

倒立振子組み立てマニュアル

(CQ出版 トランジスタ技術 2019年7月号 特集企画)

トランジスタ技術 2019年7月号の特集にて紹介した倒立振子の組み立てキットをCQ出版社より販売しています。本書は、その組み立てマニュアルです。プリント基板の組み立て、メカ部の組み立て、注意点などを説明します。

プリント基板組み立て

プリント基板に電子部品をはんだ付けします。基板上には部品番号が印刷されていないので、p.6およびp.7の実装図(図4)、回路図(図5)、部品表(表2)を参照してください。

1) 電源のチェック

念のため、電源回路部分(SW, コネクタ(ケーブルを直接半田付けしてもよい)、コネクタ直近の電解コンデンサC1: 470uF)を取り付けて電池をつなぎ、約5Vの電圧が印加されることを確認します

(写真1)。なお、電池は「Ni-MH 二次電池」を使用してください(次ページの「注意点」参照)。

基板上の電源スイッチは、レバーを上倒すとON、下に倒すとOFFになります。

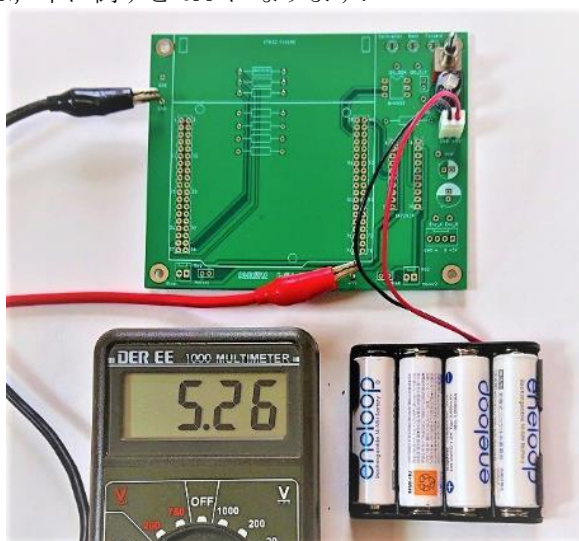


写真1 最初に電源電圧を確認しておく

写真2にしたがって部品を取り付けます。抵抗は8本、電解コンデンサは3個、セラミック・コンデンサは3個です。電解コンデンサは極性に注意してください。なお、“C2”は欠番です

3) ピン・コネクタ, ICソケット

ピン・コネクタおよびICソケットを取り付けます。マイコン・ボード用のピン・コネクタは2×19ピンを2個作ります。4列分余りますが、これは使いません。

4) モータ・ドライバ IC TA7291P, LED

モータ・ドライバ IC および LED を取り付けます。いずれも極性があるので注意してください(写真3)。LED はリードの長い方がプラス、短い方がマイナスです。モータ・ドライバはパッケージの切り込みがある方が上側です。

5) 9軸センサ・モジュール BMX055

先にICソケットを半田付けしておきます。続いて、9軸センサ・モジュール裏面のジャンパを半田でショートします(写真4)。その後、ピンをはんだ付けします。先にピンをICソケットに挿入しておくとして作業が楽になります。取り付け向きは、写真5と合わせるようにしてください。

このセンサの取り付け角度は、倒立振子の姿勢制御に影響します。まずは基板と水平になるように取り付けしておき、後は動作させながら調整してください。

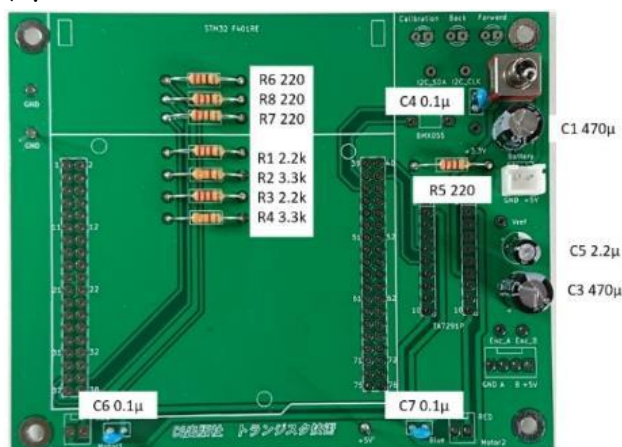


写真2 抵抗, コンデンサの配置

2) 抵抗, コンデンサ

以上で、基板の組み立ては完了です。組み立て後の状態は写真6のようになります。

◆ 注意点 ◆

●電源電圧について

この倒立振子の制御回路は、基本的に「Ni-MH 充電機」を使用するものとして設計しています。Ni-MH 充電機の実出力電圧はおよそ 1.2 V です。4 本直列接続した場合、マイコン・ボードに印加される電圧はおよそ $1.2 \times 4 = 4.8 \text{ V}$ となります。

もしアルカリ電池を使用すると、1 本あたり 1.5 V なので供給電圧は $1.5 \times 4 = 6 \text{ V}$ となります。過剰電圧を印加すると、電子部品を痛める可能性があります。基本的に、アルカリ電池は使えないものと考えてください（ロジック回路側だけに 5 V の三端子レギュレータを挿入する方法も考えられますが、自分で基板の配線パターンを切って加工する必要が出てくるので煩雑です）。

●コンタクト・ピンのカシメ

コネクタ用のコンタクト・ピンをキットに添付しています。ケーブルとの接続にはカシメ治具を使用することを推奨します。もしカシメ治具がない場合は、基板に対してケーブルを直接はんだ付けしてください。

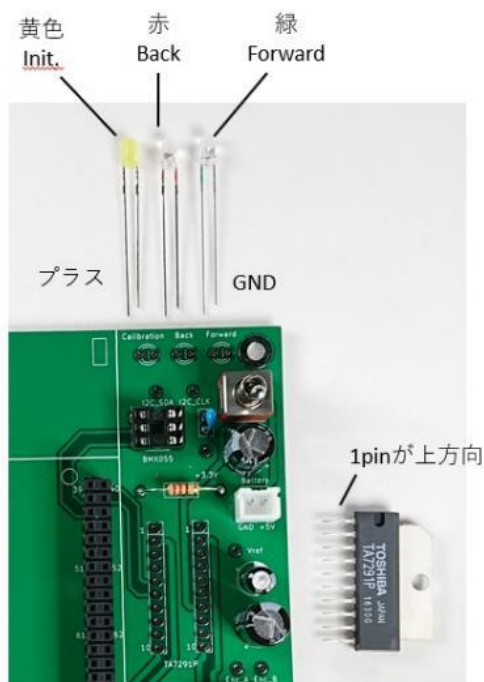


写真3 LEDとモータ・ドライバの取り付け向き

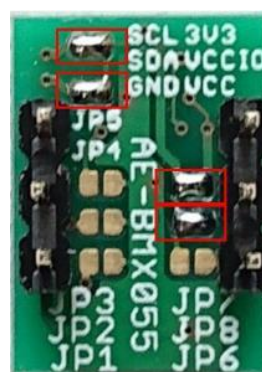


写真4 センサ・モジュールは4か所をはんだ付けしてショートする。図中の赤枠の部分。



写真5 9軸センサ・モジュールの取り付け方向

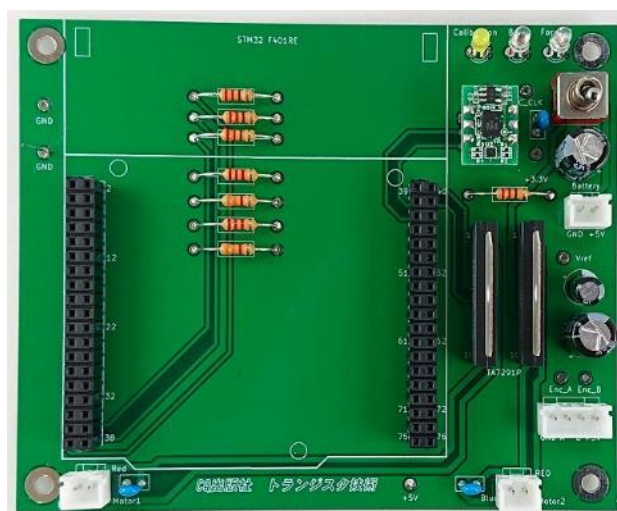


写真6 完成基板

プログラムの書き込み

マイコン・ボード“NUCLEO-F401RE”に、倒立振子の制御プログラムを書き込みます。なお、開発環境は Web 上でソース・コードのコンパイルができる“mbed”を使います。インターネット接続環境が必要です。

PC にマイコン・ボードを接続すると、USB デバイスとして認識されます。Web 上でソース・コードをコンパイルした後は、この USB デバイス（USB メモリ扱い）にプログラムを保存する流れとなります。

倒立振子制御プログラムは、トランジスタ技術 2019 年 7 月号の付録 DVD に収録されている”Inverted_Pendulum_Kalman.cpp”を使用します。詳細については本紙を参照してください。

1) ジャンパの確認

念のため、NUCLEO-F401RE のジャンパの位置を確認しておきます。「JP1 なし」、「JP5 右側」、「JP6 あり」です（写真 7）。

2) パソコンに接続して mbed を起動する

NUCLEO-F401RE と PC を接続します。ファイル・エクスプローラで内容を確認すると、次のファイルが入っています

DETAILS.TXT
MBED.HTM

ここで“MBED.HTM”をダブルクリックすると、Web ブラウザが立ち上がり図 1 の mbed ログイン画面が表示されます。ここでユーザ名とパスワードを入力してログインします。なお、初めて使用する場合は無料のサイン・アップが必要となります。

ログイン後 NUCLEO-F401RE ボードが認識されると、図 2 の画面が表示されます。右上の「Compiler」をクリックして開発環境へ移動します。

3) コンパイルしてマイコン・ボードへ保存

開発環境画面の上部にある「新規作成」メニューから、新しいプログラムを作成します。テンプレートは適当なものを選んでください。新しくワーク・スペースが作成されたら、

“Inverted_Pendulum_Kalman.cpp”の内容をコピーして、main.cpp に上書きします（図 3）。続いて、画面上部の「コンパイル」をクリックします。正常にコンパイルが完了すると、バイナリ・ファイルの保存ダイアログが出ます。ダウンロードして、マイコン・ボードへ書き込みます（ドラッグ・アンド・ドロップする）。

なお、トランジスタ技術 2019 年 7 月号の付録 DVD にも、mbed の操作方法が記載されています。ご参考までに。

プログラムを書き込んだら、マイコン・ボードを基板に取り付けます。プログラムを書き換える場合

は、電源スイッチが「切」になっていることをよく確認してから PC と接続するようにしてください。

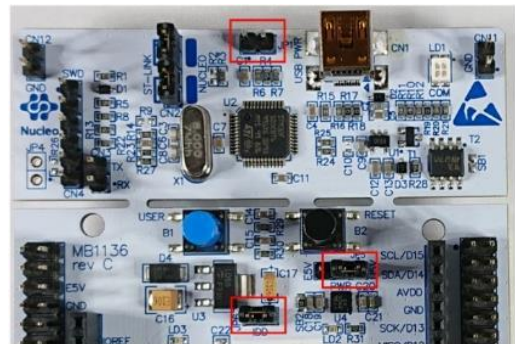


写真 7 マイコン・ボード上のジャンパ位置を確認

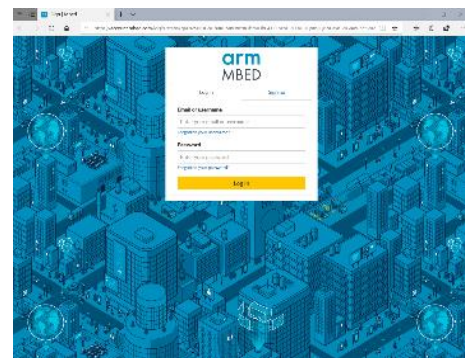


図 1 MBED 環境 ログイン画面



図 2 NUCLEO-F401RE が認識された。画面右上の“Compiler”をクリックする。

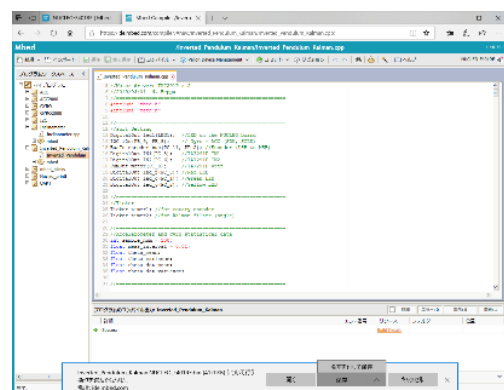


図 3 ソース・コードを貼り付ける。

メカの組み立て

メカ部の組み立てに入ります。ギアボックス、ロータリ・エンコーダ、電池ボックスなどを組み立てて、ユニバーサル・プレートLに取り付けます。各部品の取り付け位置は、表1を参照してください。また、ねじやナットはギアボックスの余りを使用してください。

1) ギアボックス、タイヤの組み立て

「ハイパワーギヤボックス HE」を組み立てます。ギア比は64.8:1を選びます。シャフト穴は中央部のものを使います。シャフトは先端部に穴が開いているものを選び、この穴にパイプ状の部品（ズレ防止）を挿入しておきます。

車輪も組み立ててギアボックスに取り付けます。シャフトを受けるパーツは、ホイールの「浅い側」に取り付けるようにします。

ギアボックスのシャフトは、写真8のように、シャフトがなるべく外寄りになるようにします。また、モータには極性があります。基板と接続する際は、基板のシルク表記（Red, Blue）に合わせてください。

2) ロータリ・エンコーダの取り付け

左側の車輪用のギアボックスとロータリ・エンコーダを、カップリングで連結します。カップリングのギア側にはタップが切ってあるので、ねじ込んで取り付けます。エンコーダ側は写真9のようにイモネジで固定します。イモネジはギアボックスのキットに入っている予備のものを使ってください。ロータリ・エンコーダのシャフトはプラスチック製なので、軽く締める程度にしてください。

ロータリ・エンコーダは固定せずに、クッションを使って簡易的に固定します。クッションは写真10のように3cm程度の長さに切断（2等分）したものを2枚並べて、シャーシ側に貼り付けます。

「左側ギアボックス → ロータリ・エンコーダ → 右側ギアボックス」の順に取り付けると作業が楽です。

ロータリ・エンコーダのケーブルは次の様になっています。基板のシルクに合わせて接続します（コネクタを使用しても良いし、直接ケーブルを基板に半田付けしても良い）。

+5V	—	赤
B 相	—	緑
A 相	—	白
GND	—	黒

3) 電池ボックスの取り付け

キット付属の電池ボックスのねじ穴位置は、かなり側面に寄っています。そのため、ナベ小ねじの取り付けがやや難しくなっています。また、電池とも

やや干渉するようです。適宜、調整してください。ただし、電池ボックスの形状や取り付け位置を元の設計から大きく変更すると倒立振子が立たなくなる可能性があるのでご注意ください。

4) 制御基板の取り付け

マイコン・ボードを取り付けた制御基板を、スペーサで本体に取り付けます。これで組み立て完了です。次ページの写真11に完成状態を示します。

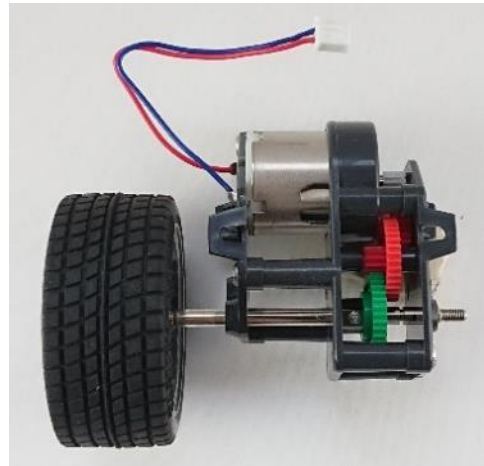


写真8 ギアボックス組み立て

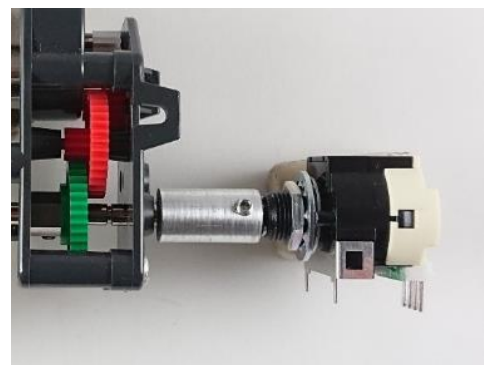


写真9 エンコーダ接続

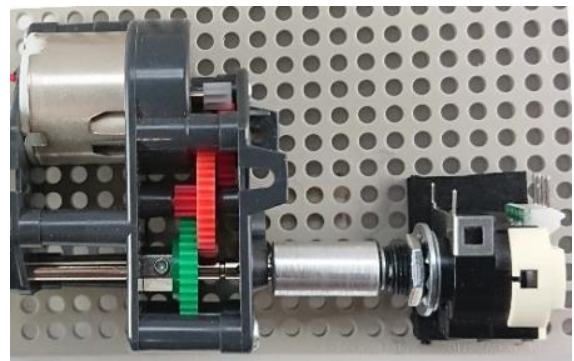


写真10 エンコーダの下にクッションを貼り付ける。3cm程度の長さに切って、2枚並べる。

表 1 ユニバーサル・プレート L に取り付ける各部品の位置

ギアボックス	左右ともに一番外側，下から7番目の穴を使用．
電池ボックス	下から16番目の穴を使用．左右中央に取り付ける． ユニバーサル・プレート側と穴のピッチが合わないので， リーマなどで電池ボックス側の穴径を適宜広げて取り付ける
制御基板	上から2番目の列の穴に合わせて取り付ける． 「ギアボックス付属のナベビス → ユニバーサル・プレート → 六角スペーサ → 基板 → ギアボックス付属のナット」とする．

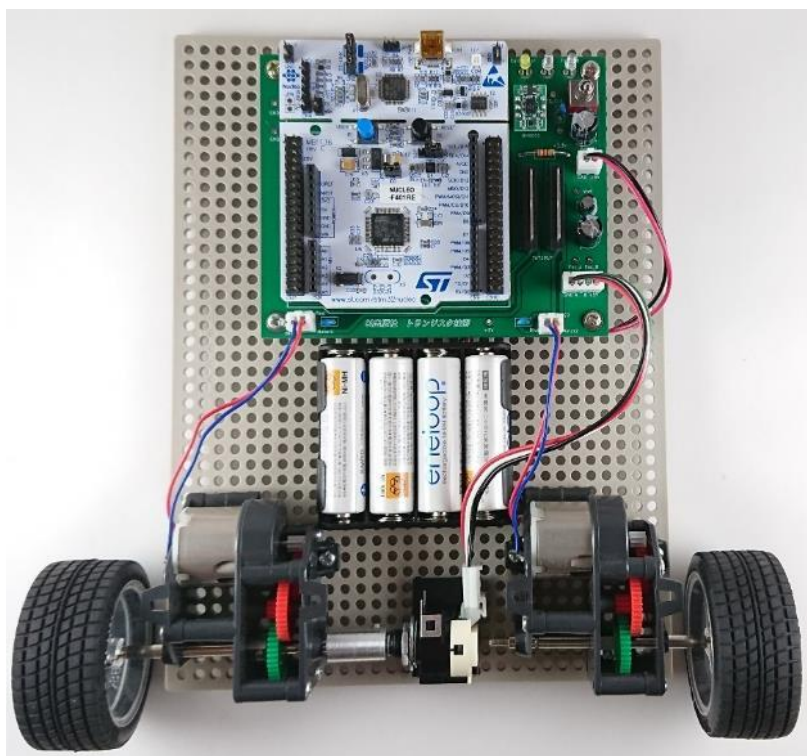


写真 11 完成状態

【動作確認】

倒立振子を直立させた状態で，電源を入れてください．数秒待つと，黄色 LED が点灯します．黄色 LED が点灯している間はセンサのノイズを測定しているので，本体を直立させたまま動かさないようにします．

黄色 LED が消灯した後は，通常動作モードになります．そっと倒立振子から手をはなすと，直立するようにバランスをとります．多少外乱を与えても（手でつつくなどする），安定して立ち続けます．

安定性が悪かったり，安定点付近で動きがカクカクしたりする（発振しているように見える）場合は，センサ・モジュールを IC ソケットに取り付ける角度を少しだけ変えてみてください．倒立振子の挙動が変化します．

なお，トランジスタ技術 2019 年 7 月号の付録 DVD に収録されているプログラムは，このキットとは別のプロトタイプ版をもとにして力学モデルを作成しています．付録のプログラムでもこの倒立振子は立ちますが，改めてモデル化すれば，さらに安定化を図れると考えられます．

表 2 部品表

回路記号	値	型式
C1	470uF	電解コンデンサ
C3	470uF	電解コンデンサ
C4	0.1uF	セラミック・コンデンサ
C5	2.2uF	電解コンデンサ
C6	0.1uF	セラミック・コンデンサ
C7	0.1uF	セラミック・コンデンサ
D1	LED_Yellow	LED 黄色
D2	LED_Green	LED 緑
D3	LED_Red	LED 赤
R1	2.2k	抵抗 1/4W (赤赤赤金)
R2	3.3k	抵抗 1/4W (橙橙赤金)
R3	2.2k	抵抗 1/4W (赤赤赤金)
R4	3.3k	抵抗 1/4W (橙橙赤金)
R5	220	抵抗 1/4W (赤赤茶金)
R6	220	抵抗 1/4W (赤赤茶金)
R7	220	抵抗 1/4W (赤赤茶金)
R8	220	抵抗 1/4W (赤赤茶金)
SW1	SW_SPDTx2	基板実装電源スイッチ 2 回路
U1	BMX055	9 軸センサ・モジュール
U2	F401RE	マイコン・ボード NUCLEO-F401RE
U3	TA7291P	モータ・ドライバ IC
U4	TA7291P	モータ・ドライバ IC

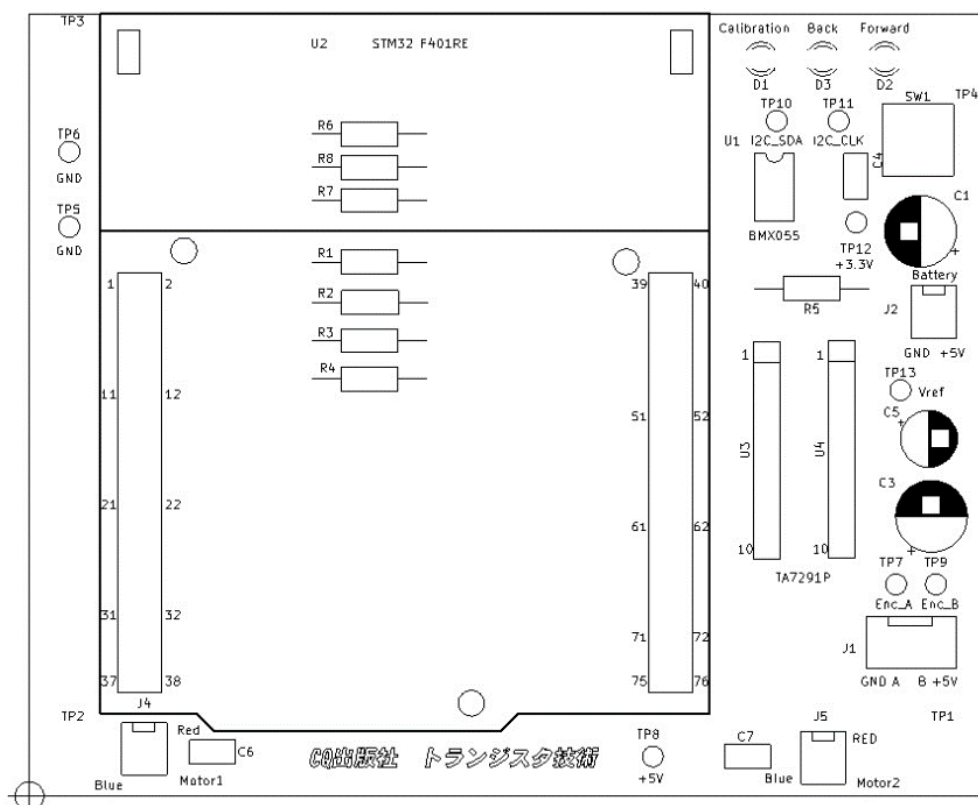


図 4 実装図

