関数と SW1 割込み関数で共通に使用するグローバル変数(g_sw1)を宣言します。g_sw1 が 0 のときは曲を再生し、1 のときは停止します。main 関数では、曲の配列(オクターブ、階名、時間)を作成し、GPIO のセットアップと割込みの設定を行います。
- ② 曲全体の配列から音符の数を求めます。音符の数は、曲を再生をループ文で処理するときの終了条件に使用します。
- ③ SW0(再生ボタン)が押されたら、曲を再生します。
- ④ グローバル変数 g_sw1 に 0 を代入して、再生の合図とします。
- ⑤ ループ 1 では曲の最初から再生し、最後の音符を再生したら繰り返し処理を終了します。
- ⑥ SW1 が押されたなら、再生を停止して③へ戻ります。グローバル変数 g_sw1 が 1 のときは、SW1 が押されたと判断します。
- ⑦ 配列より1音のオクターブ、階名、音の長さを取得し、g 関数に引数として渡します。
- ⑧ 最後の音符を再生したら、③へ戻ります。
- ⑨ SW1 の割込み処理では、SW1(停止ボタン)が押されたら、グローバル変数 g_sw1 に 1 を代入して、停止の合図とします。

図 6-107 : さくらさくらの楽譜

さくら さくら

120 BPM

さくら さくら の や ま も さ とーも み わ た す か ぎーり か す み か
 ラ ラ シ ラ ラ シ ラ シ ド シ ラ シ ラ ファ ミ ド ミ ファ ミ ミ ド シ ラ シ ド シ

8
 く もーか あ さ ひ に に おーう さくら さくら は な ざーか り
 ラ シ ラ ファ ミ ド ミ ファ ミ ミ ド シ ラ ラ シ ラ ラ シ ミ ファ シ ラ ファ ミ

音符と休符の長さ

全音符	2分音符	4分音符	8分音符
全休符	2分休符	4分休符	8分休符

付点の長さ

付点全音符加 $\text{♩.} = \text{♩} + \text{♩}$

付点2分音符加 $\text{♪.} = \text{♪} + \text{♪}$

付点4分音符加 $\text{♫.} = \text{♫} + \text{♫}$

表記の違い

① 120 BPM(Beats Per Minute) $\text{♩} = \frac{60 \text{ 秒}}{120} = 0.5 \text{ 秒}$

② $\text{♩} = 60$ $\text{♩} = \frac{60 \text{ 秒}}{60} = 1 \text{ 秒}$

【問題 6-6】 電子オルゴールのプログラム(その2)

問題 6-5 の解答例 (List6_Ex05.c) では、main 関数の中で楽譜を配列として記述していましたが、リスト 6-103 に示すように楽譜とマクロ定義をヘッダファイル (doremi.h) に移して実行します。ファイル名を「List6_Ex06.c」とします。

リスト 6-103: doremi.h

```
#define OL      3    //1 オクターブ下
#define OC      4    //中央のオクターブ
#define OH      5    //1 オクターブ上

#define REST    0    //休符
#define DO      1    //ド
#define DOS     2    //ド#
#define RE      3    //レ
#define RES     4    //レ#
#define MI      5    //ミ
#define FA      6    //ファ
#define FAS     7    //ファ#
#define SO      8    //ソ
#define SOS     9    //ソ#
#define RA     10    //ラ
#define RAS    11    //ラ#
#define SI     12    //シ

#define BPM     120      //Beats Per Minute
#define QN      60000/BPM //4 分音符(quarter note) の長さ(60000 ミリ秒=1 分)

int music[][3] = {          //ドレミ
    {OC,DO,QN},
    {OC,RE,QN},
    {OC,MI,QN},
    {OC,FA,QN},
    {OC,SO,QN},
    {OC,RA,QN},
    {OC,SI,QN},
    {OH,DO,QN},
    {OC,REST,QN},          //曲の最後は休止符を挿入して音を止める
};
```

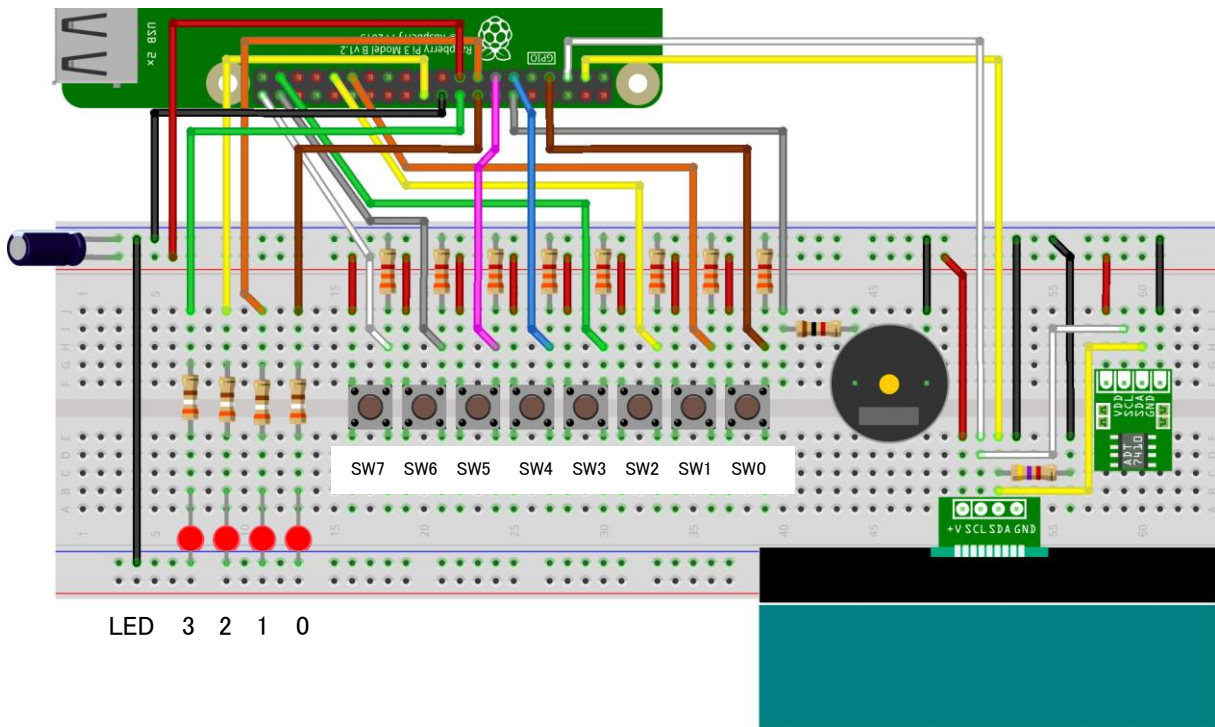
● ヒント

- 楽譜のヘッダファイルはソースコードと同じディレクトリに保存します。
- List6_Ex06.c から楽譜のヘッダファイルをインクルードするときは、次のように記述します。
「<>」と「"”」の違いは、「徹底入門」p.156-157 を参照してください。
#include "doremi.h"

Chapter 7 章末問題

「徹底入門」の図 7-23 (P. 161) の配線図において、Pi 4B 用にプルダウン抵抗をタクトイルスイッチに実装しました(図 7-101)。

図 7-101: 章末問題の配線図



【問題 7-1】 温度測定部の関数をライブラリに登録する

「徹底入門」の List7-3_Temp01.c (P. 163) の温度測定のスソースコードを Adt7410Read 関数として作成して、ライブラリ (libMyPi.a) に追加します。追加の方法は、ライブラリファイルの作成方法に準じますので、「徹底入門」の Chapter 7 (P. 155) を参照してください。下記に Adt7410Read 関数の仕様を示します。

登録したライブラリを使用して List7-3_Temp01 (P. 164) と同じように温度センサの測定値を 0.5 秒毎に小数点第一位までをターミナルに表示するプログラムを作成します。ファイル名を「List7_Ex01.c」とします。なお、技術評論社のサポートページからダウンロードしたサンプルソースコードには、既に Adt7410Read 関数は登録されています。

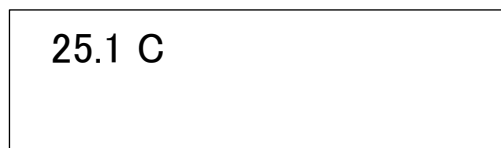
- 仕様
 - ・ 関数名 `double Adt7410Read(int fd)`
 - ・ 引数 `fd` `wiringPiI2CSetup` 関数で取得したファイルハンドル
 - ・ 戻り値 `double` 型、温度データ 単位℃

【問題 7-2】 温度を LCD に表示するプログラム(その1)

問題 7-1 の List7_Ex01.c を改造して、図 7-102 に示すように温度センサの測定値を 0.5 秒毎に小数点第一位までを LCD に表示するプログラムを作成します。ファイル名を「List7_Ex02.c」とします。

- ヒント
 - sprintf 関数を使用すると、実数を文字列へ変換できます。

図 7-102: LCD の表示例



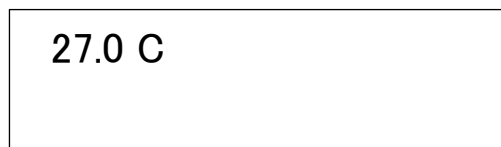
【問題 7-3】 摂氏と華氏に切り替えて LCD に表示するプログラム

タクトイルスイッチ SW0 を押す毎に、温度の単位を摂氏 (°C) と華氏 (°F) に切り替えて、LCD に表示するプログラムを作成します(図 7-103)。ファイル名を「List7_Ex03.c」とします。

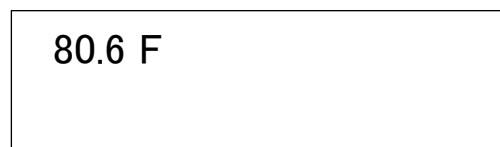
- ヒント
 - 華氏 (°F) は、式 7-101 より摂氏 (°C) より求めることができます。

$$F = \frac{9}{5}C + 32 \quad \text{[式 7-101]}$$

図 7-103: LCD の表示例



(a) 摂氏



(b) 華氏

【問題 7-4】 測定した温度データをファイルに保存するプログラム

SW0 を押すと 0.5 秒毎に、1 から始まる測定の連番と小数点第一位までを測定した摂氏度をカンマ (,) で区切って LCD に表示します(図 7-104)。また、連番、摂氏度、改行をテキストモードでファイルに記録し、記録中は LED0 を点灯させます。SW1 を押すと測定を停止させ、ファイルをクローズし、LED0 を消灯させてプログラムを終了します。ファイル名を「List7_Ex04.c」とします。

測定したデータを保存するファイルは CSV 形式とし、ファイル名を年月日時間秒、拡張子を「.csv」とします。例えば、プログラムを実行した時刻が 2020 年 2 月 6 日 10 時 48 分 28 秒であれば、20200206104828.csv となります。CSV は、Comma Separated Value の略で、「カンマ区切り」または「コンマ区切り」と呼ばれ、値をカンマ (,) で区切ったテキストファイルです。改行はレコードの区切りを表します(表 7-101)。

表計算ソフト(LibreOffice Calc)で CSV ファイルを開くと、図 7-105 の「テキストのインポート」のダイアログが表示されるので、「区切りのオプション」の「コンマ」にチェックを入れて「OK」をクリックします。連番と摂氏度のセルを選択してグラフ(散布図)を作成し、タイトルや凡例を入力します(図 7-106)。グラフを含めて保存する場合は、ファイルを ODF 表計算ドキュメント(.ods)形式で保存します。

図 7-104: LCD での温度の表示例

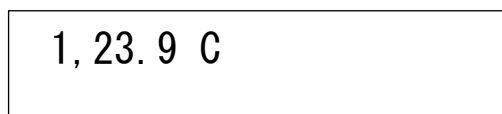
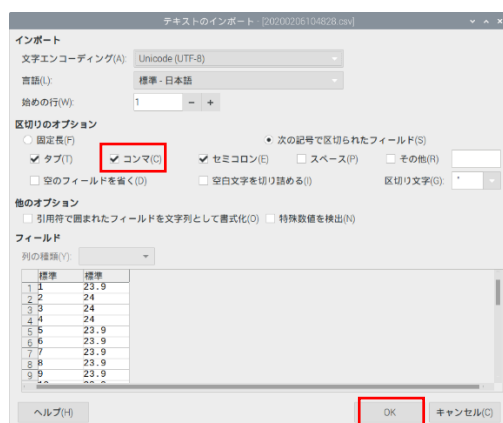


表 7-101: CSV ファイルのレコードフォーマット

連番	カンマ	摂氏度	改行
1	,	23.9	↵
2	,	24.5	↵
3	,	25.3	↵

・・・(略)

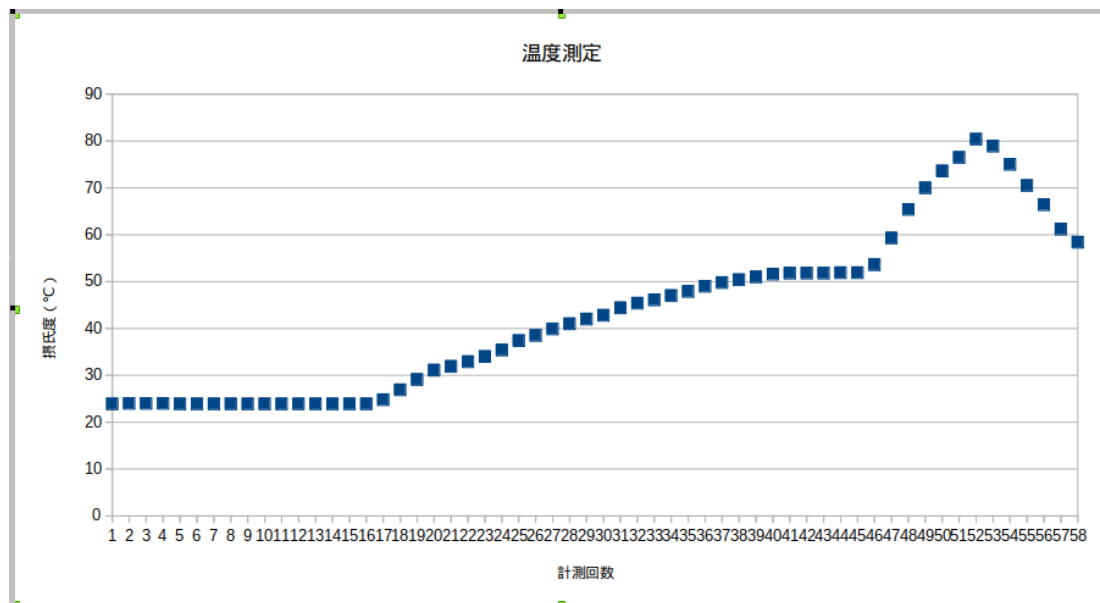
図 7-105: テキストのインポートのダイアログ



● 動作確認

- ・プログラムを実行し、SW0を押して測定を開始する。
- ・温度センサ(ADT7410)に熱を加え、1 分程度測定する。
- ・SW1 を押して測定を終了する。
- ・表計算ソフト LibreOffice Calc を「Menu」→「オフィス」より起動する。
- ・作成した CSV ファイルを開き、図 7-105 のコンマにチェックを入れて「OK」をクリックする。
- ・警告の「文書を編集」をクリックする。
- ・グラフ(散布図)を作成する。
- ・ODF 形式で名前を付けて保存する。

図 7-106: 表計算ソフトによる温度グラフの例



● ヒント ファイル名を年月日時間秒とする方法

日付及び時間を取得するために使用したヘッダファイル `time.h` で定義されている関数や構造体を利用します。`strftime` 関数は日時情報を指定された書式で、文字配列に格納します。`strftime` 関数の変換指定子は、Y(年)、m(月)、d(日付)、H(24 時制)、M(分)、S(秒)を表します。

```
time_t now;
char fileName[32];
now = time(NULL);
strftime(fileName, sizeof(fileName), "%Y%m%d%H%M%S.csv", localtime(&now));
fp = fopen (fileName, "w");
```



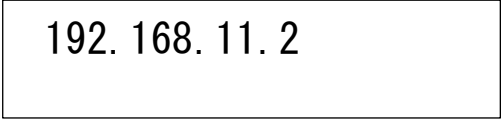
LibreOffice のメニューが英語の表記の場合は、次の手順で日本語に変換できます。

```
$ sudo apt update
$ sudo apt upgrade -y
$ sudo apt install libreoffice-l10n-ja
$ sudo apt install libreoffice-help-ja
```

【参考 7-1】 起動したときに LCD に IP アドレスを表示させる

OS が起動した時に LCD に IP アドレスを図 7-107 のように表示させます。

図 7-107:IP アドレスの表示例



192.168.11.2

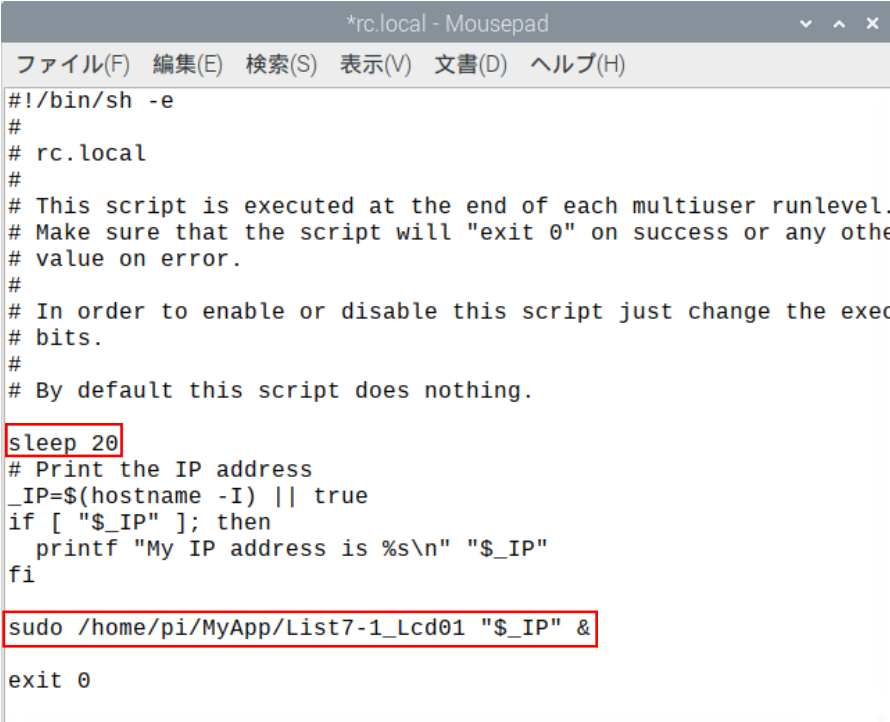
OS が起動する時に、「/etc/rc.local」に記載されたスクリプトやプログラムが自動的に管理者権限で実行されます。図 7-108 に示すように「rc.local」では IP アドレスを変数「\$_IP」に代入するスクリプトが既に記述されているので、変数「\$_IP」を List7-1_Lcd01（LCD に文字や数字を表示する）への引数とします。「rc.local」の編集には管理者権限が必要となりますので、sudo コマンドを使用してエディタ mousepad で編集します。

```
$ sudo mousepad /etc/rc.local
```

「rc.local」の 2 箇所(①と②)に追記します(図 7-108)。「rc.local」ファイルを保存して OS を再起動させると、IP アドレスが LCD に表示されます。

- ① sleep 20 を実行して、システムが安定するまで 20 秒間、時間待ちをします。
- ② List7-1_Lcd01 を管理者権限で実行し、引数&IP を渡して LCD に IP アドレスを表示します。
&は、プログラムをバックグラウンドで実行させる指示です(「徹底入門」(P. 288))。

図 7-108:rc.local ファイルの編集箇所



```
*rc.local - Mousepad
ファイル(F) 編集(E) 検索(S) 表示(V) 文書(D) ヘルプ(H)
#!/bin/sh -e
#
# rc.local
#
# This script is executed at the end of each multiuser runlevel.
# Make sure that the script will "exit 0" on success or any other
# value on error.
#
# In order to enable or disable this script just change the exec
# bits.
#
# By default this script does nothing.
① sleep 20
# Print the IP address
_IP=$(hostname -I) || true
if [ "$_IP" ]; then
    printf "My IP address is %s\n" "$_IP"
fi
② sudo /home/pi/MyApp/List7-1_Lcd01 "$_IP" &
exit 0
```



<i2cset コマンド>

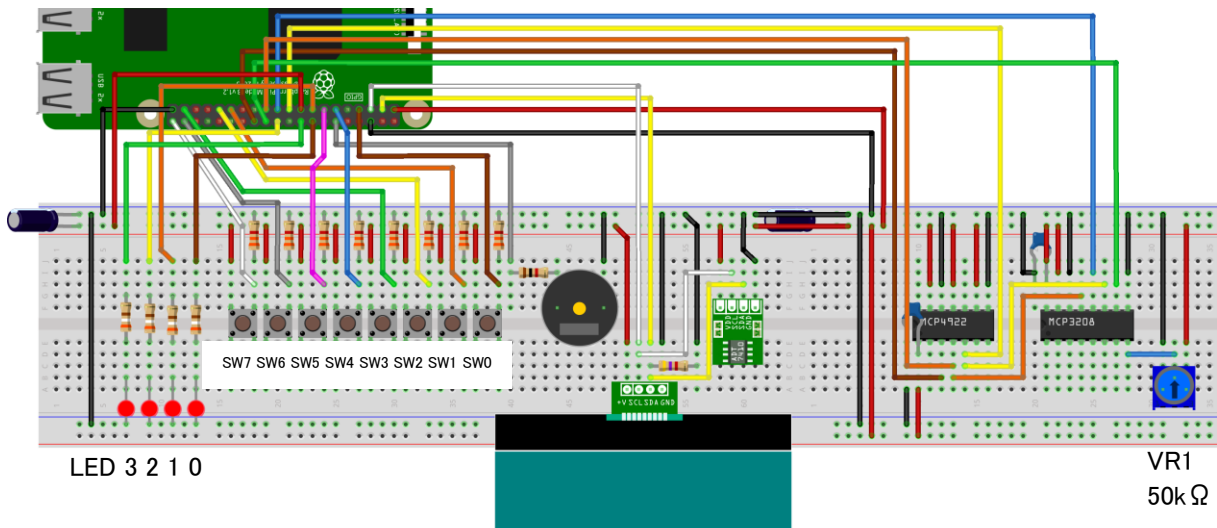
ターミナルから i2cset コマンドで I²C バスのデバイスヘデータを転送することができます。デバックに便利です。LCD AQM1602 の初期設定と「ABC」を表示する例を示します。

```
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x38 // Function set
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x39 // Function set
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x14 // Internal OSC frequency
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x73 // Contrast set
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x56 // Power/ICON/Contrast control
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x6c // Follower control
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x38 // Function set
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x01 // Clear Display
$ i2cset -y 1 0x3e 0x00 0x0c // Display ON/OFF control
$ i2cset -y 1 0x3e 0x40 0x41 // A
$ i2cset -y 1 0x3e 0x40 0x42 // B
$ i2cset -y 1 0x3e 0x40 0x43 // C
```

Chapter 8 章末問題

「徹底入門」の図 8-20 (P. 189) の配線図において、Pi 4B 用にプルダウン抵抗をタクトイルスイッチに実装しました(図 8-101)。

図 8-101: 章末問題の配線図



【問題 8-1】 D/A 変換処理の関数をライブラリに登録する

「徹底入門」の List8-1_Dac01.c (P. 181) の D/A 変換処理のソースコードを Mcp4922Write 関数として、ライブラリ (libMyPi.a) に登録します。下記に Mcp4922Write 関数の仕様を示します。登録したライブラリを使用して List8-1_Dac01 と同じように、ターミナルから 16 進数で 0 から fff までのデジタル値を入力し、MCP4922 の VOUTA と VOUTB の両方からアナログ電圧を出力させ、デジタルマルチメータで出力電圧を確認します。ファイル名を「List8_Ex01.c」とします。

● 仕様

- 関数名 `int Mcp4922Write(int ssNo, unsigned char dacCh, unsigned short dacCode)`
- 引数 `ssNo` スレーブセレクト 0=SS0, 1=SS1
- 引数 `dacCh` 0=VOUTA, 1=VOUTB
- 引数 `dacCode` 12bit DAC コード 0000-0fff
- 戻り値 `wiringPiSPIDataRW` 関数の戻り値

【問題 8-2】 A/D 変換処理の関数をライブラリに登録する

「徹底入門」の List8-2_Adc01.c (P. 191) の A/D 変換処理のソースコードを Mcp3208RW 関数として、ライブラリ (libMyPi.a) に登録します。下記に Mcp3208RW 関数の仕様を示します。登録したライブラリを使用して List8-2_Adc01 と同じように、可変抵抗 (50k Ω) VR1 からの入力電圧を 0.5 秒毎に A/D 変換して、ターミナルに ADC コード (16 進数) と電圧値 (小数点第三位) を表示します。ファイル名を「List8_Ex02.c」とします。

● 仕様

- 関数名 unsigned short Mcp3208RW(int ssNo, unsigned char adcChannel)
- 引数 ssNo スレーブセレクト 0=SS0, 1=SS1
- 引数 adcChannel MCP3208 のチャンネル番号 0 から 7
- 戻り値 12bitAD 変換データ 0000-0fff

【問題 8-3】 D/A 変換して出力した電圧を A/D 変換するプログラム

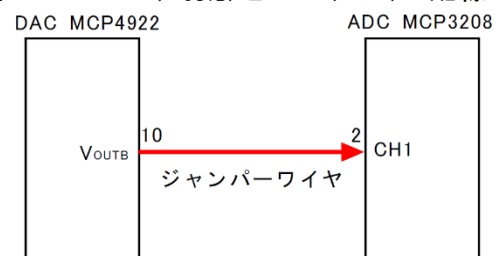
DAC MCP4922 の V_{OUTB} (10 ピン) と ADC MCP3208 の CH1 (2 ピン) をジャンパーワイヤで接続します。次に、ライブラリ (libMyPi.a) に登録した Mcp4922Write 関数と Mcp3208RW 関数を使用して、DAC MCP4922 から出力したアナログ電圧を ADC MCP3208 でデジタル値に変換します。

DAC MCP4922 の V_{OUTB} より 0.5 秒間隔で、実行例のように 0, 0xff, 0x1ff, 0x2ff ... 0xffff までアナログ電圧を 0.5 秒間隔で出力させ、ADC MCP3208 の CH1 でデジタル値に変換して、ターミナルに表示します。ファイル名を「List8_Ex03.c」とします。

● 実行例

```
DA-VoutB= 0H AD-CH1= 0H 0.000V
DA-VoutB= FFH AD-CH1= FDH 0.204V
DA-VoutB=1FFH AD-CH1=1FEH 0.411V
... (中略)
DA-VoutB=EFFH AD-CH1=EFAH 3.089V
DA-VoutB=FFFH AD-CH1=FF9H 3.294V
DA-VoutB= 0H AD-CH1= 0H 0.000V
DA-VoutB= FFH AD-CH1= FDH 0.204V
```

図 8-102: DAC (V_{OUTB}) と ADC (CH1) の配線



【問題 8-4】 A/D 変換した値を LCD に表示するプログラム

可変抵抗(50k Ω)VR1 を使用して、0 から 3.3V 範囲で任意の電圧を A/D コンバータ MCP3208 の CH7 に入力します。入力電圧を 0.5 秒毎に A/D 変換して、LCD に ADC コード (16 進数) と「徹底入門」の式 8-5 (P. 188) で計算した電圧を小数点第三位までを表示します (図 8-103)。ファイル名を「List8_Ex04.c」とします。

図 8-103: LCD の電圧の表示例

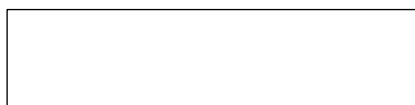


CH7=7FAH 1.645V

【問題 8-5】 A/D 変換した値を横棒グラフで LCD に表示するプログラム

可変抵抗(50k Ω)VR1 を使用して、0 から 3.3V 範囲で任意の電圧を A/D コンバータ MCP3208 の CH7 に入力します。入力電圧を 0.5 秒毎に A/D 変換し、17 等分して*を横棒グラフで LCD に表示します (図 8-104)。17 等分した最下位の電圧を入力したときは*は無しで、次の位から*を 1 つ表示し、最高位では*を 16 個表示します。ファイル名を「List8_Ex05.c」とします。

図 8-104: 横棒グラフの表示例



(a) AD7 = 0 V 付近のとき



(b) AD7 = 1.66 V 付近のとき



(c) AD7 = 3.3 V 付近のとき

【問題 8-6】 可変抵抗で LED の明るさを制御するプログラム

ソフトウェア方式の PWM を利用して、LED0 (GPIO23) の明るさを制御します。制御の方法は、可変抵抗 (50k Ω) VR1 と A/D コンバータ MCP3208 を用いて、LED0 への PWM 信号のデューティ比を 0 から 100% まで可変します。0.1 秒毎に可変抵抗の電圧を A/D 変換して、LED の明るさを制御します。また、PWM 信号の周波数を 100Hz とします。ファイル名を「List8_Ex06.c」とします。

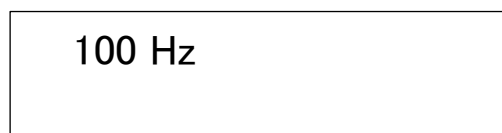
【問題 8-7】 可変抵抗で圧電サウンダの周波数を制御するプログラム

ハードウェア方式の PWM を利用して、SW0 が押されている間、GPI018 に接続されている圧電サウンダを周期 10ms から $20\mu\text{s}$ まで可変するパルス信号で鳴らすプログラムを作成します。周期の変更は、可変抵抗($50\text{k}\Omega$)VR1 と A/D コンバータ MCP3208 を用います。なお、周期から周波数を計算して、LCD に表示します (図 8-105)。0.1 秒毎に可変抵抗の電圧を A/D 変換して、周期を制御します。ファイル名を「List8_Ex07.c」とします。

● 条件

- ・デューティ比 約 50%
- ・PWM 信号の最小変化幅 $10\mu\text{s}$
- ・PWM 信号の波形のモード PWM_MODE_MS

図 8-105: 周波数の表示例



● ヒント

周期を 10ms から $20\mu\text{s}$ は、周波数にすると 100Hz から 50kHz の範囲になります。PWM 信号の周波数は、pwmSetRange 関数への引数 range で変更できます。A/D 変換した値を計算して、range に代入します。なお、題意より、PWM 信号の最小変化幅 $10\mu\text{s}$ なので、range が 2 のとき、周期は $20\mu\text{s}$ となり周波数は 50kHz となります。range、周期、周波数の関係を表 8-101 に示します。

表 8-101: range、周期、周波数の関係

range	周期 (sec)	周波数 (Hz)
2	0.00002	50,000
3	0.00003	33,333
...中略		
500	0.005	200
...中略		
999	0.00999	100
1000	0.01	100

【問題 8-8】 電圧を測定してファイルに保存するプログラム

SW0 を押すと、1 秒毎に時刻と可変抵抗 VR1 の電圧（小数点第三位まで）、改行をテキストモードでファイルに記録します。記録中は LED0 を点灯させます。また、LCD の 1 行目に時刻、2 行目に電圧値を表示します（図 8-106）。SW1 を押すと測定を停止して、ファイルをクローズし、LED0 を消灯させて、プログラムを終了します。ファイル名を「List8_Ex08.c」とします。

測定したデータを保存するファイルは、CSV 形式とし、ファイル名を年月日時間秒、拡張子を.csv とします。例えば、プログラムを実行する時間が 2020 年 2 月 24 日 12 時 03 分 54 秒であれば、20200224120354.csv とします。CSV は、Comma Separated Value の略で、「カンマ区切り」とも呼ばれ、値をカンマ（,）で区切ったものです。改行はレコードの区切りを表します（表 8-102）。ファイル名を年月日時間秒とする方法については、章末問題の問題 7-4 を参照してください。

表計算ソフト (LibreOffice Calc) で CSV ファイルを開いて、図 8-107 のグラフ（線）を作成し、タイトルや凡例を入力します。グラフを含めて保存する場合は、ファイルを ODF 表計算ドキュメント (.ods) 形式で保存します。

図 8-106: 時刻と電圧の表示例

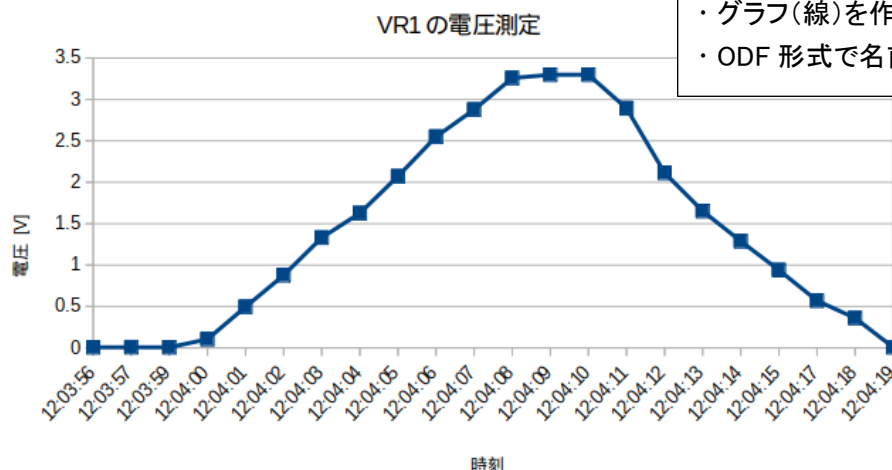
12:03:56
0.006 V

表 8-102: CSV ファイルのレコードフォーマット

時刻	カンマ	電圧値	改行
12:03:56	,	0.006	↵
12:03:57	,	0.007	↵
12:03:58	,	0.006	↵

・・・(以下、略)

図 8-107: 電圧測定のグラフ例



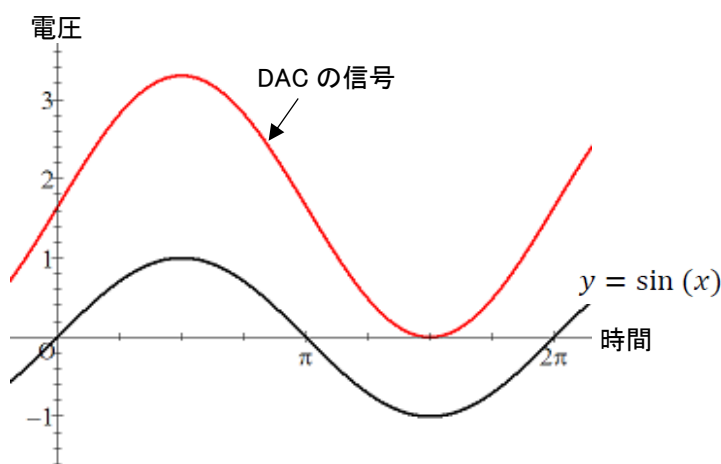
● 動作確認

- ・ VR1 を反時計方向に回し切る。
- ・ プログラムを実行し、SW0 を押して測定を開始する。
- ・ VR1 をゆっくりと時計方向に回転させて回し切ったら、反時計方向に回転させる。
- ・ VR1 を反時計方向に回し切ったら、SW1 を押して測定を終了する。
- ・ 表計算ソフト LibreOffice Calc を「Menu」→「オフィス」より起動する。
- ・ 作成した CSV ファイルを開き、図 7-105 のコンマにチェックを入れて「OK」をクリックする。
- ・ 警告の「文書を編集」をクリックする。
- ・ グラフ(線)を作成する。
- ・ ODF 形式で名前を付けて保存する。

【問題 8-9】 sin 関数で正弦波の信号を出力するプログラム

D/A コンバータ (MCP4922) の V_{OUTA} から正弦波(sin)の信号を出力します。図 8-108 に示すように、信号の出力電圧の範囲を 0V~3.3V とします。正弦波の 1 周期を 360 等分して計算し、信号は繰り返し出力するようにします。オシロスコープで MCP4922 の V_{OUTA} を測定します。ファイル名を「List8_Ex09.c」とします。なお、オシロスコープが無い場合は、図 8-109 に示す測定波形と実行例の解説を参照してください。

図 8-108: 正弦波と DAC の出力波形



● ヒント

- sin 関数を利用するには数学のヘッダファイル math.h をインクルードします。
- gcc コマンドに数学オプションの「-lm」を追加します。

```
gcc -Wall -o "%e" "%f" -lwiringPi -lpthread -g -O0 libMyPi.a -lm
```

- sin 関数の角度は弧度法になります。その単位を rad(ラジアン)と呼びます。正弦波の 1 周期は 60 分法では 360° ですが、弧度法では 2π [rad] となります。弧度 θ と 60 分法の角度 θ° には式 8-101 の関係があります。

$$\text{弧度 } \theta = \pi \times \text{角度 } \theta^\circ \div 180^\circ \quad [\text{rad}] \quad [\text{式 8-101}]$$

- 円周率(π)は PI とマクロ定義します。

```
#define PI 3.141593F
```

F は float 型の定数を示すサフィックスです。

- 図 8-107 に示すように sin 関数は、-1 から +1 の間で振幅します。正弦波を 0V から 3.3V の間で振幅させるには、振幅を最大電圧 3.3V の半分とし、オフセット電圧も 3.3V の中間とします。正弦波信号の出力電圧を V、弧度を θ [rad] とするとき、題意の正弦波の数式は式 8-102 となります。

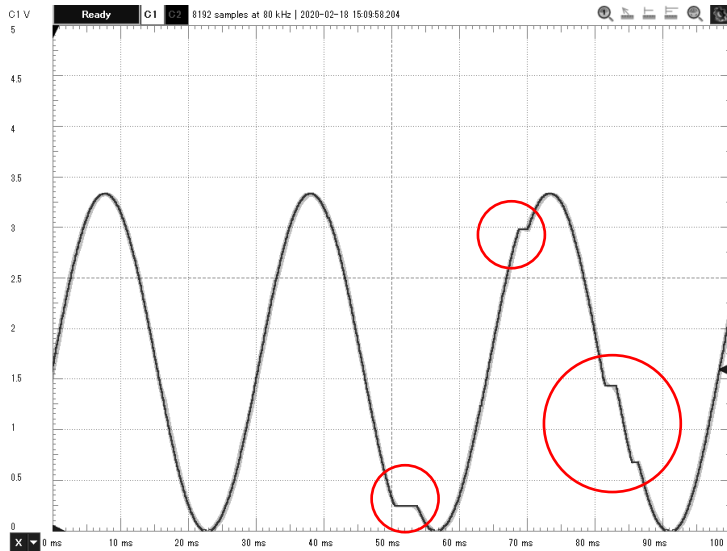
$$V = 1.65 \times \sin(\theta) + 1.65 \quad [\text{V}] \quad [\text{式 8-102}]$$

小文字の
ℓ (エル)

- 実行例

正弦波の周波数は 30～40[Hz]程度になります。マルチタスク OS でプログラムを実行しているため、大きな負荷が発生すると List8_Ex09 のプログラムを一時的に中断させるため、周波数が変化したり、出力が止まったりすることがあります(図 8-109)。

図 8-109: List8_Ex09 を実行中に Web Browser のアプリを起動したときの波形



Chapter 9 章末問題

「徹底入門」の図 8-20 (P. 189) の配線図において、Pi 4B のタクタイルスイッチ用にプルダウン抵抗と焦電センサモジュールを実装しました(図 9-101)。Pi カメラモジュールを Raspberry Pi 本体に取り付けます(図 9-102)。問題 9-2 は、表 9-101 に示す焦電センサモジュールを使用して人を検知する課題内容です。

表 9-101: 準備するもの

名称	個数	備考	参考品 (秋月電子通商)
焦電センサモジュール	1	人を検知するために使用します。	M-06835

表 9-102: LED と GPIO の対応表

焦電センサ	信号名
PIR	GPIO16

図 9-101: 章末問題の配線図

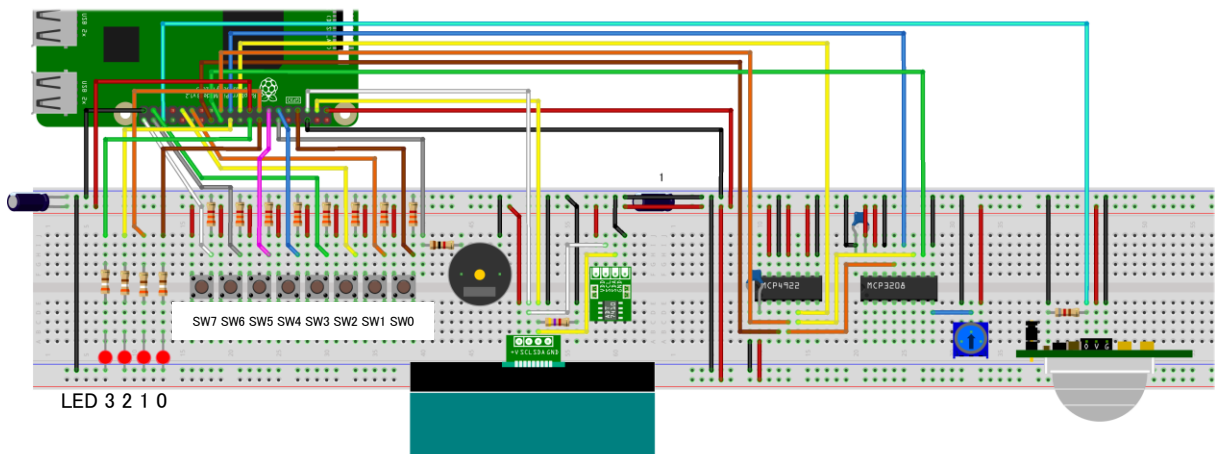


図 9-102: Pi カメラモジュール



【問題 9-1】 静止画のエフェクトを確認するプログラム

カメラ制御オプションのエフェクトを使用して、その効果をプレビューで確認しましょう。表 9-103 に示すように、各タクタイルスイッチを押すと対応したエフェクトで加工された静止画を約 5 秒間プレビューします。raspistill コマンドと「徹底入門」の表 9-5 (P. 202) に示すエフェクト・オプション「-ifx」を使用します。ファイル名を「List9_Ex01.c」とします。

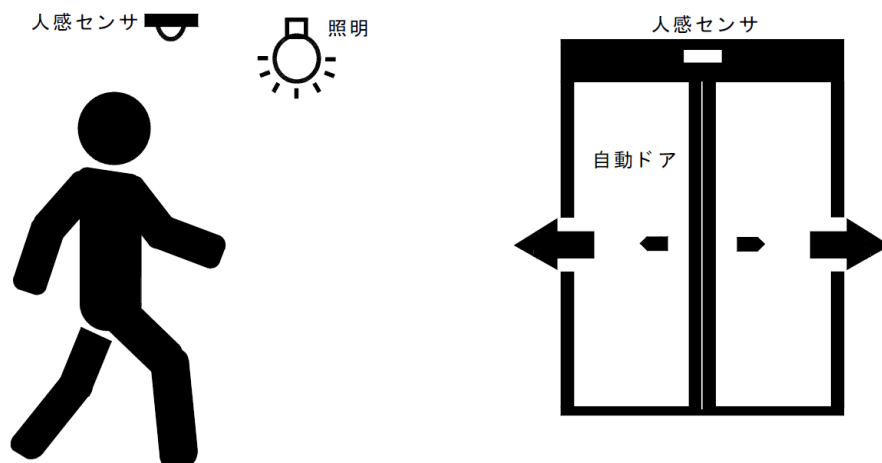
表 9-103: タクタイルスイッチとエフェクト

タクタイルスイッチ	エフェクト
SW0	none (エフェクトなし)
SW1	negative (反転)
SW2	solarise (ソラライズ)
SW3	posterise (ポスタライズ)
SW4	sketch (スケッチ)
SW5	denoise (ノイズ除去)
SW6	emboss (エンボス)
SW7	oilpaint (油絵)

【問題 9-2】 人を検知したら Pi カメラで撮影するプログラム

お店ではドアが自動的に開いたり、トイレでは自動的に照明が点灯したりします。これらの設備や機械には、人を感知する**人感センサ**が使用されています（図 9-103）。人感センサには、赤外線、超音波、可視光などが使用されます。本章では、人体から放射される赤外線を検出する**焦電素子**（Pyroelectric sensor）を使用します。

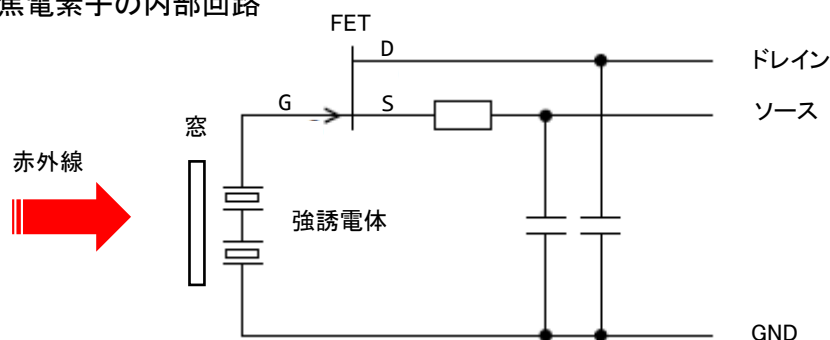
図 9-103: 様々なところで使用される人感センサ



● 焦電素子とは

赤外線放射量は温度に比例しています。焦電素子に内蔵された強誘電体は、赤外線を受光すると赤外線の変化に比例して表面に電荷が誘起されます。この現象を「焦電効果」と呼びます。図 9-104 に示す焦電素子の窓はフィルタになっており、目的の波長を検出します。内部の回路は、2 個の強誘電体を使用したデュアル型で、FET（電界効果トランジスタ）により検出信号を出力します。

図 9-104: 焦電素子の内部回路



● 焦電センサモジュールの仕様

今回、Parallax 社の PIR (Passive infra-Red) Sensor モジュールを使用します(表 9-104)。焦電センサモジュールは焦電素子と周辺回路を内蔵しています(図 9-105(a))。赤外線を効率良く集光するために、焦電素子にはドーム型フレネルレンズ²が取り付けられています(図 9-105(b))。

赤外線の検出範囲は短距離 (S) と長距離 (L) に分かれ、ジャンパーピンで設定します。人が焦電センサモジュールに近づくと、赤外線の変化を受けて焦電素子の強誘電体に電荷が発生して、出力信号は HIGH になります。フレネルレンズ内の LED が点灯します。

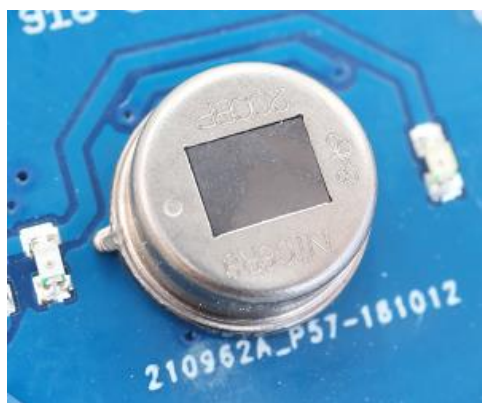
その後、人が遠くに離れたり、または人の動きが止まったりした場合には、赤外線の変化が無いので強誘電体の電荷も変化しません。そのため、出力信号は LOW となり、LED は消灯します。焦電センサは赤外線の変化、すなわち人の動きを検知します。

表 9-104: Parallax 社の焦電センサモジュールの仕様

項目	内容
電源電圧 (VCC)	3V~6V
検出範囲	短距離 約 4.6m 長距離 約 9m
出力信号	動き有り: HIGH、赤色 LED 点灯 動き無し: LOW、赤色 LED 消灯

² フランスの物理学者オーギュスタン・ジャン・フレネル (Augustin Jean Fresnel, 1788 年 5 月 10 日 - 1827 年 7 月 14 日) の発明に由来する。灯台のレンズとして発明され、光達距離を飛躍的に向上させ安全な船舶航行に貢献した。なお、焦電センサに使用される受光用のレンズは、灯台用のレンズとは形状が異なる。

図 9-105: Parallax 社の焦電センサモジュール



(a)フレネルレンズ内の焦電素子

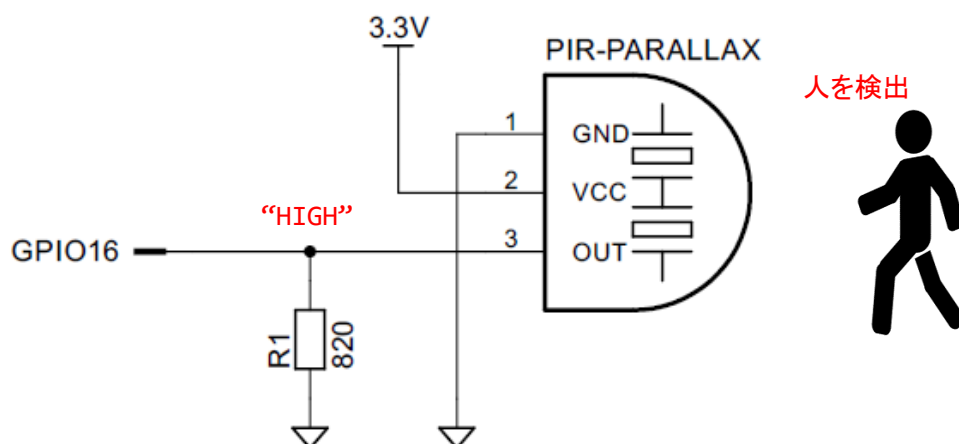


(b)フレネルレンズ

● 回路図

焦電センサモジュールの回路図を図 9-106 に示します。VCC はラズパイの 3.3V に接続します。出力信号(OUT)はラズパイの GPIO16 に接続し、立ち下りエッジ波形を急峻にするために抵抗 820Ω でプルダウンします。

図 9-106: 焦電センサモジュールの回路図



● 問題と仕様

焦電センサモジュールの検出範囲を短距離(S)に設定します。GPIO16 を割込みに設定し、出力信号(OUT)の立ち上がりエッジを検出したら、Pi カメラモジュールで撮影します。静止画のファイル形式は「徹底入門」の List9-1_Cam01.c (P.207) を参照してください。main 関数では、ターミナルに“hello, world”と 5 秒毎に表示します。ファイル名を「List9_Ex02.c」とします。

- date 関数を利用してファイル名を日時し、JPGE フォーマットで保存します。
2020 年 2 月 27 日 15 時 01 分 37 秒に記録した場合、ファイル名は「20200227-150137.jpg」になります。

参考文献/参考資料

- [1] Peter Prinz, Tony Crawford, 島敏博 監修, 黒川利明 翻訳, “C クイックリファレンス 第2版 (日本語),” オライリージャパン, (Nov. 2016)
- [2] IPA, “【改訂版】組込みソフトウェア開発向け コーディング作法ガイド[C 言語版]ESCR Ver.3.0,” 独立行政法人情報処理推進機構, (Jun 2018) <https://www.ipa.go.jp/sec/publish/tn18-004.html>
- [3] 福岡知的クラスタ(第1期)組込みソフト開発プロジェクト, “組込み現場の「C」プログラミング 標準コーディングガイドライン,” 技術評論社, (Oct. 2007)
- [4] MISRA-C 研究会, “組込み開発者におくる MISRA-C:2004—C 言語利用の高信頼化ガイド,” 日本規格協会, (Oct. 2006)
- [5] パーソナルメディア株式会社, 坂村健 監修, “実践 TRON 組込みプログラミング—T-Kernel と Teaboard で学ぶシステム構築の実際,” パーソナルメディア, (Dec. 2008)

シーげんご ラズベリーパイ てっていにゅうもん
C言語ではじめるRaspberry Pi 徹底入門

しょうまつもんだい
章末問題 Chapter 4 ～ Chapter 9

2020 年 5 月 31 日 初版

2020 年 7 月 3 日 修正・補足

2020 年 12 月 20 日 第 2 版

2021 年 5 月 12 日 第 3 版 CPU 使用率の抑制等の修正

2022 年 6 月 13 日 第 3.1 版 CPU 使用率の抑制等の補足

2023 年 4 月 3 日 修正・補足 問題 5-6

©2020 菊池達也