

トランジスタ技術 増刊

[STマイクロエレクトロニクス監修]

今どきプログラミング入門付き

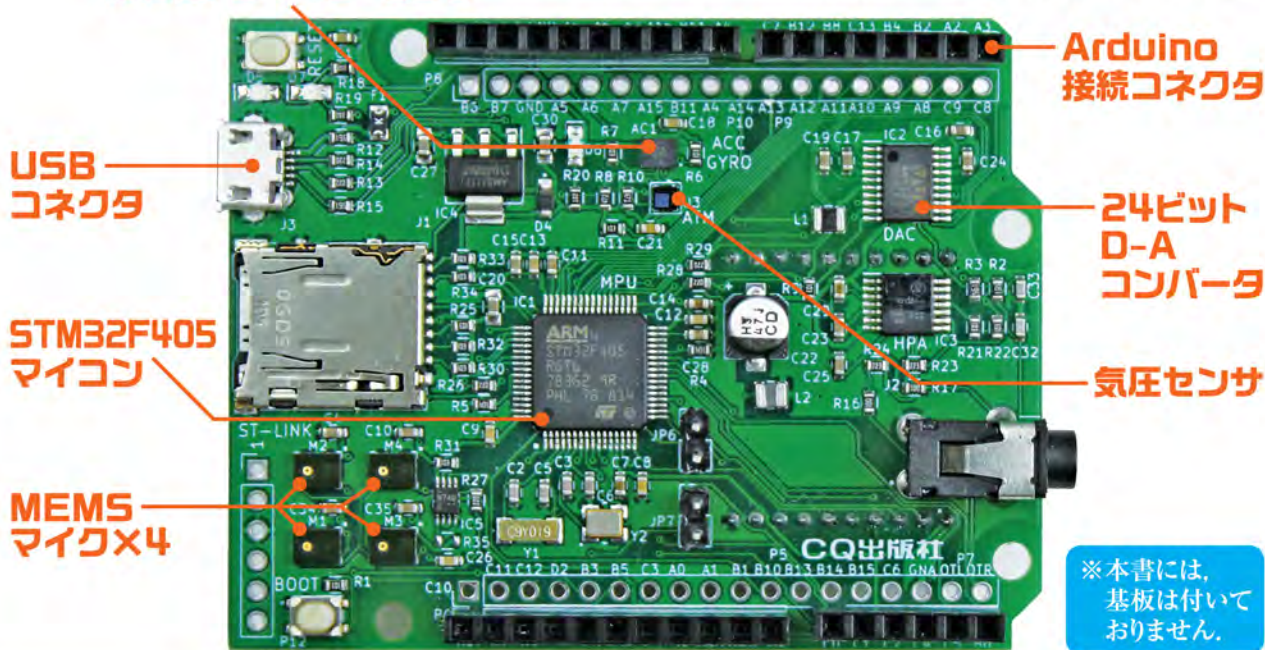
トライアル
シリーズ



定番STM32で始めるIoT実験教室

加速度/ジャイロ・センサ

白阪 一郎, 永原 柊 ほか 著

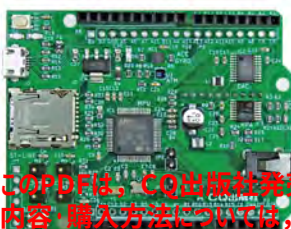


※本書には、
基板は付いて
おりません。

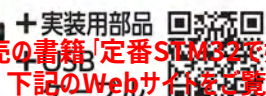
本書の実験に使える基板はこちら

IoTプログラミング学習ボード
ARM-First

CQ出版WebShopにて
お買い求めいただけます



Wi-Fi
基板

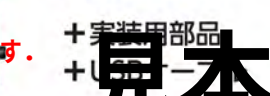


本書と基板類をセットにした
特別版

書店等およびCQ出版WebShopにて
お買い求めいただけます



Wi-Fi
基板



CQPDFは、CQ出版社発売の書籍「定番STM32で始めるIoT実験教室」の一部見本です。
内容・購入方法については、下記のWebサイトをご覧ください。

内容: <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MTR/MTRZ202110.html>

見本

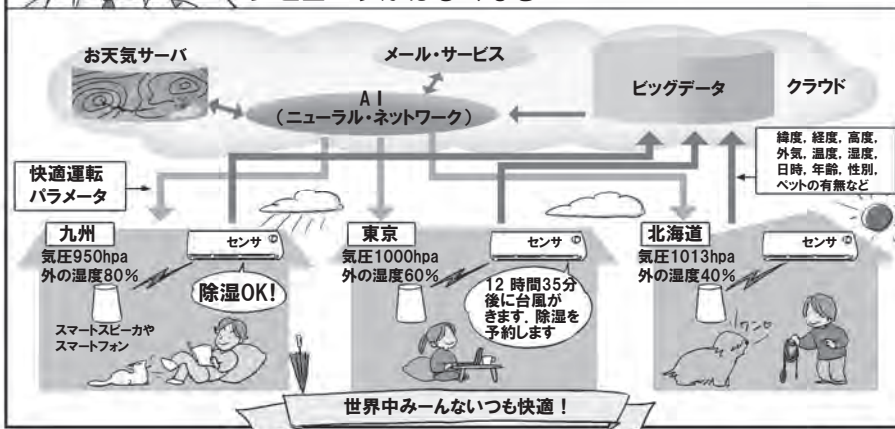
CQ出版社



アリの群れが
ゾウを倒す…
みたいな？

ウザイ奴

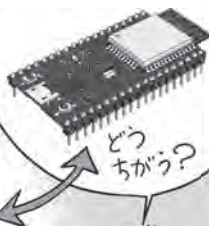
IoT 機器の 1 つ 1 つは非力だけど、たくさん集まれば
集まるほどすごい力を発揮するんだ。だからできるだ
け安く簡単にインターネットに接続できる組み込みコ
ンピュータがほしくなる



マイコンよりも高性能なシングルボード・コンピュータを使うという手もある。代表格は Raspberry Pi (ラズベリー・パイ)！Wi-Fi が搭載されているものを選べば、インターネットに簡単に接続できるよ。Wi-Fi 搭載でも 5,000 円以下で買える

ESP32 とはど
ういう違いが
あるんです
か？

Raspberry Pi は Linux OS も動く本格的なコンピュータで性能が高いんだけど、その分消費電力も大きめだ



屋外など電源が取れない
ところでは、ESP32 のよ
うな低消費電力のマイコン
のほうが電池が長持ちす
る

そうか。機能だけ
じゃなくて、消費
電力のことも考え
ないといけないん
ですね



ここからは、IoT 機器の
作り方を学ぶぞ。基本は
マイコンを正しく制御する
プログラミング技術だ



見本

第1章

STM32マイコンが
世界標準になった理由

Armマイコンの代表格

新里 祐教 Hiroataka Niisato

ST マイクロエレクトロニクスは、大手半導体メーカーでは世界初となる Arm Cortex-M 搭載 32 ビット・マイコン「STM32」を 2007 年に発売しました。汎用マイコン市場でのシェアは、2007 年当時 3% 未満でしたが、2018 年には 20% を超え、約 10 年で世界標準の Arm マイコンになりました。なぜこれほどの人気製品になったのでしょうか？ 本稿ではその理由を紹介します。

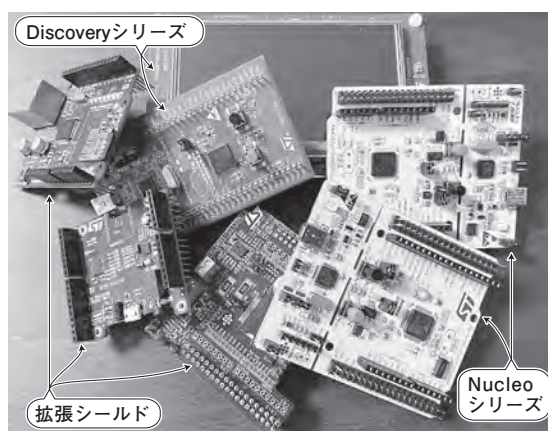


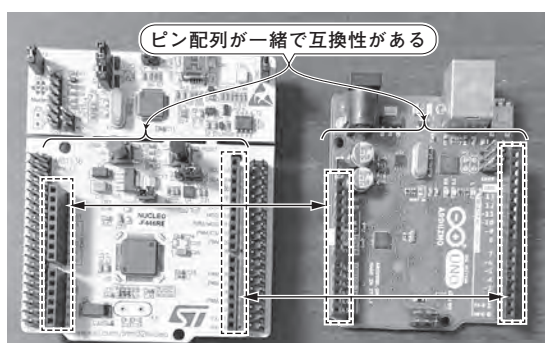
写真1 STM32Fマイコンの魅力1：千円台で入手できる開発ボードが各種販売されている
手持ちのSTM32Fボードと拡張シールド。左からEthernet Shield, SensorTile Shield, X-NUCLEO-IHM04A1デュアル・モータ・ドライバ, STM32F0 Discovery, STM32F7 Discovery, NUCLEO-F446RE, NUCLEO-F302R8

STM32Fは、STマイクロエレクトロニクスから発売されている32ビット・マイコンです。“F”はFoundationの頭文字から採られており⁽¹⁾、本シリーズは、非常に多くの開発シーンで利用されています。私も、IoT向けの開発や電動自転車レース、ホビー向けのドローンでSTM32Fを利用しました。

STM32Fが人気を集めるのには、どういった理由があるのでしょうか？ここでは、STM32Fの魅力や利用するメリットについて紹介します。

理由その1： 開発ボードが入手しやすい

写真1に示すのは、私の自宅にあったSTM32Fの開発ボードNucleo、Discoveryと拡張シールドです。STマイクロエレクトロニクスは、DiscoveryとNucleoと呼ばれる2種類の開発ボードを提供しています。



(a) NucleoとArduino UNO

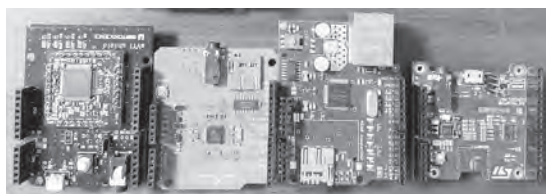


写真2 NucleoシリーズにはArduino UNO R3と同じピン配列の拡張コネクタが付いている
NUCLEO-F446RE, Arudino UNOはピン配列が同じ。拡張ボードも各種同じインターフェースなので、Arduino用のものでもNucleoで利用できる。拡張シールドは左からeVY1, MP3 Player, Ethernet Shield, SensorTile Shield

特にNucleoシリーズは、IoT(Internet of Things)向けの展示会やイベントでSTマイクロエレクトロニクスが無料で配布していたり、2,000円以下と非常に安価に入手できたりするので、持っている開発者も多いと思います。私も気づいたら多くのSTM32F開発ボードが自宅にありました。

STM32Fは、STM32シリーズの中でもメイン・ストリーム～高スペックに位置付けられています(図1)。特に高スペックな製品は、AI(ディープ・ラーニング/CNN)やGUIを動かすことができます。このよう

見本

第1章

IoTプログラミング実験回路の準備

Wi-Fi & センサ搭載でインターネット接続やアナログ信号処理の基本をマスターできる

白阪 一郎 Ichiro Shirasaka, 永原 柊 Shu Nagahara

ここでは、CQ出版社が開発したIoTプログラミング学習ボード「ARM-First」を紹介します。このボードだけで、気圧や加速度/角速度の測定、音声処理、マイクロSDカードの読み書き、ネットワークへの接続ができます。

IoTプログラミング学習ボード ARM-First

写真1に示すのは、CQ出版社が開発したIoTプログラミング学習ボード「ARM-First」です。STマイクロエレクトロニクス社のSTM32F405RGT6(Cortex-M4)を搭載したマイコン・ボードです。

図1に示すように、このボードだけで、気圧や加速度/角速度の測定、音声処理、マイクロSDカード(SDIOシリアル4ビット)の読み書き、ネットワークへの接続ができます。

音声処理は、MEMSマイク(4個)、I²S(Inter-IC Sound)インターフェースを持つD-Aコンバータ(192 kHz, 24ビット)、ヘッドホン・アンプを搭載し、

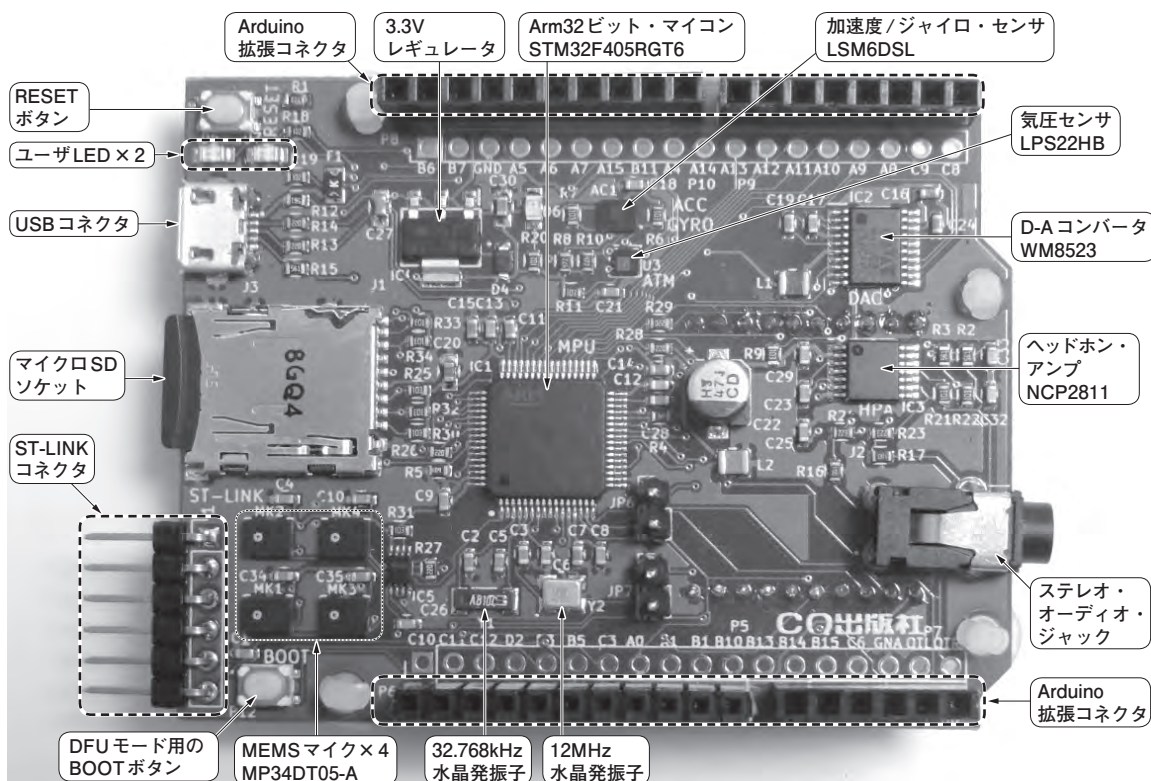


写真1 気圧や加速度/角速度(ジャイロ)の測定、音声処理、マイクロSDカード(SDIOシリアル4ビット)の読み書き、の接続ができるIoTプログラミング学習ボード「ARM-First」(設計: 白阪 一郎)
学生向けマイコン・ボード Arduino Uno とサイズが同じ(約5×7 cm)

見本

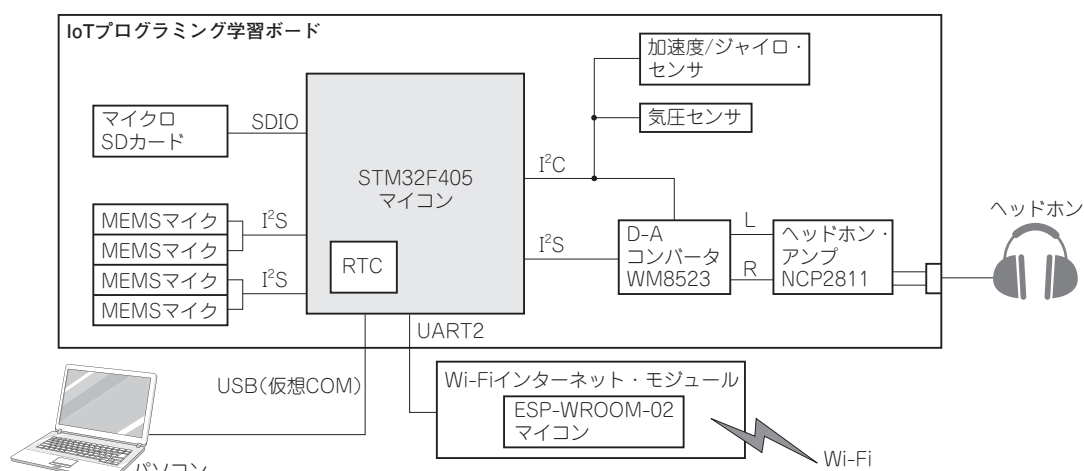


図1 IoTプログラミング学習ボードだけで、気圧・温度や加速度/角速度（ジャイロ）の測定、音声処理、マイクロSDカード（SDIO シリアル4ビット）の読み書きができる

高音質の音声処理や音楽再生ができます。

Arduino仕様の拡張コネクタも搭載しています。液晶ディスプレイやグラフィック・ディスプレイ、モータ・ドライバなど、周辺I/Oを拡張するボード（Arduinoシールド）を接続することにより、実用的なアプリケーションにも活用できます。

本ボードは、AVRマイコンを搭載した学生向けマイコン・ボードであるArduino Unoとサイズが同じで、約5×7 cmです。

● 特徴①：さまざまな開発環境が使える

- (1) STマイクロエレクトロニクス社純正の開発環境STM32CubeIDEを使って、C言語やC++言語によるプログラム開発ができます。
- (2) Arduino用のボード・ライブラリSTM32GENERICを利用して、Arduino IDEによるプログラム開発ができます。
- (3) Pyboard用MicroPythonのライブラリを使ったプログラム開発ができます。MicroPythonの1行入力でコマンドを実行できるコマンド・インターフェースにより、ビギナでもすぐに組み込み機器のプログラムが作れます。

写真2 IoTプログラミング学習ボード「ARM-First」に搭載されたArmマイコンSTM32F405RGT6（STマイクロエレクトロニクス）クロック周波数168 MHz、RAM：192 Kバイト、フラッシュ・メモリ：1024 Kバイトを搭載した64ピンの32ビット・プロセッサ



● 特徴②：Armマイコンのデファクト・スタンダードSTM32F4マイコン（STM32F405）を搭載

IoTプログラミング学習ボードに搭載されたArmマイコン（写真2）は、STマイクロエレクトロニクス社のSTM32F405RGT6（Cortex-M4）です。クロック周波数168 MHz、RAM：192 Kバイト、フラッシュ・メモリ：1024 Kバイトを搭載した64ピンの32ビット・プロセッサです。最新のプロセッサではありませんが、そのぶん多くのライブラリが蓄積されています。

初めて使うマイコンのプログラム作成は、マイコンの仕様書を読むだけでは難しいものです。このときに大きな助けとなるのが、実際に動作するサンプル・プログラムです。デファクト・スタンダードのマイコンは、ネット上にたくさんサンプル・プログラムがあり、プログラム作成の敷居を大幅に下げられます。

● 特徴③：Wi-Fi接続用モジュールを搭載

IoTプログラミング学習ボードの裏面側にインターネット接続用のWi-Fiモジュールを搭載しています（写真3、写真4）。

インターネット・ラジオの再生や、クラウド上のAIサーバにセンサ・データを送ればインターネットを介した高度なデータ処理ができます。

● 特徴④：AIスピーカやIoT機器を作るためのセンサを各種搭載

オーディオ入力用のMEMSマイク（4個）、出力用のハイレゾ対応D-Aコンバータ、ヘッドホン・アンプ、大量データの高速保存・読み出しができるマイクロSD用のソケットを搭載しています。外付け部品などでビーム・フォーミングやハイレゾ音楽再生などの響関連のアプリケーション製作や実験ができます。

見本

ここでは、第2部で紹介したSTM32マイコン搭載ボード「ARM-First」とプログラミング環境STM32CubeIDEを使って、ボードに実装されているさまざまな機能の動かし方を解説します。「どういう場合にその機能が必要とされるのか」についても、あわせて示します。

第1章 デジタル出力回路を動かす

デジタル出力機能は、マイコンで照明のON/OFFを制御するなど、外付けのデバイスを動かすときに使う機能の1つです〔表1(a)〕。

扇風機をOFF/弱/中/強の4段階で制御したければ、表1(b)のようにデジタル出力を2つ組み合わせることによって実現できます。

動かしてみる

● 実験回路

作成する回路を図1に示します。拡張端子D4(Arduino拡張端子名で表記、以下同様)とGNDの間に、抵抗とLEDを直列に入れます。LEDには極性があるので注意してください。

この回路をブレッドボードで実現した例を写真1に示します。Arduinoのシールドにブレッドボードを載せたものがあるので、それを使うと便利です。

● マイコンの設定

前章(第2部 第2章)ではARM-First基板上のLEDを点滅させるために、PA15とPB4をGPIO_Outputに

表1 複数のデジタル出力を組み合わせる

2つのデジタル出力を組み合わせれば、4通りの制御ができる

デジタル出力	機器の状態
0	OFF
1	ON

デジタル出力1	デジタル出力2	扇風機の状態
0	0	OFF
0	1	弱
1	0	中
1	1	強

(a) デジタル出力の値と制御する機器の状態 (b) 複数のデジタル出力を組み合わせると多くの状態を指定できる

設定しました。今回、外付けLEDをつないだ拡張端子D4は、マイコンのPC13ピンに接続されています。そこで、PA15とPB4に加え、PC13もGPIO_Outputに設定します。

● プログラムの作成

設定を行った上で、前章で説明したように、プログラムのソース・コードを自動生成します。生成されたmain.cを開いて、リスト1のように記述を追加します。

このプログラムをコンパイルしてマイコンに書き込み、実行すると、ARM-First上のLEDと外付けLEDがすべて0.5秒消灯して1.5秒点灯する、という動作を

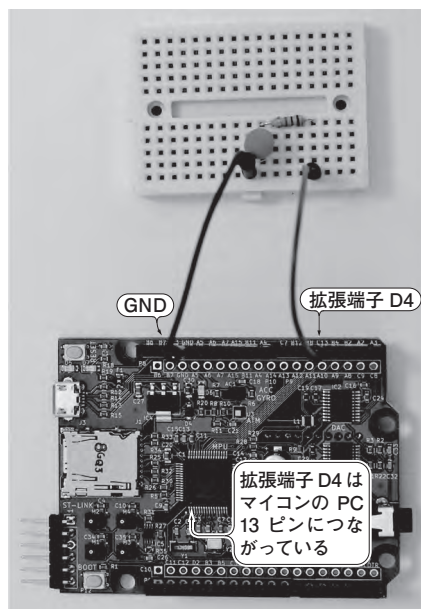


写真1 実験回路をブレッドボードで実現した例



図1 デジタル出力の実験回路

リスト1 デジタル出力させるプログラム例

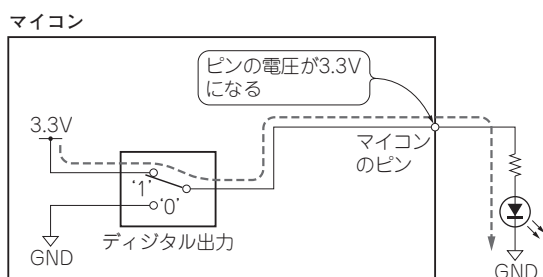
3つの出力ピンに対して0.5秒間0を出力し、1.5秒間'1'を出力することを繰り返している

```
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_15, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_Delay(500);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_15, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(1500);
}
/* USER CODE END 3 */
```

上の2行はARM-First上のLEDを操作
0.5秒間、'0'を出力
1.5秒間、'1'を出力
3行目は外付けLEDを操作

見本



(a) デジタル出力を '1' に設定すると LED に電流が流れて点灯する

図2 '1' を出力するとLEDが点灯するときのマイコンの内部動作

繰り返します。

プログラムの内容を見ると、HAL_GPIO_WritePin という関数でデジタル出力を行っています。その引き数は、最初の2つで出力するピンを指定し、最後の値で出力する値を指定します。

最初の引き数はGPIOxの形式で、xのところにPA、PB、PCのA、B、Cが入ります。最後の引き数はGPIO_PIN_RESET か GPIO_PIN_SET で、GPIO_PIN_RESETは0、GPIO_PIN_SETは1を表します。

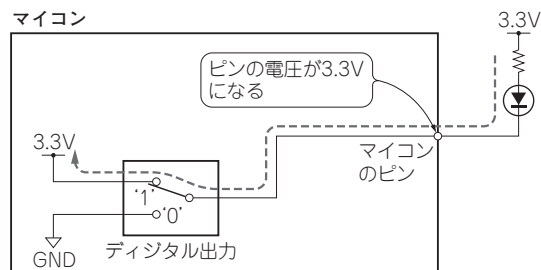
● マイコンの内部動作

図2を見てください。デジタル出力で1を出力すると、マイコン内部では図2(a)のような接続になります。つまり、マイコンのピンには電源電圧である3.3Vが出力されます。すると、このピンから抵抗を通してLEDに電流が流れるので、LEDが点灯します。

逆に、デジタル出力で0を出力すると、マイコン内部では図2(b)のような接続になります。つまり、マイコンのピンの電圧はGNDと等しくなります。すると、LEDの両端がGNDにつながっていることになるので、LEDには電流が流れず消灯します。

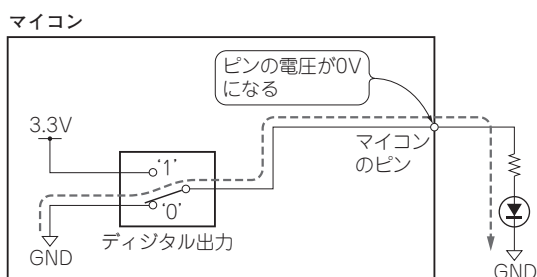
「0を出力すると外付けLEDが点灯する回路」に変える

外付けLEDをつなぐ回路の構成を変えて、デジタル出力で0を出力したときに外付けLEDを点灯させます。



(a) デジタル出力を '1' に設定すると LED に電流が流れなくなって消灯する

図4 '0' を出力するとLEDが点灯するときのマイコンの内部動作



(b) デジタル出力を '0' に設定すると LED に電流が流れなくなって消灯する

● 実験回路

先ほどは拡張端子D4とGNDの間にLEDを入れましたが、今度は図3のように3.3Vと拡張端子D4の間にLEDを入れる構成に変更します。

● 動作の確認

先ほどは、ARM-First上のLEDと外付けLEDが同時に点灯/消灯していましたが、今度はARM-First上のLEDが点灯しているときは外付けLEDが消灯し、ARM-First上のLEDが消灯しているときは外付けLEDが点灯します。

プログラムの動作と関連付けて言うと、デジタル出力で1を出力すると外付けLEDは消灯し、デジタル出力で0を出力すると外付けLEDは点灯します。

● マイコン内部の動作

デジタル出力で1を出力した場合、図4(a)のようにマイコンのピンは3.3Vと接続されます。すると今回の外付けLED回路では、LEDの両端が同じ3.3Vになって電流が流れないのでLEDが消灯します。

デジタル出力で0を出力した場合、図4(b)のようにマイコンのピンはGNDと接続されます。すると、LEDに電流が流れて点灯します。

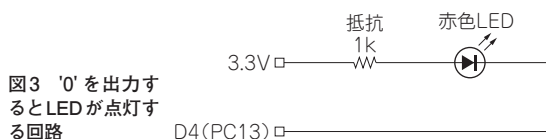
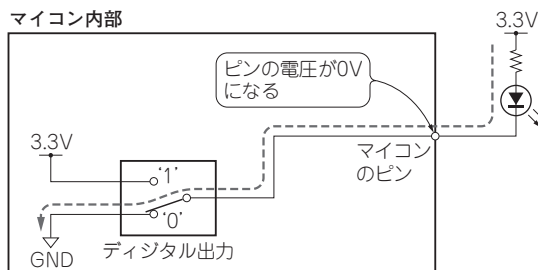


図3 '0' を出力するとLEDが点灯する回路



(b) デジタル出力を '0' に設定すると LED に電流が流れて点灯する

見本

STM32マイコンと4つのMEMSマイクを搭載したIoTプログラミング学習ボード「ARM-First」を使って、音源の方向推定とビーム・フォーミングを実現します。

これを開発するために、STマイクロエレクトロニクスが提供している音声信号処理用ソフトウェアX-CUBE-MEMSMIC1を活用します。これにより、複雑な信号処理アルゴリズムやDSPプログラムを開発せずにファームウェアを作成することができ、簡単にSTM32マイコンのリアルタイム音声信号処理能力を体感できます。

第1章

ビーム・フォーミングの基本

複数のマイクの音声信号から信号処理で指向性を形成する！

マイクのS/Nが大きく改善される
「ビーム・フォーミング技術」

● 4つのマイクで音源の方向を割り出す

写真1に示すように、IoTプログラミング学習ボード「ARM-First」には、STM32F405マイコン（以下STMマイコン）のほか、音声信号を扱うための入出力デバイスが搭載されています。

入力用デバイスとして4つのMEMS（Micro-Electrical-Mechanical Systems）デジタル・マイク（以下MEMSマイク、または単にマイク）が、出力用デバイスとしてオーディオ用24ビット・ステレオD-Aコンバータ（Digital-to-Analog Converter、以下オーディオD-Aコンバータ）などがあります。

このボードにはなぜ4つもMEMSマイクが搭載されているのでしょうか。単に音声の録音を行うならマイクは1つでも十分です。ステレオで録音するにしてもマイク間の距離が近すぎるのでは？と、いろいろ疑問がわいてきます。

実は、複数のマイクから得られる音声を信号処理することで、どの方向から音声が入ってくるかがわかったり、雑音の中から特定の方向の音声を拾い出すことができるのです（写真2）。

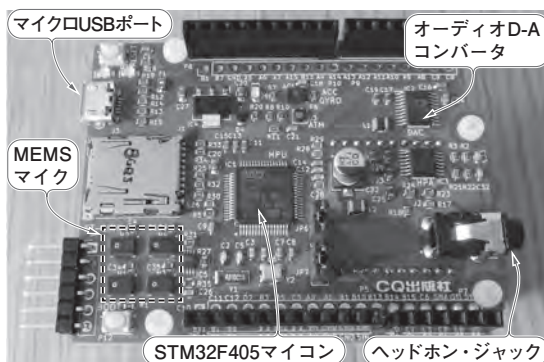


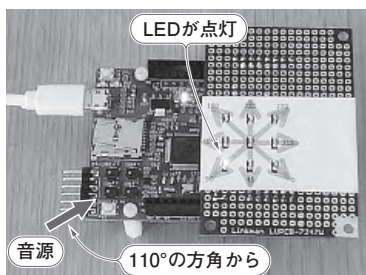
写真1 IoTプログラミング学習ボード「ARM-First」の外観
STM32F4マイコンを中心にUSBオーディオ用マイクロUSBポート、4つのMEMSマイク、オーディオ用D-Aコンバータ、ヘッドホン・ジャックを搭載している

● 複数のマイクの音声信号から音源の方角がわかる
「音源位置の角度推定」

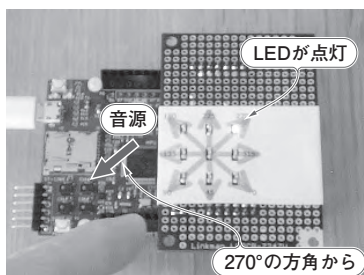
音声がどの方角からマイクに入ってくるかは、マイク間の距離と音声の到達時間の差から推定できます。図1は2つのマイクを使った場合の模式図です。音源の方角（角度） θ [rad] は次の式で表されます。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{c\Delta}{d}$$

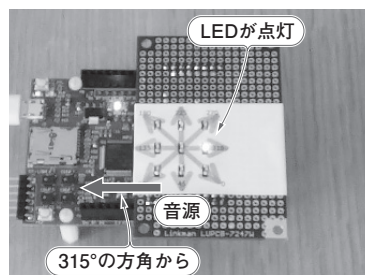
ただし、 d ：マイク間の距離 [m]、 Δ ：音声の到達時間の差 [s]、 c ：音速 [m/s]



(a) 110°の方角から音声が到来



(b) 270°の方角から音声が到来



(c) 315°の方角から音声が到来

写真2 音源の方向を推定してその方向を示すLEDを点灯させた例

4つのマイクからの音声をデジタル信号処理して音源の方向を推定する。得られた角度推定結果をもとに360°を8分割した範囲判定を行い、その範囲内のLEDを点灯させている。角度の基準は図9を参照のこと

見本

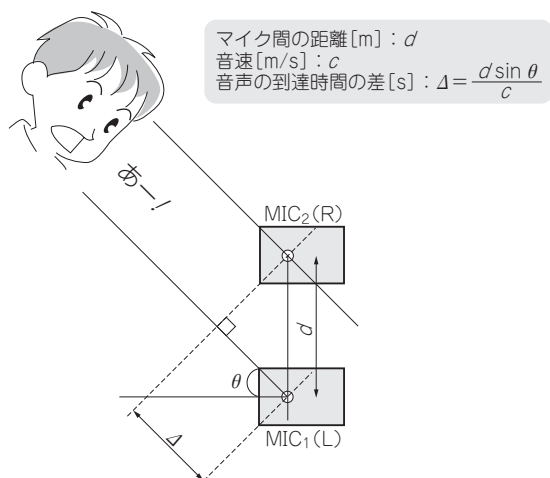


図1 音源位置の角度推定の基本原理

● 2つの無指向性マイクの音声信号から信号処理で指向性を形成する「ビーム・フォーミング」

図2は、ビーム・フォーミングの基本となる1次差動マイク・アレイ (Differential Microphone Array) のブロック図です。

1つのマイク (MIC₂) の音声信号を遅延させ、もう1つのマイク (MIC₁) の音声信号から減算することで図3の指向性パターンが得られます。遅延 Δ はマイク間の距離 d に相当する音声の到達時間です。

図3のような1つの方向からの音声に対して高い感度をもつ指向性パターンをカーディオイド (Cardioid) と呼びます。

音源位置の角度推定とビーム・フォーミングのソフトウェア

音源位置の角度推定とビーム・フォーミングのSTMマイコン向けソフトウェアは、ソフトウェア・パッケージ「X-CUBE-MEMSMIC1^{注1}」としてSTマイクロエレクトロニクスより提供されています。

X-CUBE-MEMSMIC1には、音源位置の角度推定用の「AcousticSLライブラリ」と、ビーム・フォーミングの信号処理用として「AcousticBFライブラリ」が用意されています。

■ AcousticSL ライブラリ

AcousticSL ライブラリを使用することで、2つまたは4つのMEMSマイクから得られる音声信号より、音源位置の角度推定 (Sound Source Localization) の信号処理を実装できます。角度推定アルゴリズムは、時間

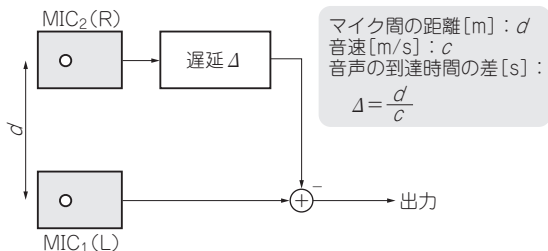


図2 1次差動マイク・アレイ

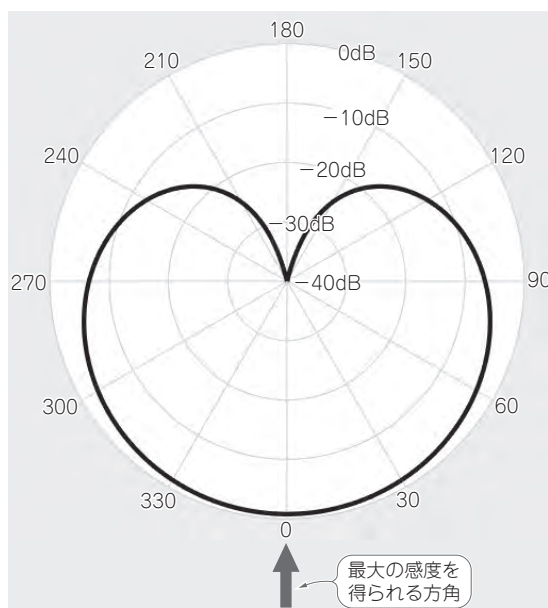


図3 カーディオイド・ビーム・パターン
この指向性パターンはシミュレーションにて計算した

領域の相互相関や周波数領域の一般化相互相関など3種類から選択でき、マイクの個数と配置に応じて180°または360°の範囲で角度を推定できます。

● 音源位置の角度推定

図1に2つのマイクを使った場合の角度推定について説明しましたが、図4のように2つのマイクを配置した場合は、180° (± 90°) の範囲でしか角度を推定できません。

図5のように4つのマイクを配置した場合には、対角に配置されるMIC₁とMIC₄、MIC₂とMIC₃でそれぞれ180°の範囲をカバーし、結果を総合することで360°の範囲で推定することができます。

● 3種類の角度推定アルゴリズム

AcousticSL ライブラリには、表1に示す3種類の角度推定アルゴリズムが用意されています。これらは本

注1 : <https://www.st.com/ja/embedded-software/x-cube-memsmic1.html>

第1章

マイコン・ビギナ向け開発環境 Arduino IDEでLチカ

プログラムを作って動かしてみよう！

白阪 一郎 Ichiro Shirasaka

ここでは、IoTプログラミング学習ボード「ARM-First」を使ってLEDをチカチカ点滅(Lチカ)させてみます(写真1)。開発環境の構築にあたり、Arduino IDE、ボード・ライブラリ、フラッシュ書き込みツールのインストール方法や、ツールの設定について説明します。本ボードへのプログラムの書き込みは、STM32F405に内蔵されているDFU機能でUSBから行うことができます。パソコンと本ボードがあればすぐに実験を始めることができます。

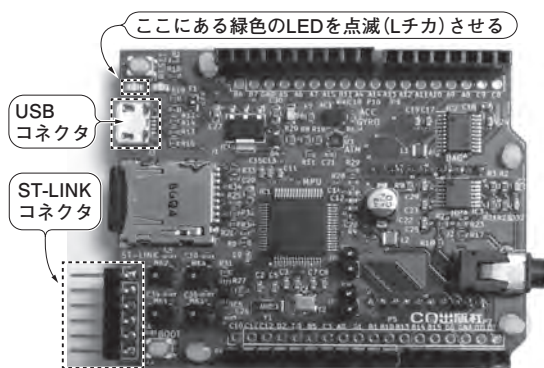


写真1 IoTプログラミング学習ボード「ARM-First」を使って、LEDをチカチカ点滅(Lチカ)させてみる
本ボードにはプログラムを書き込むためのUSBシリアル変換回路が実装済みであり、パソコンとIoTプログラミング学習ボードがあればすぐにプログラミングが始められる

開発環境のセットアップ

● Arduino IDEのインストール

Arduinoの統合開発環境(IDE)は、いろいろなハードウェアやOS上で動くクロス・プラットフォームのJavaアプリケーションです。プログラムを作成するエディタ、コンパイラ、マイコン・ボードへのプログラムの書き込み機能をもっています。

開発言語はC言語をベースに、String型などの追加や、オブジェクト指向の機能を使った組み込み向けのライブラリによるプログラム作成に最適化されています。

図1に示すのはArduino IDEの画面例です。初めてプログラミングを始めるビギナでも簡単に扱えるように、操作箇所が少ない非常にシンプルな構成になっています。Arduino IDEは次のURLからダウンロードで

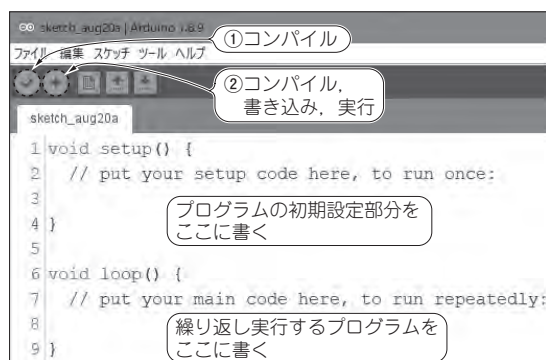


図1 Arduino IDEの画面は、プログラミングを始めるビギナでも簡単に扱えるように、操作箇所の少ない非常にシンプルな構成になっている

きます。

<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>

● ボード・ライブラリのインストール

インストールした初期状態では、ボード・ライブラリからAVRマイコンのボードしか選べません。そこで、筆者が開発したSTM32用のボード・ライブラリを次のURLからダウンロード([Code]-[Download ZIP])を選択して解凍します。

<https://github.com/alto0126/STM32GENERIC>

解凍すると「STM32GENERIC-master」というフォルダ名のボード・ライブラリが得られます。

図2に示すのは、Arduino IDEの[ファイル]-[環境設定]の画面です。解凍した「STM32GENERIC-master」フォルダは、スケッチブックの保存場所に書かれたフォルダ内の「hardware」の場所に移動させます。「hardware」フォルダがない場合は、フォルダを作成します。

見本

見本