

- はじめに
- **LEGO 倒立振子の製作**
- PID 制御の学習
- モデリングの学習
- 現代制御の学習
- アドバンスト制御の学習
- まとめ

LEGO 倒立振子の製作

- ▶ **LEGO 部品で本体を作ってみよう！**
- ▶ 汎用のモータやセンサを使うには…
- ▶ モータと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ センサと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ マイコン部の配線をしよう！
- ▶ MATLAB/Simulink で MinSegMega (Arduino) を動かしてみよう！

本体：LEGO 部品

購入先

純正の LEGO 部品 (バラ売り)

<https://brickers.jp/>

The screenshot shows the homepage of the Brickers! website. At the top left is the Brickers! logo with the tagline "レゴパーツ・ミニフィグパーツの
バラ売り
通販専門店といえはブリッカーズ！". To the right is a search bar with a magnifying glass icon, followed by links for "ログイン", "会員登録", and "お気に入り". A shopping cart icon with a '0' indicates no items in the cart. Below the header are navigation links: "カテゴリーから探す", "色から探す", "パーツの探し方", "お支払い方法・送料", "よくある質問", and "お問い合わせ". The main banner features a large pile of various LEGO parts and minifigures, with the text "毎日商品を入荷！ブリッカーズはパーツの品揃え日本一！" overlaid. The Brickers! logo is prominently displayed in the center of the banner.



本体：LEGO 部品

購入先

LEGO 互換部品

GonLei
Technic MOC Parts

<https://ja.aliexpress.com/store/900254144>



レンガ造りのビルディングブロック,特別な光線39369ベースフレーム,教育用ハイ

¥ 312

¥ 1,129

注文(37)



レンガ造りのビルディングブロック,DIYおもちゃ,1x4,オーブンセンタ,厚いバー

¥ 424

¥ 719

注文(2)



50-100ピース/ロットハイテクmocバーフ
5×...

¥ 2,364

¥ 4,007

注文(19)



5ピース/ロット技術ビーム1×9厚い交互に穴オーブンセンタ,厚い部品moc...

¥ 560

¥ 949

注文(6)



本体：LEGO 部品

The screenshot displays the LEGO Studio 2.0 software interface. At the top left, there's a logo featuring four colored circles (blue, green, red, yellow) inside a hexagonal frame, with the text "WIN/Mac レゴ(LEGO)デザインソフト STUDIO 2.0". The main workspace shows a 3D model of a mechanical structure built from LEGO Technic parts, specifically a steering assembly. The interface includes various toolbars at the top (Snap, Grid, Render, Stability, Instruction, Mosaic) and a color palette on the right. A large text overlay "フリーの LEGO 用 CAD" is centered over the model. On the left, there's a search bar and a parts library panel showing results for "Technic, Linker (1 results)" and "Technic, Steering (1)". The library panel also lists part number 92911 and includes a thumbnail of a steering ball. The bottom left corner of the workspace shows "146 total parts". The right side of the interface features a "STEP LIST" panel listing the assembly steps, starting with Step 4 and Step 5.

WIN/Mac レゴ(LEGO)デザインソフト
STUDIO 2.0

フリーの LEGO 用 CAD

Technic, Linker (1 results)

92911

Technic, Steering (1)

Technic, Stee...

146 total parts

Snap Grid Render Stability Instruction Mosaic

SIGN IN

COLOR PALETTE

White

Favorite Colors

Content Colors

STEP LIST

Main Model

Search... Step view

Technic Ball Steel 18...

Step 4

Technic, Pin with Frict...

Step 5

Technic Ball Steel 18...

Step 6

Technic, Pin with Frict...

Step 7

Technic Ball Steel 18...

Step 8

Technic, Pin with Frict...

Step 9

Technic Ball Steel 18...

Step 10

Technic, Pin with Frict...

本体：LEGO 部品



WIN/Mac レゴ(LEGO)デザインソフト
STUDIO 2.0

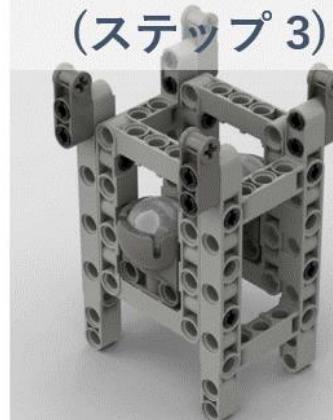
で作成した**組立図**を
GitHub で公開

回転
型

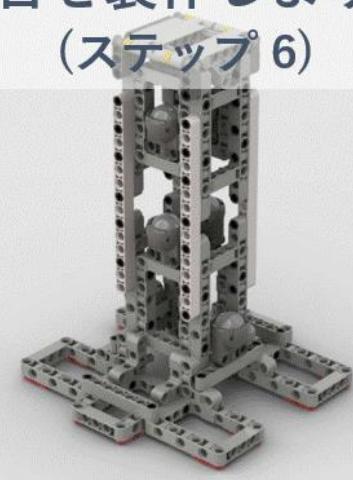
土台を製作しよう！
(ステップ 1)



土台を製作しよう！
(ステップ 3)



土台を製作しよう！
(ステップ 6)

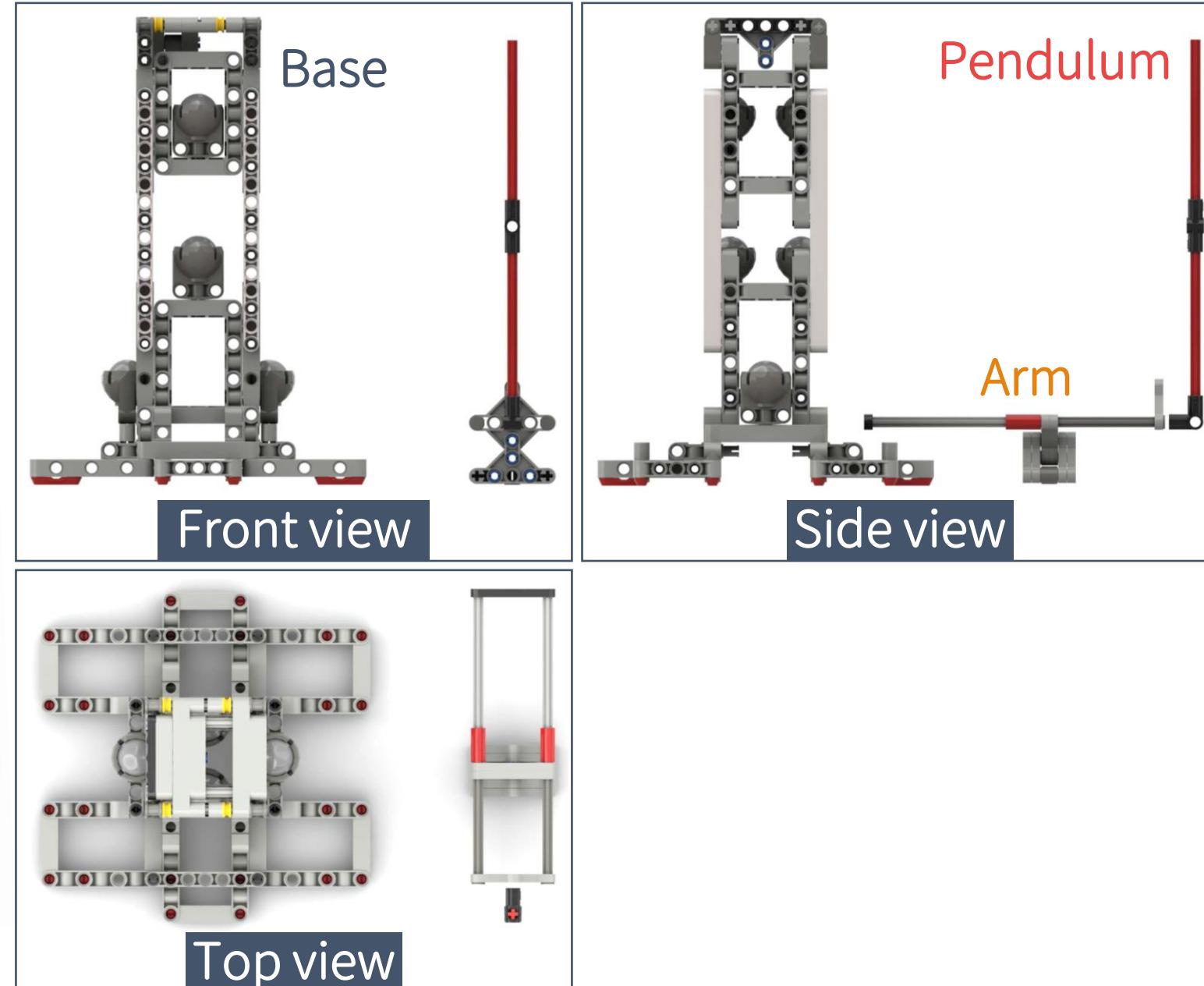


アームを製作しよう！



本体：LEGO 部品

回転
型



本体：LEGO 部品

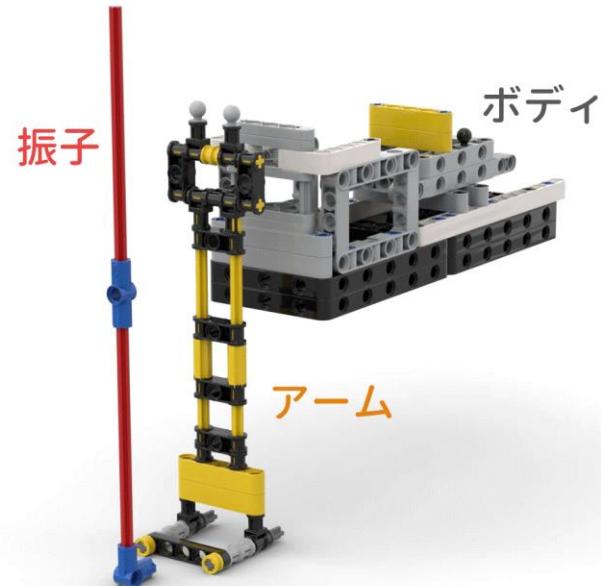


WIN/Mac レゴ(LEGO)デザインソフト
STUDIO 2.0

で作成した**組立図**を
GitHub で公開

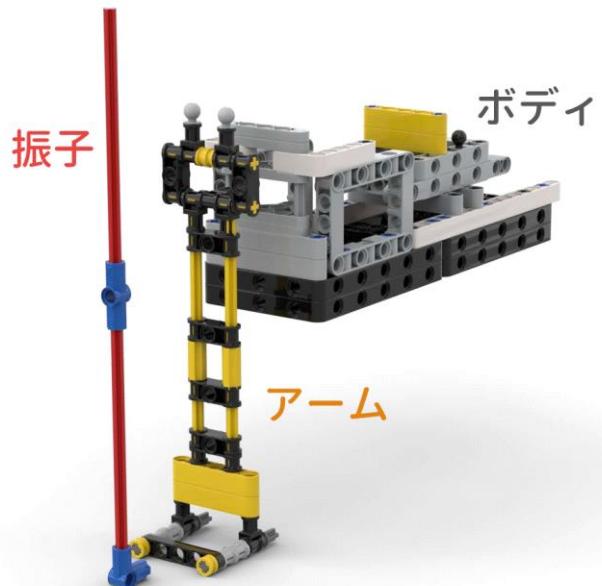


ボディの組み立て

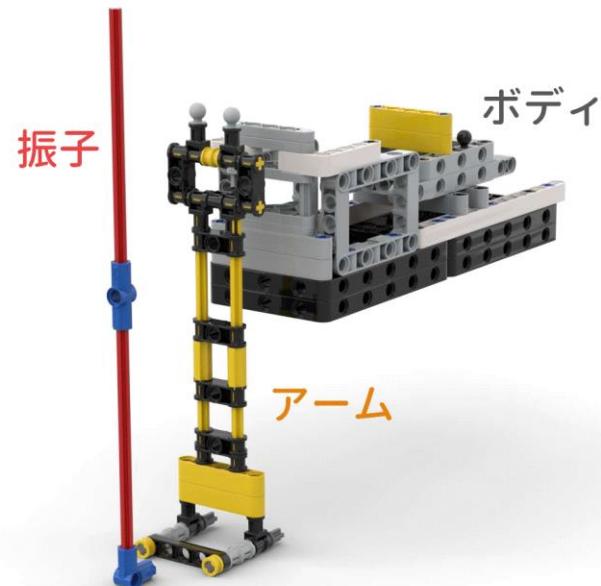


アーム型

アームの組み立て

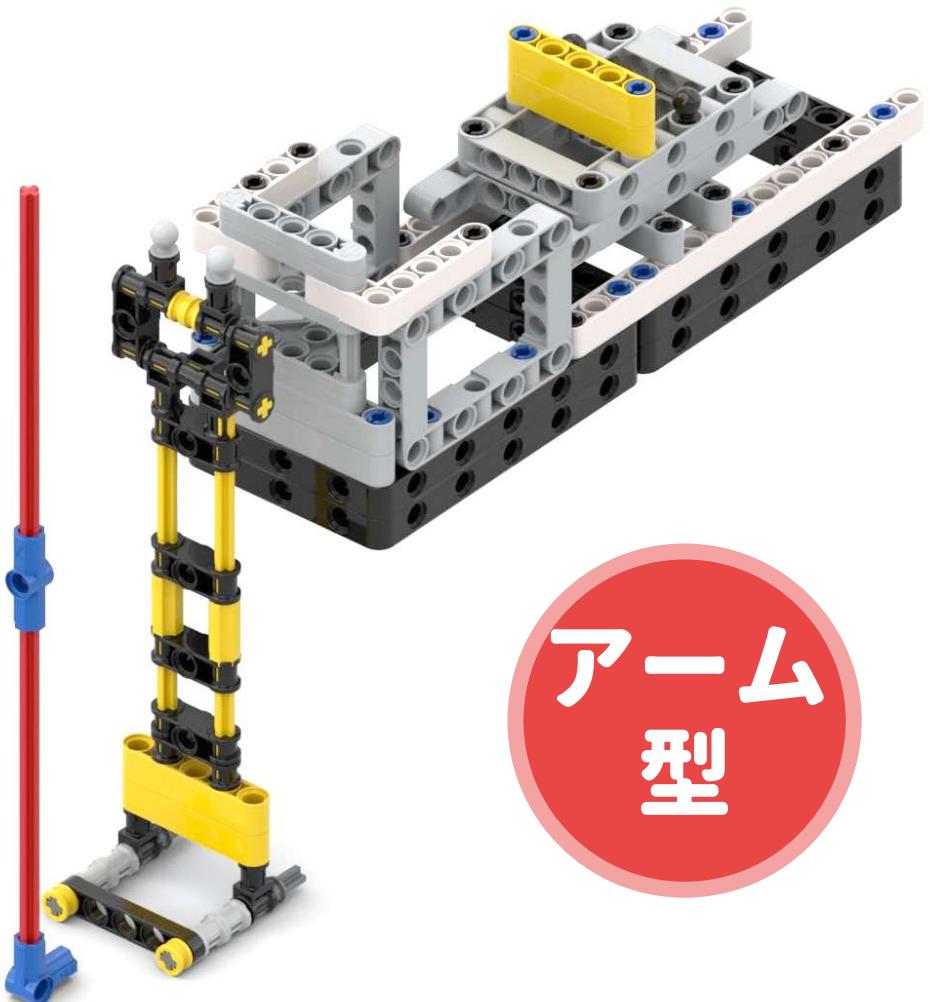


振子の組み立て

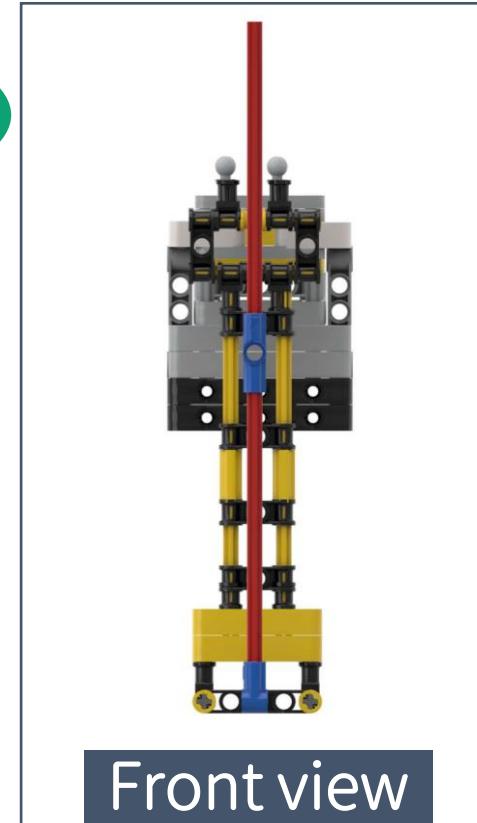


本体：LEGO 部品

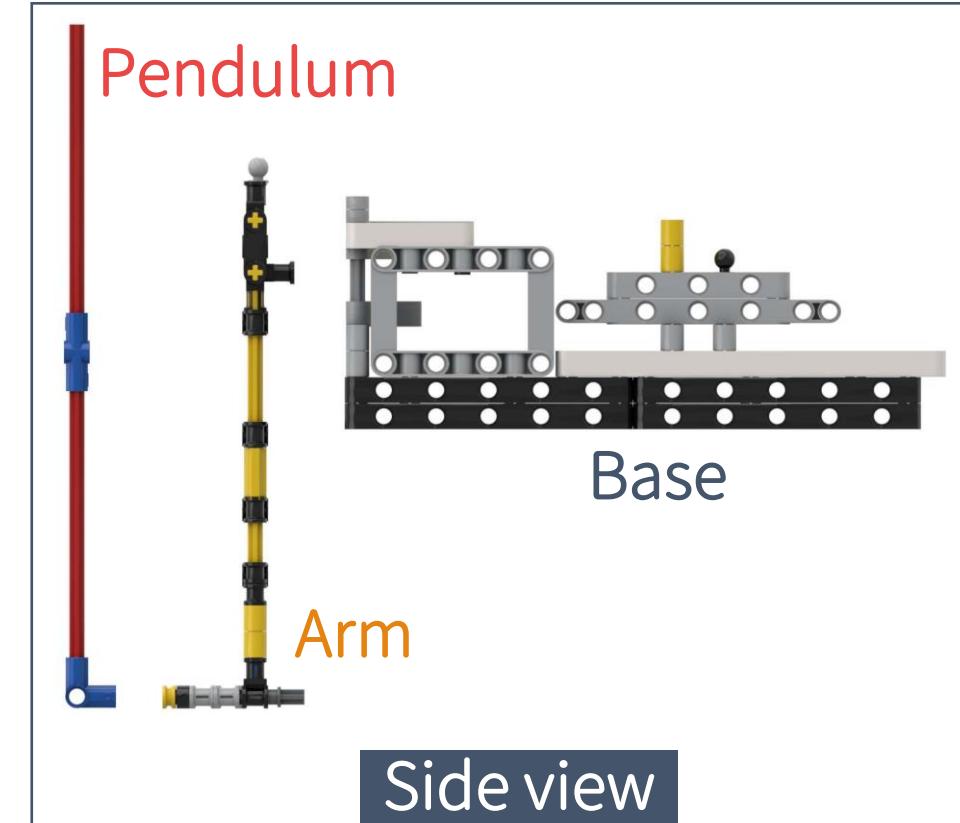
2,000 円程度



アーム
型

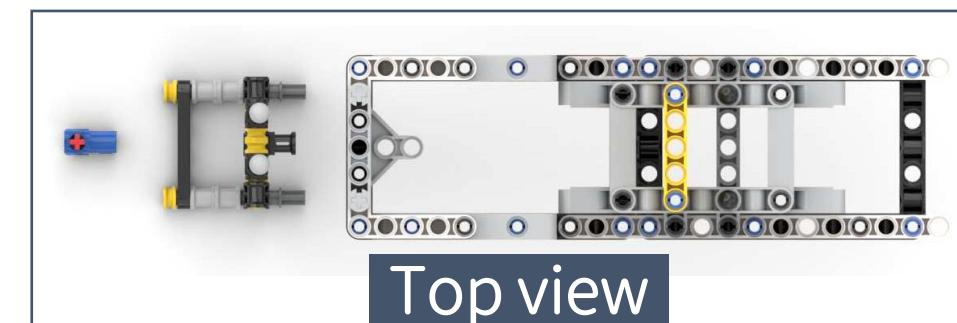


Front view



Arm

Side view



Top view

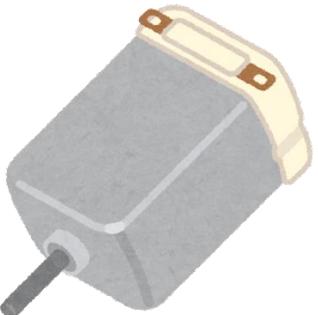
Pendulum

Base

LEGO 倒立振子の製作

- ▶ LEGO 部品で本体を作つてみよう！
- ▶ **汎用のモータやセンサを使うには…**
- ▶ モータと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ センサと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ マイコン部の配線をしよう！
- ▶ MATLAB/Simulink で MinSegMega (Arduino) を動かしてみよう！

- 軸アダプタを介して **LEGO 部品**と結合できる！



汎用モータ



軸アダプタ

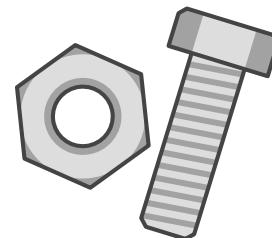


LEGO 部品

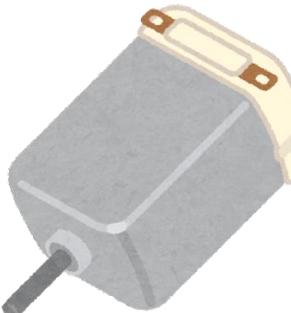
- **LEGO 部品**にネジ類で簡単に固定できる！



LEGO 部品



ネジ類



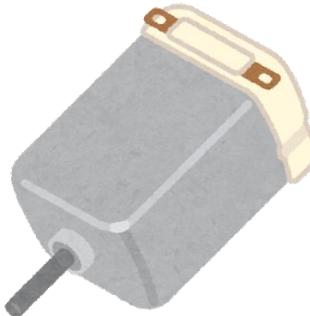
汎用モータ

LEGO 倒立振子の製作

- ▶ LEGO 部品で本体を作つてみよう！
- ▶ 汎用のモータやセンサを使うには…
- ▶ **モータと LEGO 部品を結合しよう！**
- ▶ センサと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ マイコン部の配線をしよう！
- ▶ MATLAB/Simulink で MinSegMega (Arduino) を動かしてみよう！

モータと LEGO 部品の結合 …… D カット 3mm 軸アダプタ

- 軸アダプタを介して LEGO 部品と結合できる！



汎用モータ



軸アダプタ



LEGO 部品

いくつかのサードパーティが
D カット 3mm 軸アダプタを販売！

モータと LEGO 部品の結合 D カット 3mm 軸アダプタ

購入先

- **Tenka Inc.**



motor-shaft-adapters

[https://circuitcubes.com/collections/parts/products/
motor-shaft-adapters](https://circuitcubes.com/collections/parts/products/motor-shaft-adapters)

\$0.99
/ 2 個



キレイ



高価

日本での購入先

HopeTrust®

1,399 円
/ 2 個



モータと LEGO 部品の結合 D カット 3mm 軸アダプタ

購入先

- ModelMall Store

<https://ja.aliexpress.com/item/1005004067512810.html>



安い

大量



2,116 円
/ 30 個

モータと LEGO 部品の結合 D カット 3mm 軸アダプタ

購入先

- **PIMORONI**



PIM132: Micro Metal Gearmotor to LEGO® Axle Adaptor

<https://shop.pimoroni.com/products/micro-metal-gearmotor-to-lego-axle-adaptor>



£ 3.90
/ 4 個



日本での購入先

- **MOUSER**

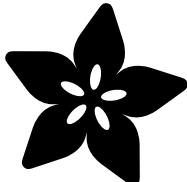
623 円
/ 4 個



モータと LEGO 部品の結合 D カット 3mm 軸アダプタ

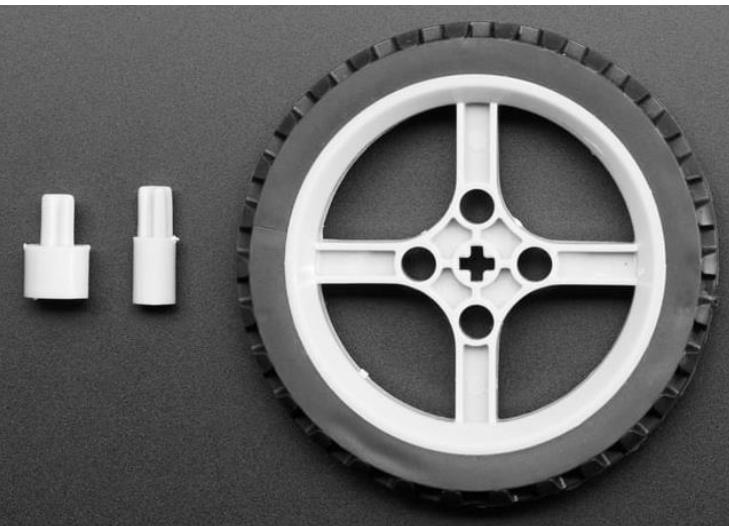
購入先

- Adafruit



4205: BLACK MULTI-HUB WHEEL FOR TT / L

<https://www.adafruit.com/product/4205>



\$1.95
/ 1 個



日本での購入先

- marutsu



449.43 円
/ 1 個

- MOUSER



270 円
/ 1 個

モータと LEGO 部品の結合 D カット 3mm 軸アダプタ

磁気式エンコーダ付ギヤード DC モータ



- **減速比**

- 7 種類

30:1, 50:1,
100:1, 150:1, 210:1,
250:1, 298:1

- **磁気式エンコーダ**

- 分解能 **7PPR**
- **取り付け済**

D カット 3mm 軸

- **減速比**

- 13 種類

5:1, 10:1, 15:1, 30:1, 50:1,
75:1, 100:1, 150:1, 210:1,
250:1, 298:1, 380:1, 1000:1

- **磁気式エンコーダ**

- 分解能 **6PPR**
- 自分でモータに**ハンダ付け**



モータと LEGO 部品の結合 D カット 3mm 軸アダプタ

磁気式エンコーダ付ギヤード DC モータ



1,746 円

回転
型

アーム
型

減速比

30 : 1 (FIT0481)

50 : 1 (FIT0482)

100 : 1 (FIT0483)

150 : 1 (FIT0484)

210 : 1 (FIT0485)

298 : 1 (FIT0486)

380 : 1 (FIT0487)

分解能

7PPR



FIT0481



FIT0482

モータと LEGO 部品の結合 …… D カット 3mm 軸アダプタ



Adafruit



- ホイールとセット（単価が高い）

PIMORONI



- LEGO の軸部品が別途必要

ModelMall Store

- 安い、大量購入向け

Tenka Inc.



- キレイな仕上げ、日本での購入は高価

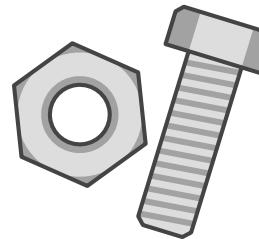


モータと LEGO 部品の結合

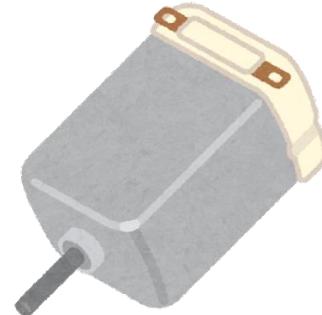
- LEGO 部品にネジ類で簡単に固定できる！



LEGO 部品



ネジ類



汎用モータ

モータと LEGO 部品の結合

モータブラケット

Pololu
Robotics & Electronics



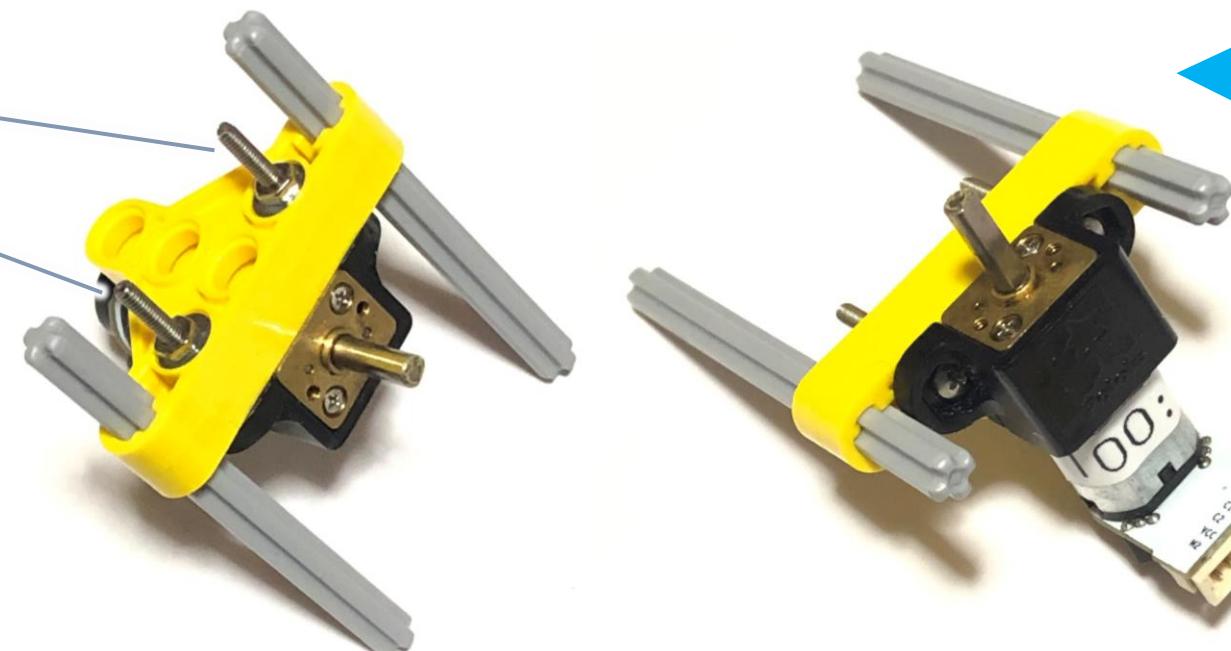
979 円

989: Pololu Micro Metal Gearmotor
Bracket Pair - Black

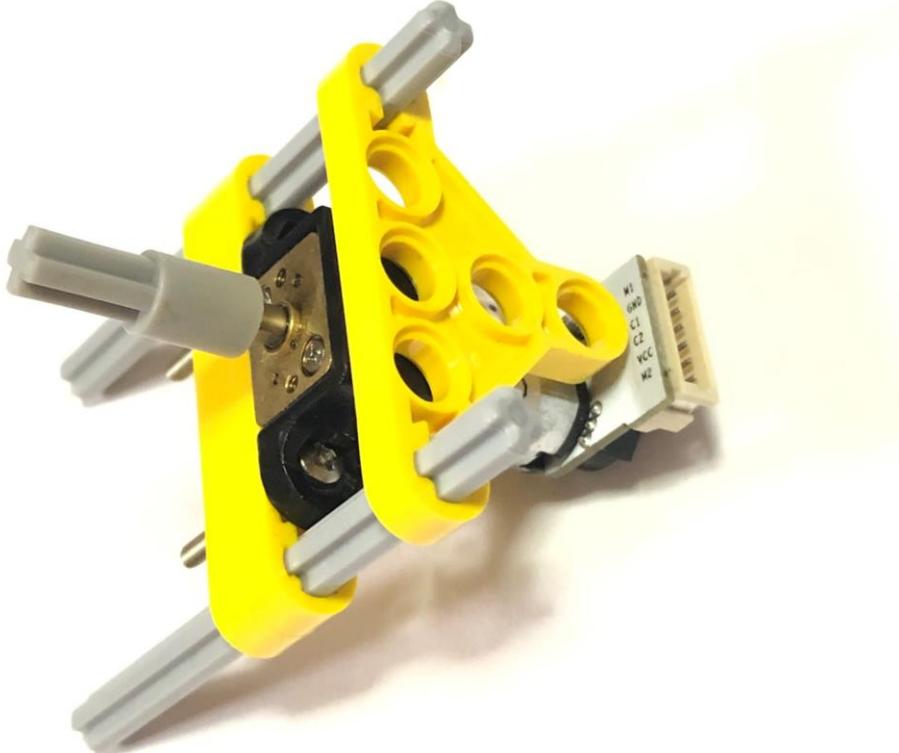


M2 ネジで
固定可能

バインド子ネジ
: M2×18
ワッシャー : M2
六角ナット : M2



モータと LEGO 部品の結合



できた。



LEGO 倒立振子の製作

- ▶ LEGO 部品で本体を作つてみよう！
- ▶ 汎用のモータやセンサを使うには…
- ▶ モータと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ **センサと LEGO 部品を結合しよう！**
- ▶ マイコン部の配線をしよう！
- ▶ MATLAB/Simulink で MinSegMega (Arduino) を動かしてみよう！

センサと LEGO 部品の結合

光学式エンコーダ

Autonics

分解能
360PPR

2mm 軸



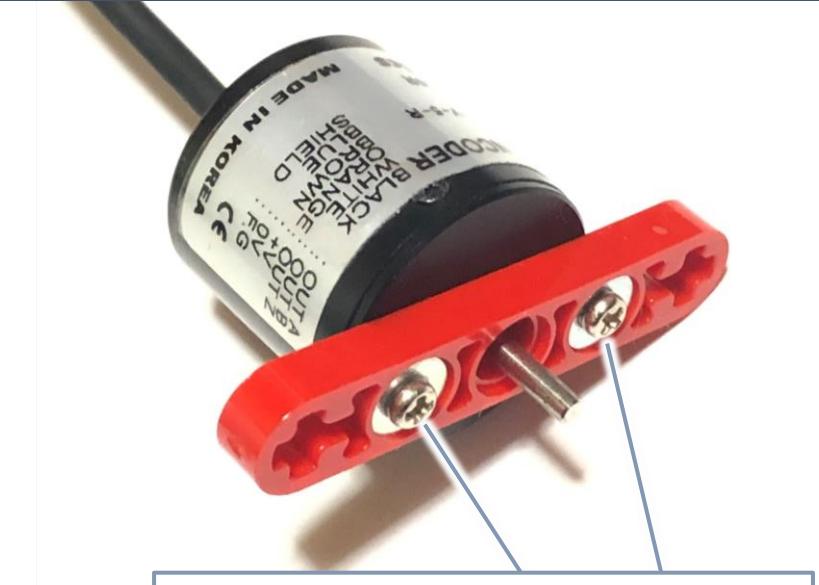
14,725
円

E20S2-360-3-V-5-R (背面引出型)
E20S2-360-3-V-5-S (側面引出型)



Autonics (背面引出型)

ミスミ (側面引出型)



なべ子ネジ：M2×8
ワッシャー：M2

M2 ネジで
固定可能

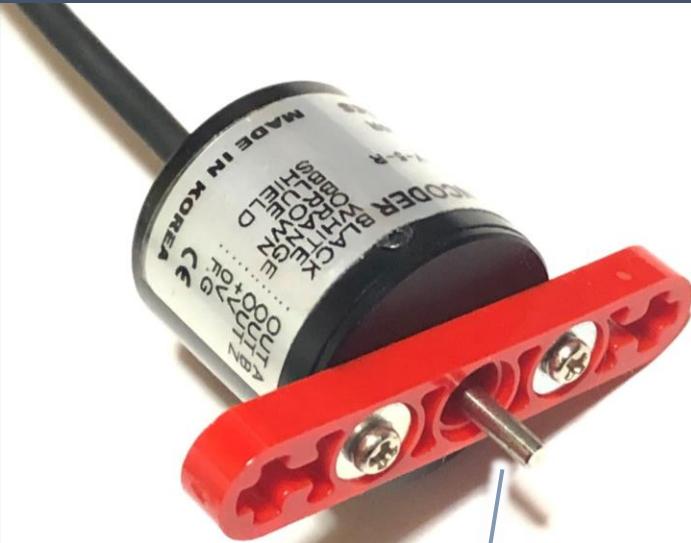
センサと LEGO 部品の結合

ModelMall Store
または Adafruit の
D カット 3mm 軸アダプタ



精密ドライバを
D カットの穴に
挿し込んで
グリグリ回して
丸穴にする！

センサと LEGO 部品の結合



2mm 軸
(D カット加工なし)

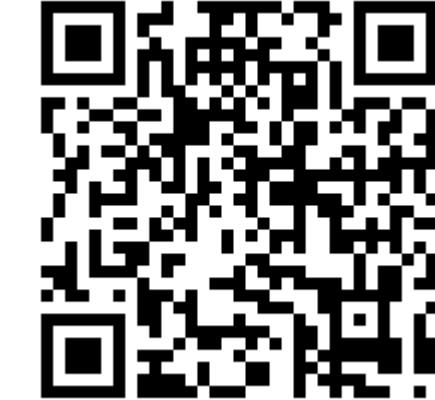
2,190
円



カプリコン・ミニ セット
スクリュータイプ
(2mm–3mm)



3mm × 15mm シャフト



異径インラインカラー
(2mm–3mm)

770 円

センサと LEGO 部品の結合



できた。

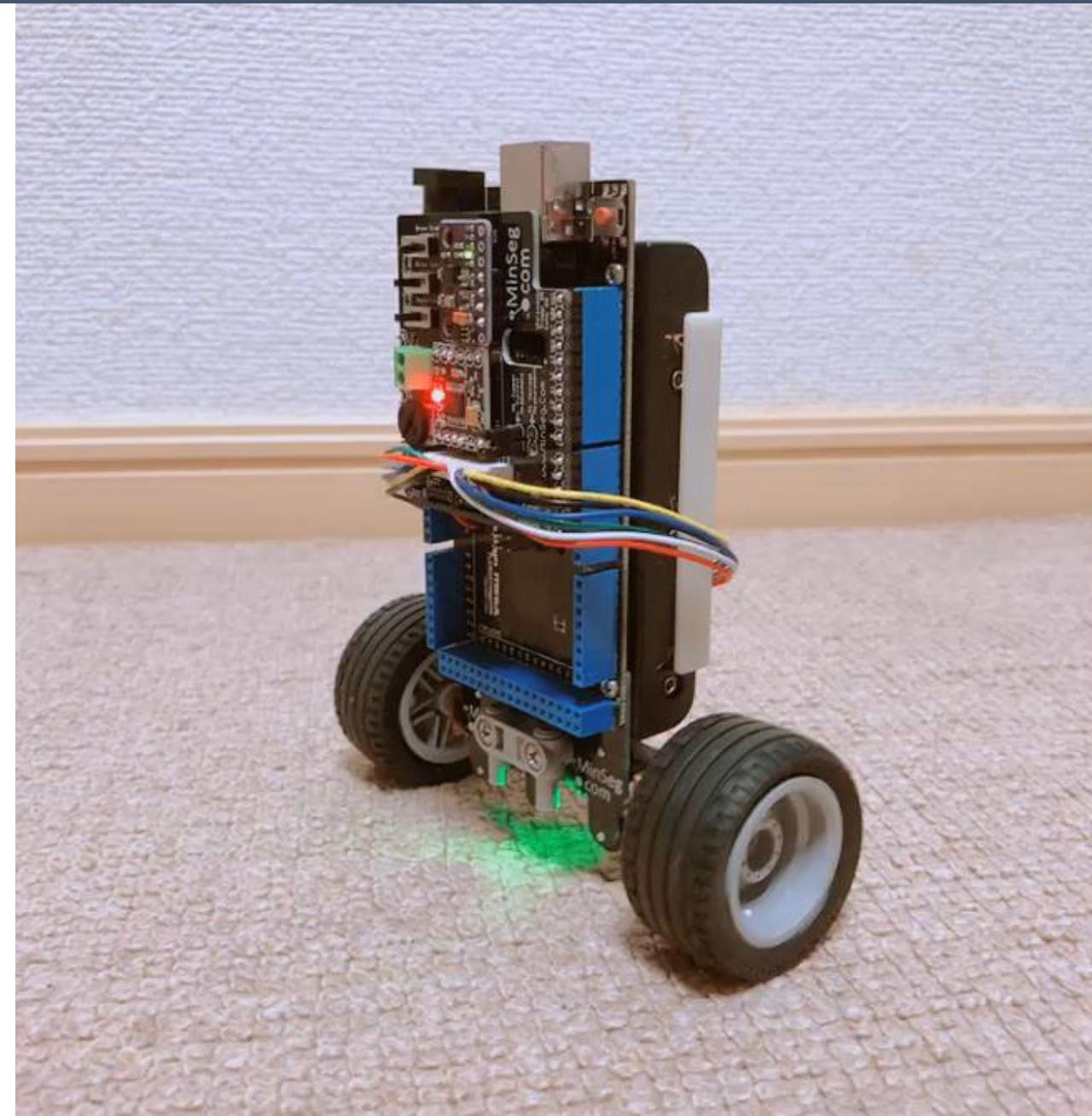
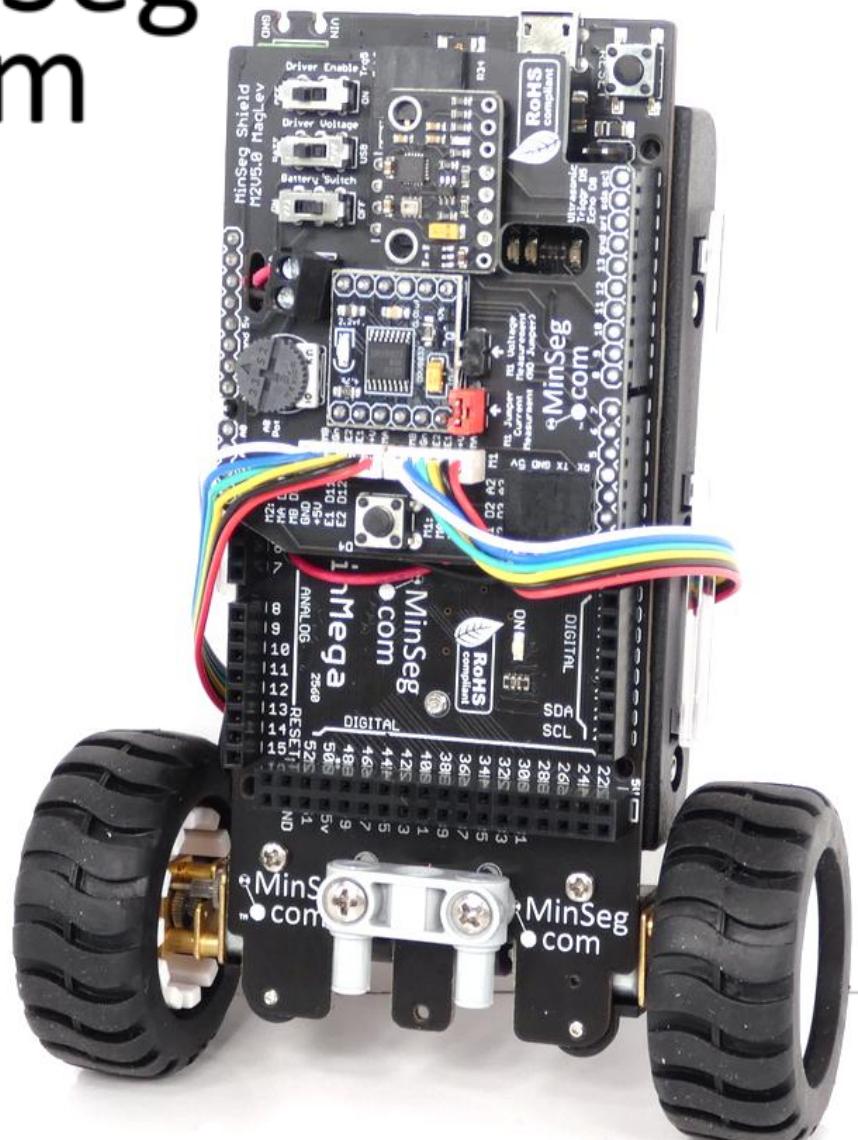


LEGO 倒立振子の製作

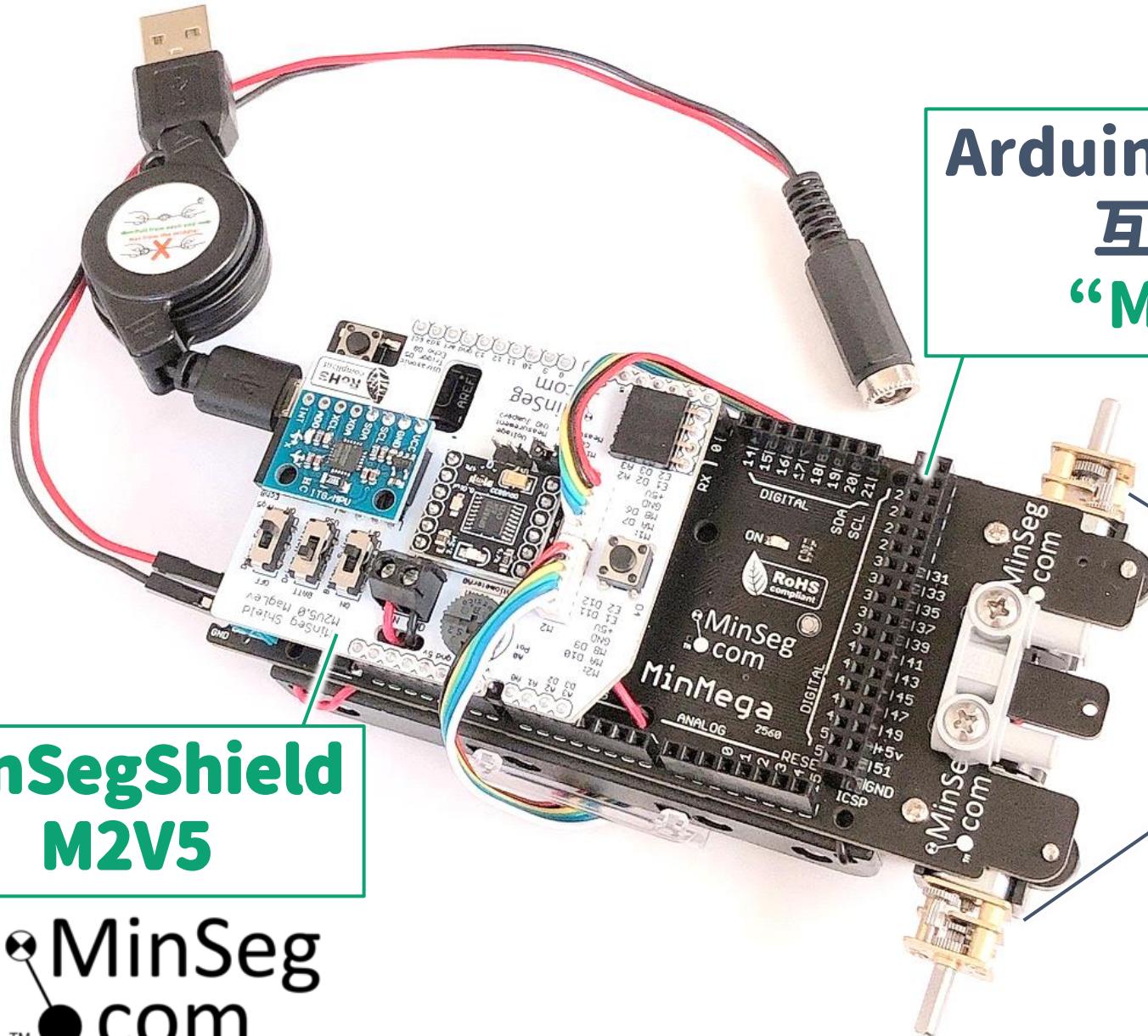
- ▶ LEGO 部品で本体を作つてみよう！
- ▶ 汎用のモータやセンサを使うには…
- ▶ モータと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ センサと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ **マイコン部の配線をしよう！**
- ▶ MATLAB/Simulink で MinSegMega (Arduino) を動かしてみよう！

MinSegShield M2V5 Dual Axis MinSeg Kit

TM
MinSeg
com



マイコン / モータドライバ / センサモジュール



**MinSegShield
M2V5**

TM
MinSeg
com

Arduino Mega 2560
互換ボード
“MinMega”

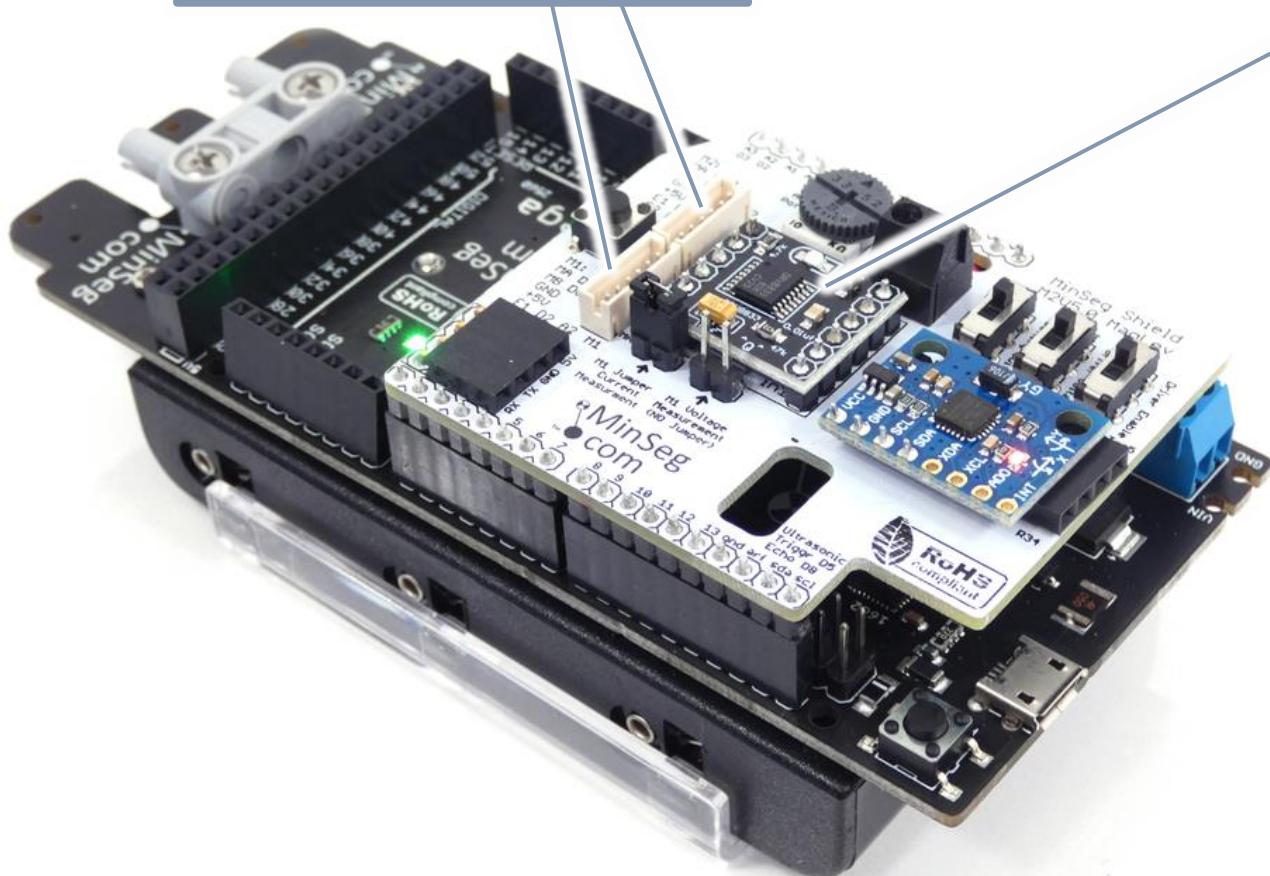
FIT0482
減速比 50:1
分解能 7PPR

TM
MinSeg
com

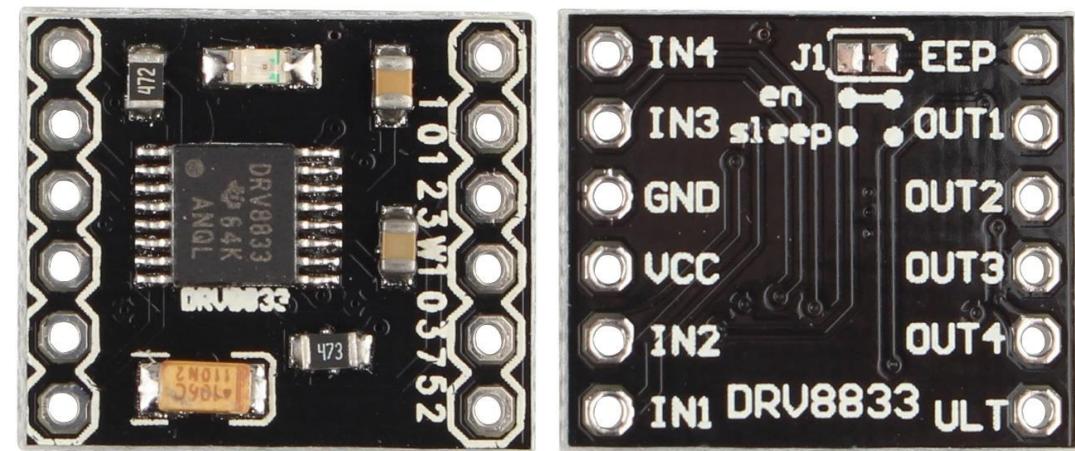


マイコン / モータドライバ / センサモジュール

モータ・
エンコーダ端子
(2チャンネル)



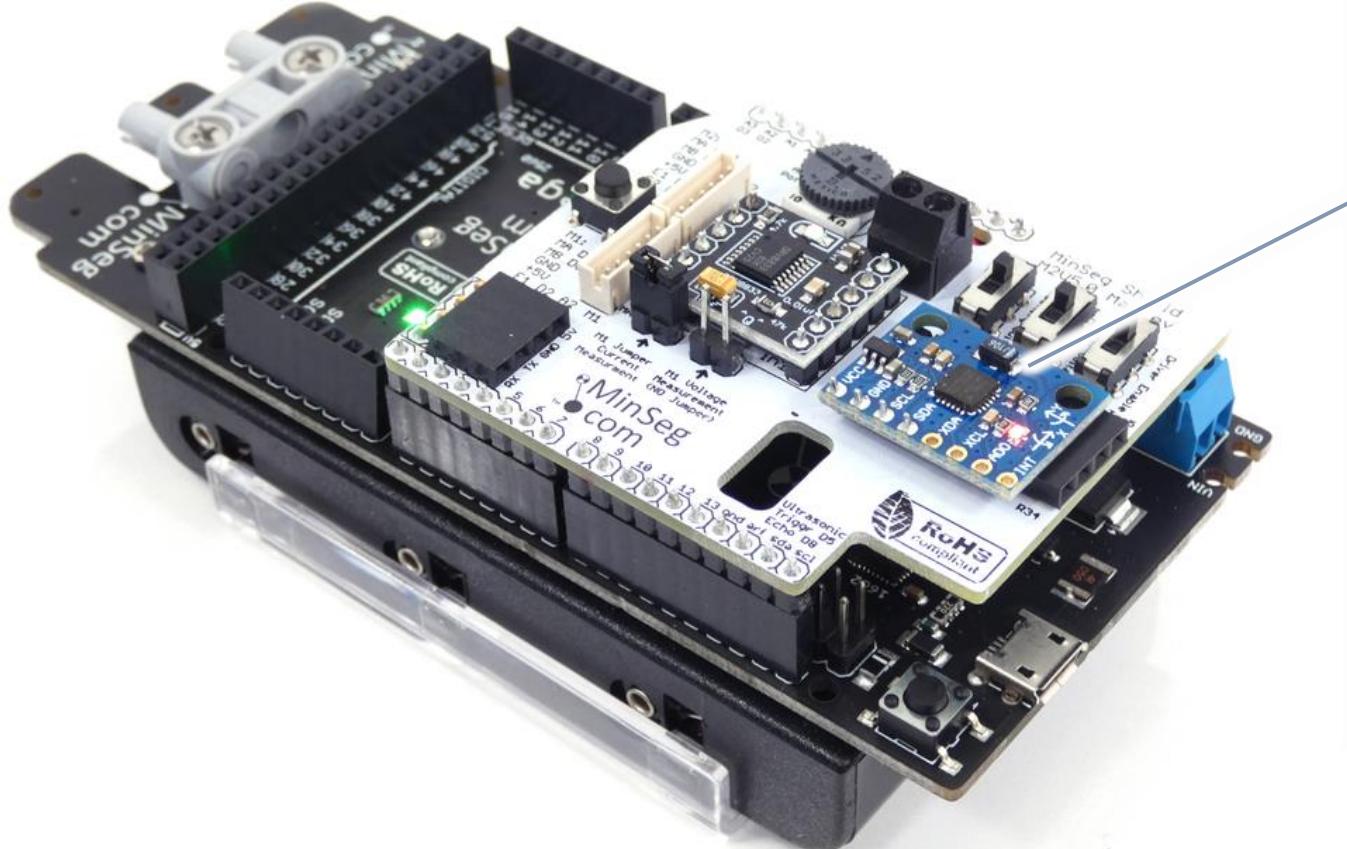
モータドライバ (DRV8833)



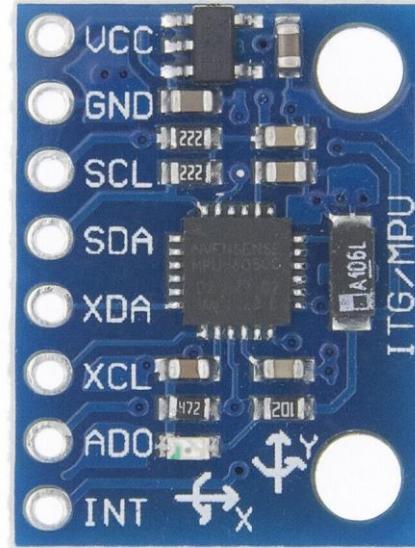
- 2チャンネル
- Hブリッジ回路

マイコン / モータドライバ / センサモジュール

今回は使用しません。



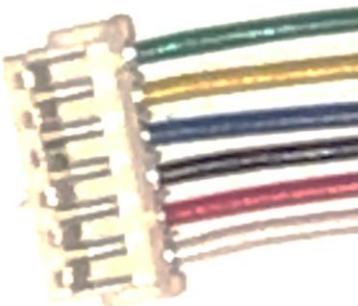
6 軸センサモジュール (MPU6050)



- 3 軸ジャイロセンサ
(角速度センサ)
- 3 軸加速度センサ

モータケーブルの加工

コネクタ付
コード



コネクタ側

緑色 (M+)
黄色 (GND)
青色 (A)
黒色 (B)
赤色 (+5V)
白色 (M-)



コネクタ側

緑色 (M+)
黄色 (GND)
青色 (A)
黒色 (B)
赤色 (+5V)
白色 (M-)

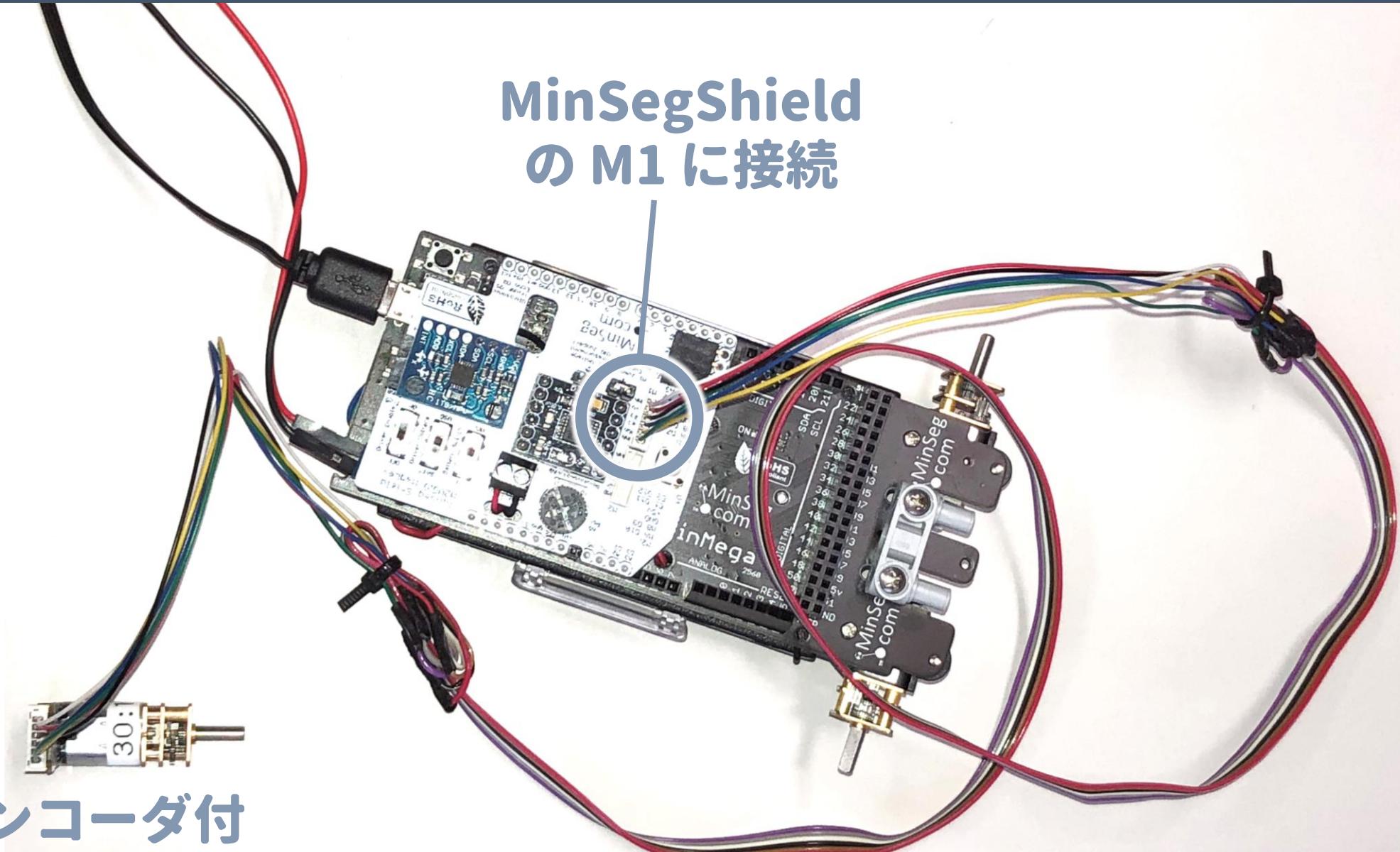
コネクタ付
コード



コネクタのコードが短いので、フラットケーブルを利用して延長します
(今回はモータに付属しているコネクタ付コードは使用していません)

モータケーブルの接続

MinSegShield
の M1 に接続



エンコーダ付
ギヤード DC モータ

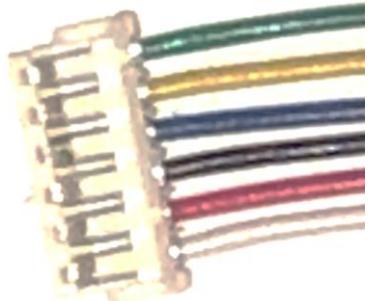
センサケーブルの加工

ワイヤーストリッパーで
断片的（1cmくらいごと）
に外皮部分を剥がす



センサケーブルの加工

コネクタ付
コード



コネクタ側

緑色 (M+)	—	青色 (GND)
黄色 (GND)	—	黒色 (A)
青色 (A)	—	白色 (B)
黒色 (B)	—	茶色 (+5V)
赤色 (+5V)	—	
白色 (M-)	—	

エンコーダ側

ロータリエンコーダ

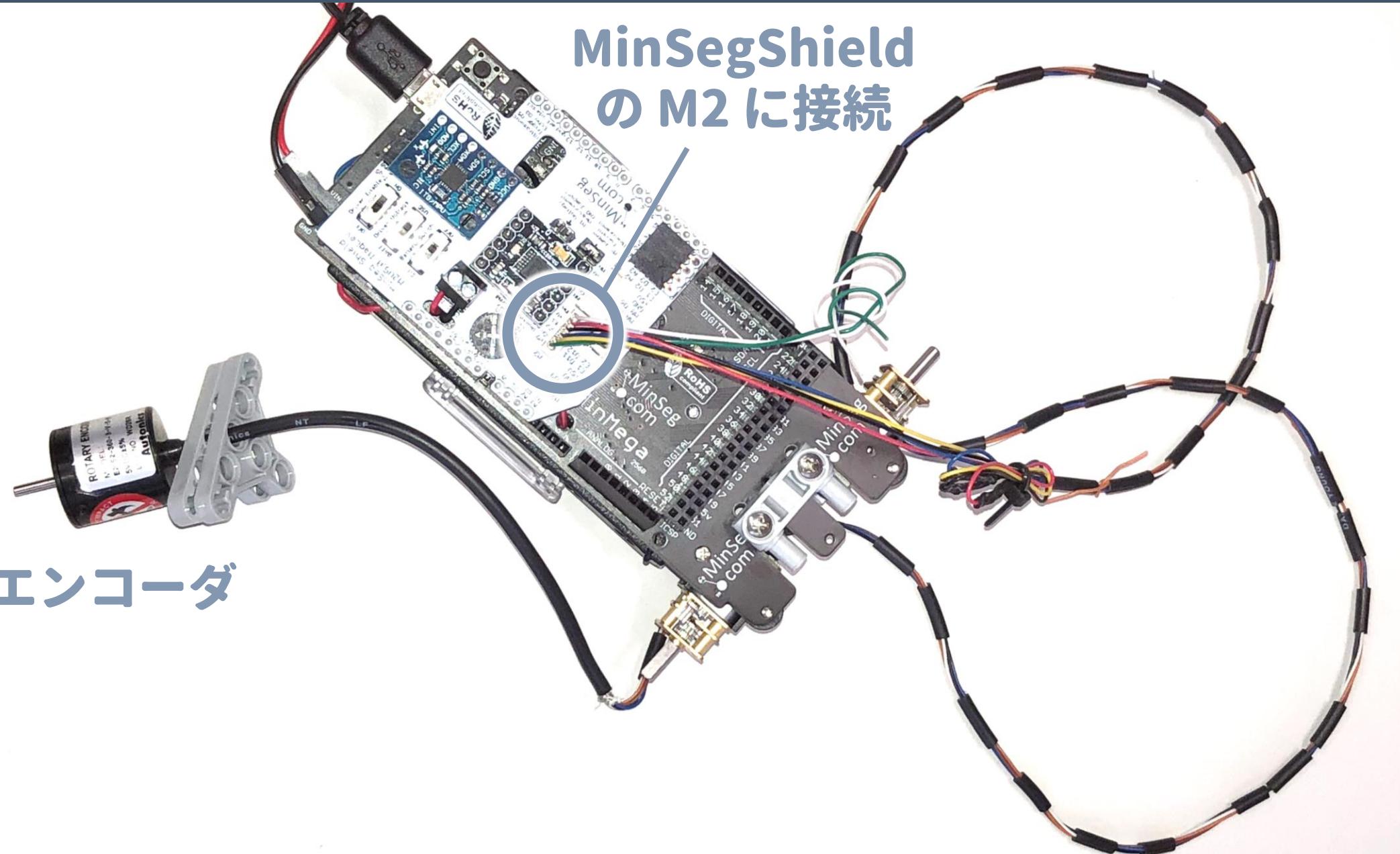


緑色 (M+) と
白色 (M-) は使用しません

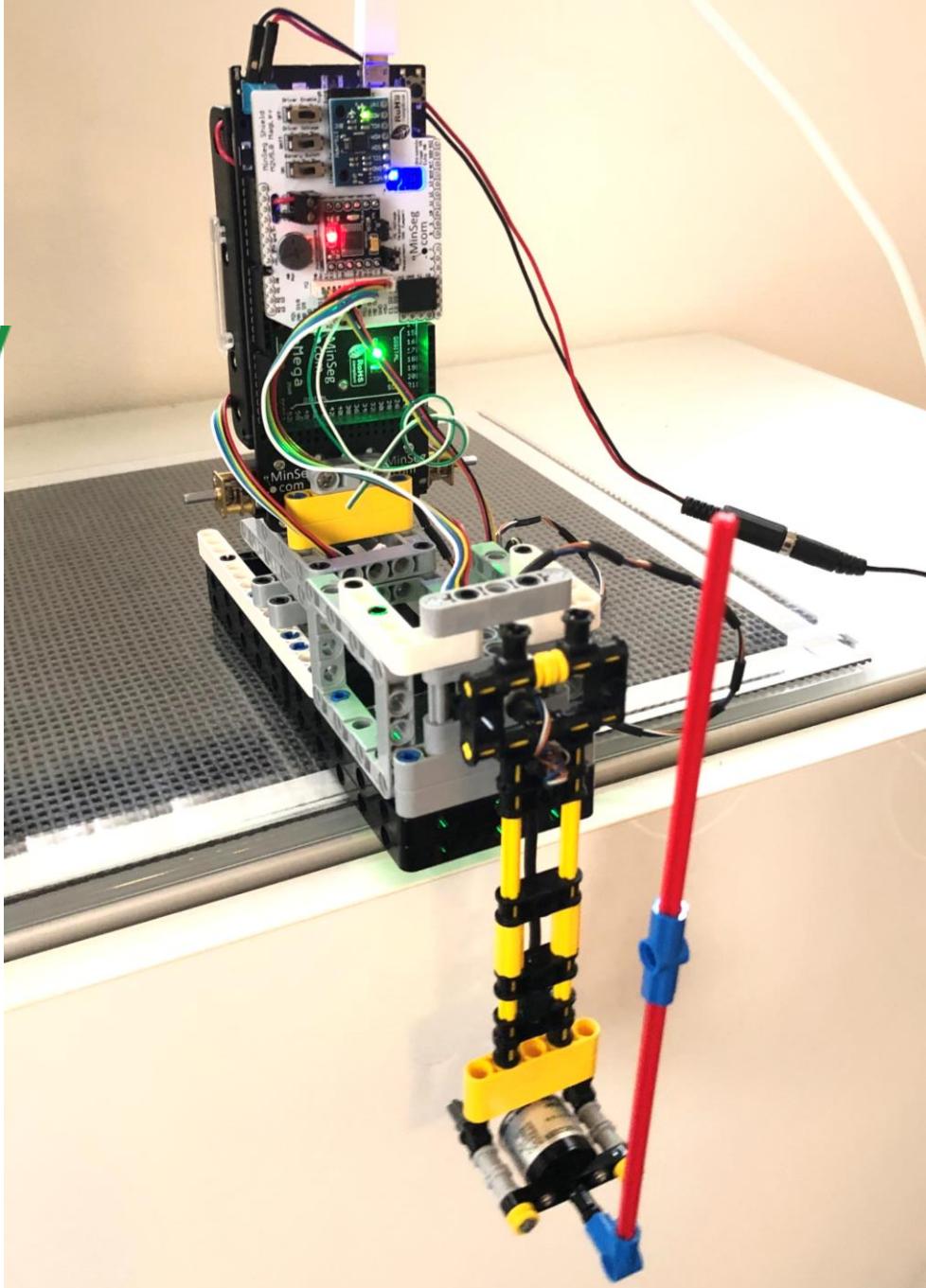
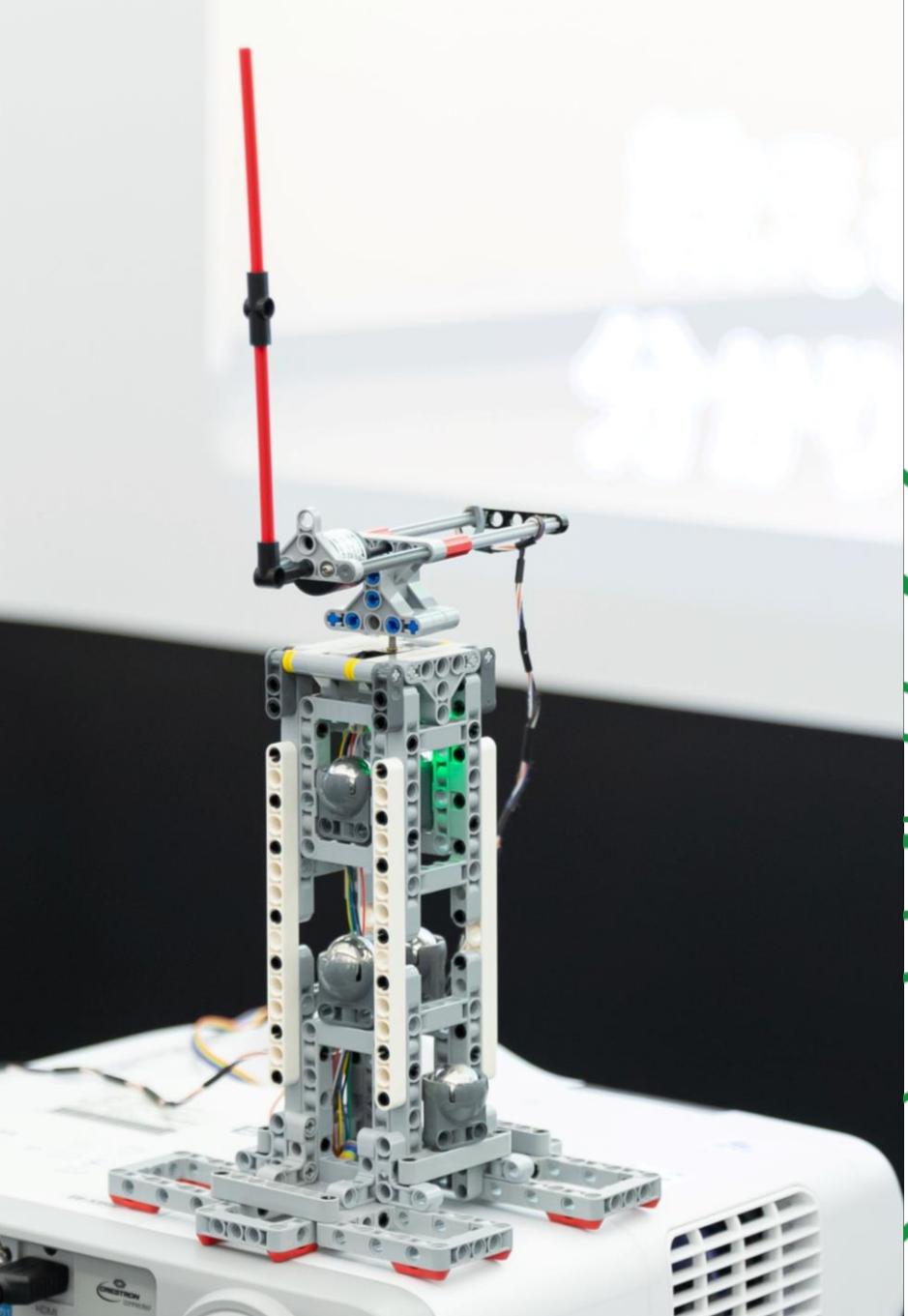
オレンジ色 (Z)
は使用しません

センサケーブルの接続

MinSegShield
の M2 に接続

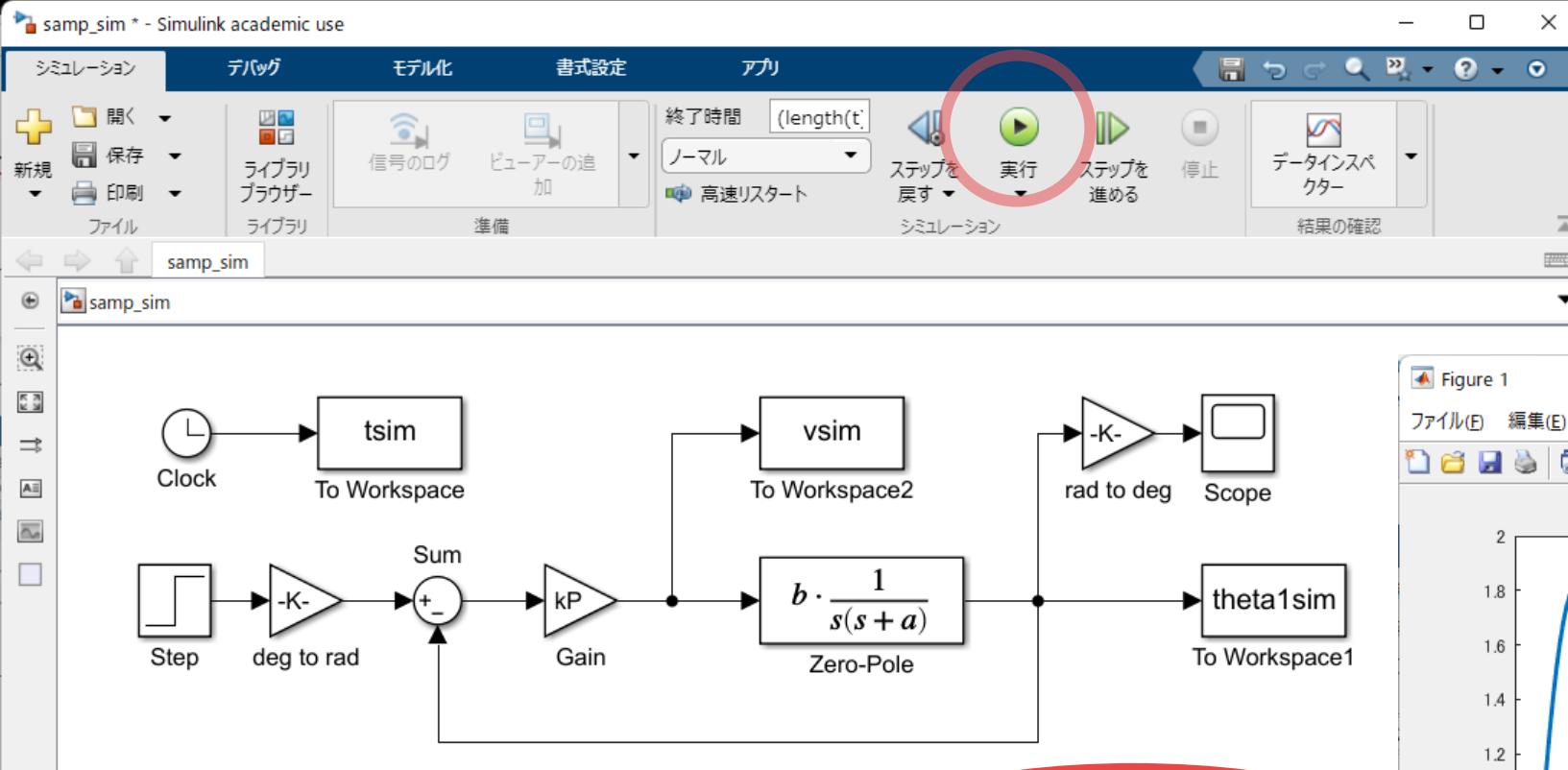


エンコーダ



LEGO 倒立振子の製作

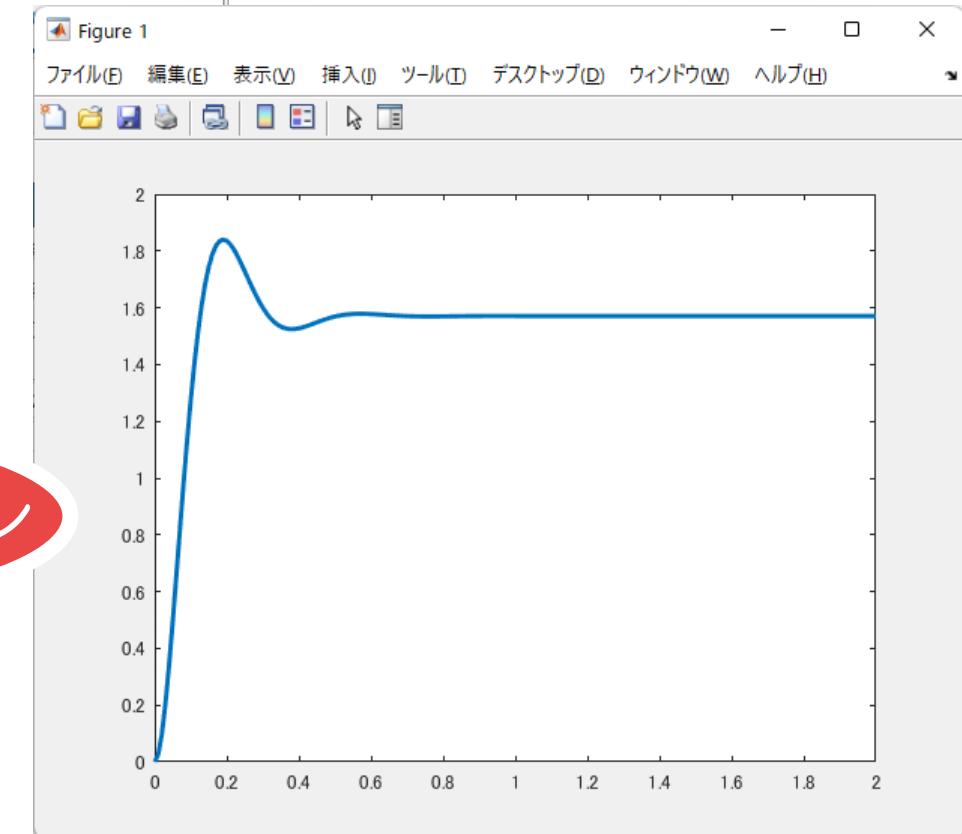
- ▶ LEGO 部品で本体を作つてみよう！
- ▶ 汎用のモータやセンサを使うには…
- ▶ モータと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ センサと LEGO 部品を結合しよう！
- ▶ マイコン部の配線をしよう！
- ▶ **MATLAB/Simulink で MinSegMega (Arduino) を動かしてみよう！**



コマンド ウィンドウ

```
>> a = 18.5641; b = 89.8882;  
>> sim('samp_sim')  
>> figure(1); plot(tsim,theta1sim,'LineWidth',2)  
fx >> |
```

シミュレーション



MATLAB®
&SIMULINK®

MATLAB/Simulink 環境での実装



Simulink Support Package for Arduino Hardware

実験が簡単に
行える！

Simulink ライブラリ ブラウザ

Simulink Support Package for Arduino Hardware/Common

FREE!

The screenshot shows the Simulink Library Browser with the 'Simulink Support Package for Arduino Hardware/Common' selected. The left pane lists various categories of blocks, and the right pane displays the specific blocks available for interfacing with Arduino hardware, such as Analog Input, Analog Output, CAN Receive, CAN Transmit, Digital Output, External Interrupt, I2C Read, I2C Write, MODBUS RS485 Master Read, MODBUS RS485 Master Write, MODBUS RS485 Slave Read, Input Capture, Protocol Decoder, Protocol Encoder, SD Card File Read, Serial Receive, Serial Transmit, SPI WriteRead, Standard Servo Read, and Standard Servo Write.

MATLAB/Simulink 環境での実装



FREE!

● Rensselaer Arduino Support Package Library (RASPLib)

実験が簡単に
行える！

RASPLib Double Click to Plot Serial Data

Device Specific Libraries:

OpenLibrary Libraries OpenDemo Demos

I2C Sensors:

- soHMC5883L xmag, ymag, zmag Magnetometer
- soMPU6050Gyro xvel, yvel, zvel Gyroscope
- soMPU6050Accel xaccel, yaccel, zaccel Accelerometer
- soMPU6050Temp temp Temperature
- soMPU9250RAW xaccel, yaccel, zaccel, xgyro, ygyro, zgyro, xmag, ymag, zmag, temp MPU9250 Raw
- soVL53L0X d_mm VL53L0X Distance Sensor

BMP280 Barometer

- soBMP280 pres_Pa, absAlt_m, temp_C
- soBMP180 pres_Pa, absAlt_m, temp_C BMP180 Barometer
- soMS5611 pres_Pa, temp_C, absAlt_m, relAlt_m MS5611 Barometer
- soMS5611BaroRAW pres, temp MS5611 Barometer Raw Data
- soMS5611BaroPT pres_Pa, temp_C MS5611 Barometer PT
- soBMI160Gyro xvel, yvel, zvel BMI160 Gyroscope

Serial Communication & Plotting:

Send

- > uint8 Send uint8 Port0
- > int16 Send Int16 Port0
- > single Send single Port0

Plot

- SerialPlot Double Click to Plot Serial Data
- CloseCOM Double Click to Close all COM ports

Ensure all serial ports are closed:
(try when code will not download)

Generic Motor Drivers and PWM Frequency:

Volts Vsupply=3.25

- Motor Driver - Speed & Direction
- Motor Driver - Speed & Direction With Table Lookup

Mega 2560 PWM Frequency Select pins 6, 7, 8 Frequency 32KHz

Mega 2560 PWM Frequency Select pins 9, 10 Frequency 4KHz

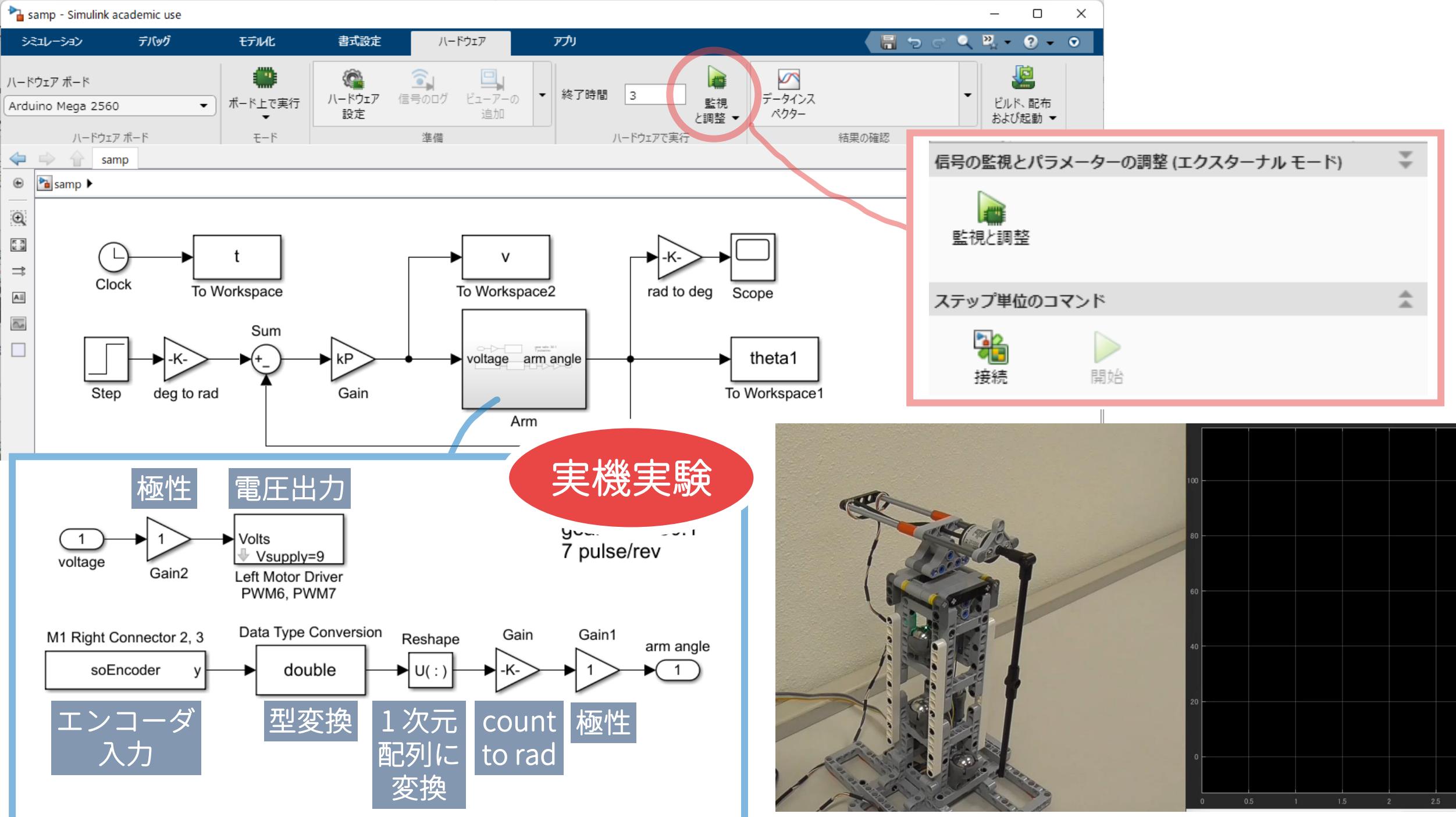
Uno or Nano PWM Frequency Select

Generic Sensors:

soHCSR04Sonar d_cm

Sonar Distance Sensor

準備完了 116%



とりあえず、

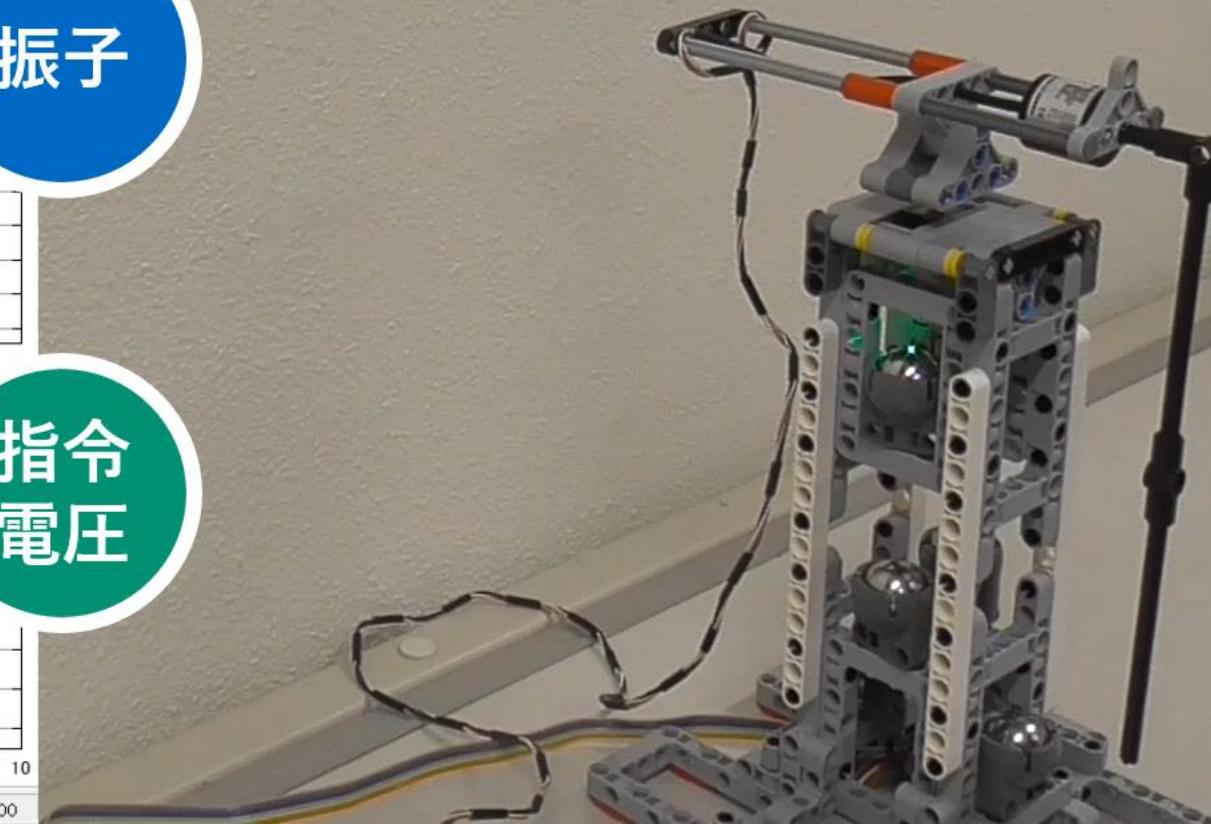
操作をしてみますね！



アーム

振子

指令
電圧



このスライドは終了です。