robbit システムマニュアル

吉瀬研究室
制作日：2025年9月

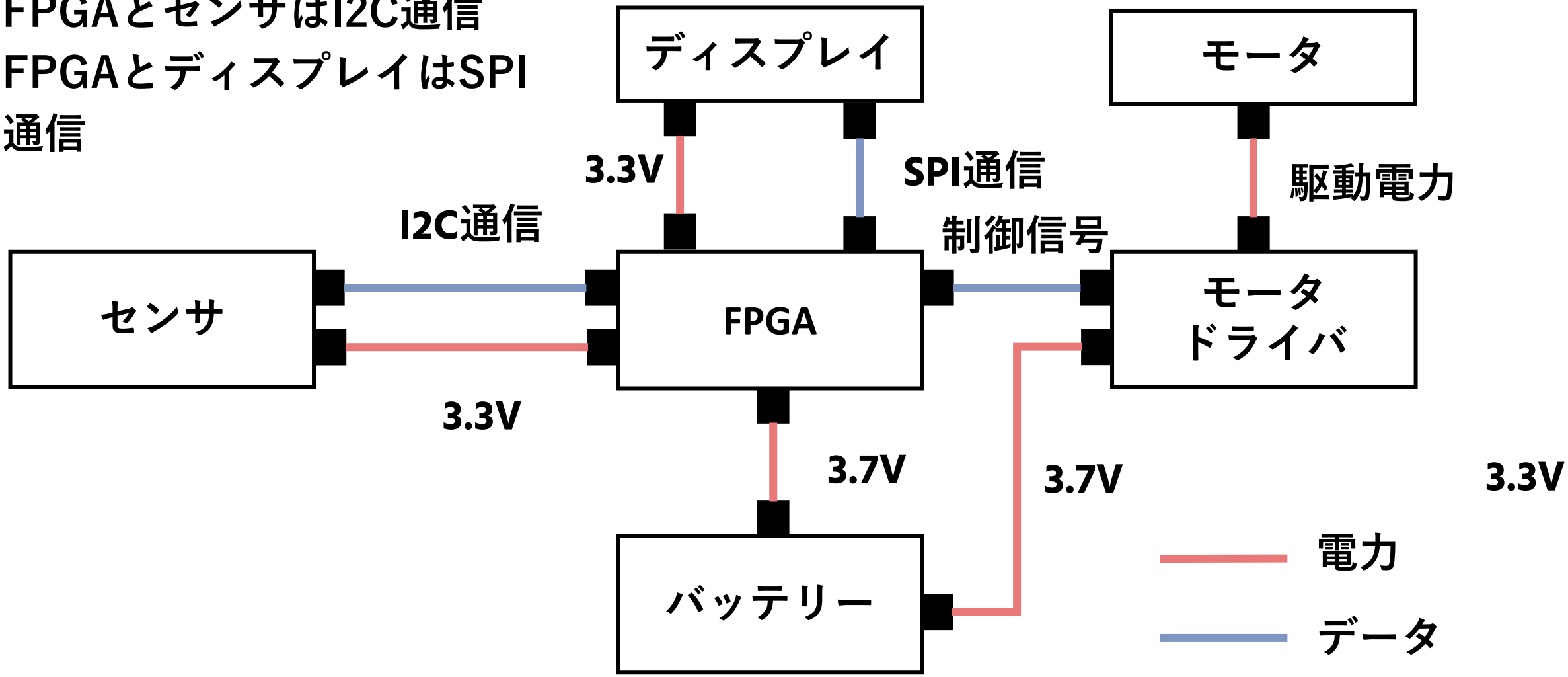
概要

- このプログラムはrobbitのハードウェア，ソフトウェア，ゲートウェアの内容を説明している（ただし，ゲートウェアとはFPGA内に実装する回路を指す）

- この資料を参考にすることで，robbitのシステムを理解することができ，ソフトウェアやゲートウェアの改善を行いやすくなる

ハードウェア: 概要

FPGAとセンサはI2C通信
FPGAとディスプレイはSPI通信



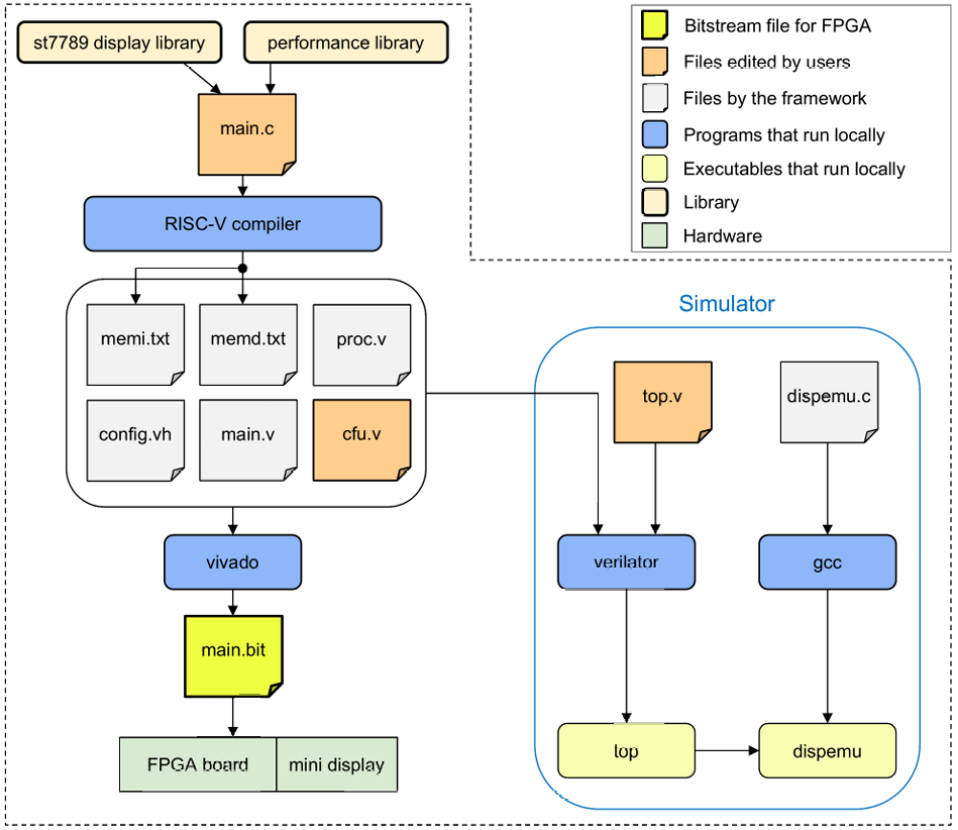
Robbitのハードウェアブロック図

ゲートウェア: 概要

■ CFU-Proving-Groundを使用する

- 175MHzまでの高速制御をサポート
- ミニディスプレイをサポート済み
- Meomory Maped IO(MMIO)を柔軟に設計可能

CFU-Proving-Groundにモータドライバモジュール, IMUモジュールを追加



ゲートウェア: 概要

各verilogファイルで行われている処理内容は以下の通り

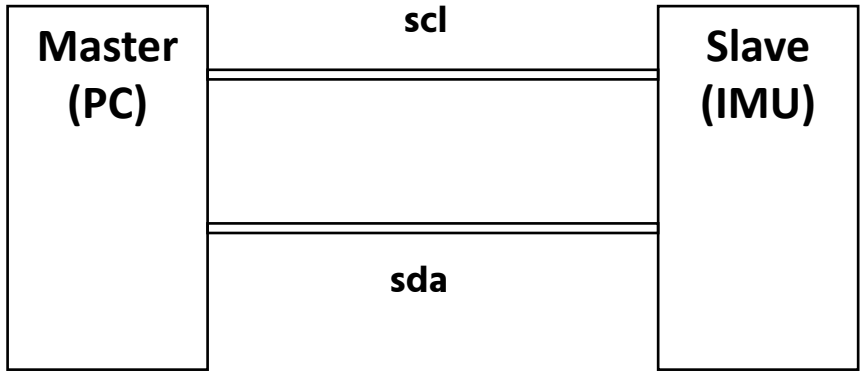
- main.v
  ディスプレイとのspi通信,
- mpu.v
  IMUとのI2C通信によるデータの送受信
- proc.v
  32bitのRISC-Vプロセッサを実装
- robbit.v
  モータドライバ制御モジュール(tb6612fng) : PWM制御を担当
  MMIOモジュール : robbitで新たに使用するメモリ領域にデータを書き込む

mpu.vとrobbit.vはCFU Proving Groundから新たに追加したプログラムである

ゲートウェア：I2C通信モジュール

- MPU-6050との通信はI2C通信で行う
- mpu.vにあるmpu6050モジュールとi2c_masterモジュールが担当している
  mpu6050モジュール: I2C通信でのデータやり取りのタイミング制御
  i2c_masterモジュール: IMUとFPGAのデータのやり取りを担う

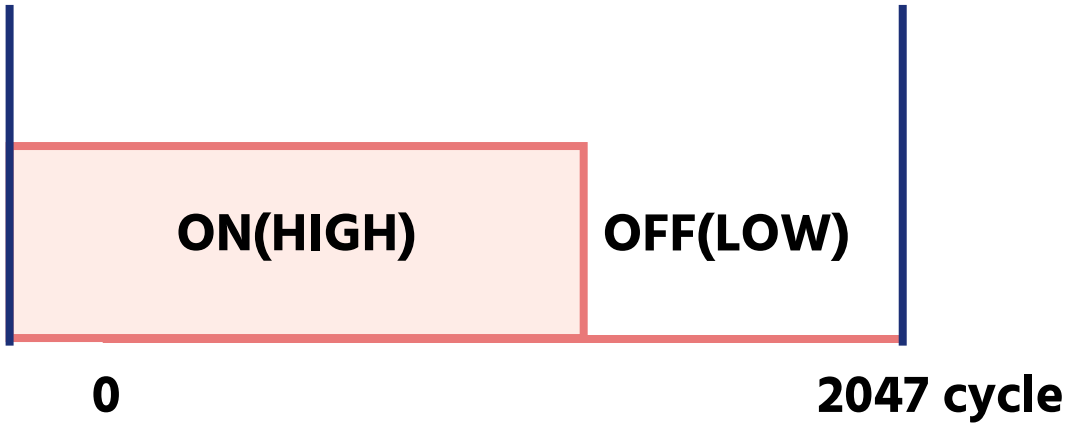
- I2C通信はsclとsdaという2本の通信線でデータのやり取りを行う
  sclがクロックの役割を果たし，sdaがデータバスの役割を果たす
- sclに合わせてsdaにデータを1bitずつ送受信する



ゲートウェア：tb6612fngモジュール

- robbit.v内に，モータドライバを制御するtb6612fngモジュールが存在する
- モータドライバにPWM制御の制御信号を送る
- PWM制御

• 電気信号のON/OFF(デューティー比)の割合でモータの強さを制御する
ONの割合が大きい = モータの回転速度が速い
ONの割合が小さい = モータの回転速度が遅い

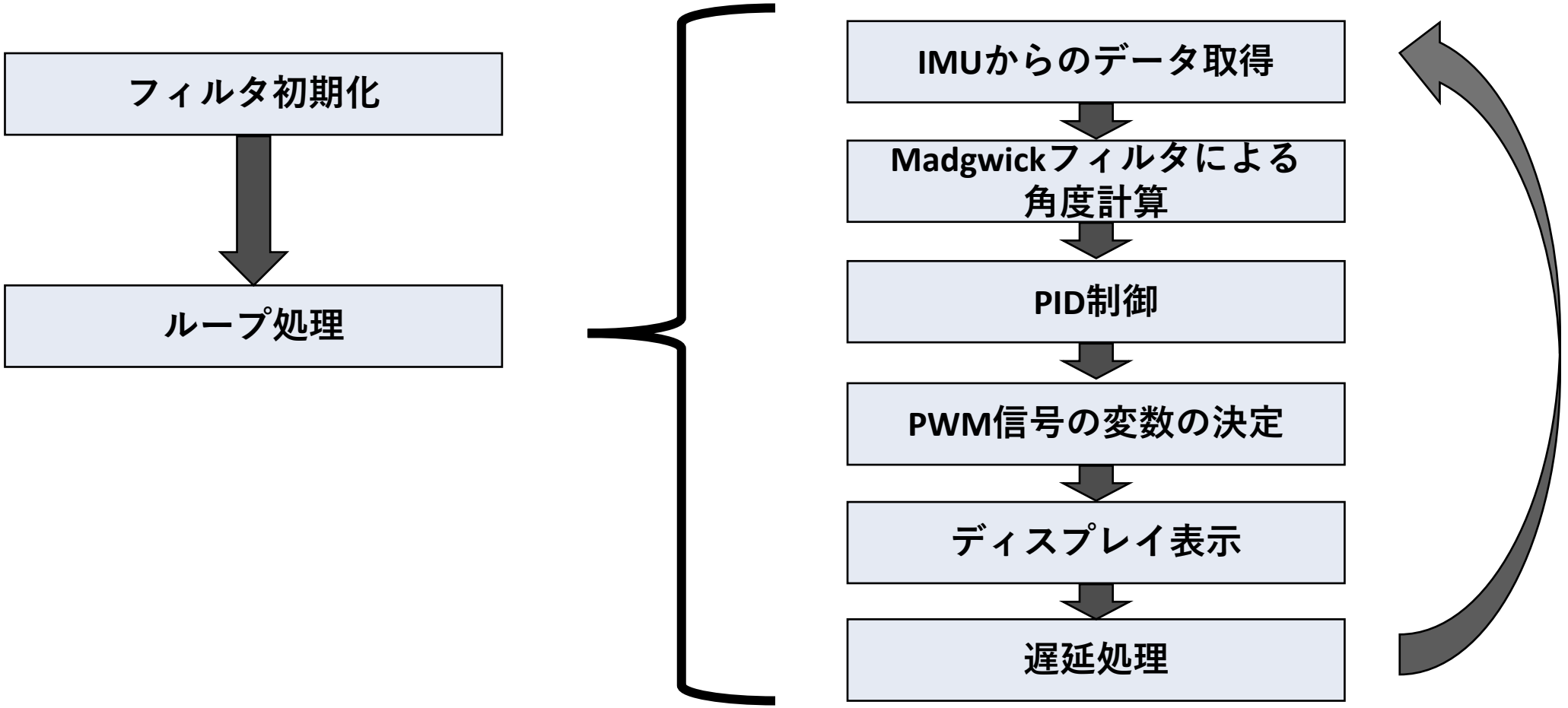


モータの回転速度が速い場合

モータの回転速度が遅い場合

ソフトウェア: 概要

ソフトウェア処理はmain.cppに書いてある。いかにフローチャートを示す。



ソフトウェア: IMUからのデータ取得

- IMUから3軸の加速度と角速度を取得する
- 実際にはゲートウェア上でMemory Maped IO(MMIO)によって加速度と角速度が書き込まれた後に，ソフトウェアで該当するアドレスにアクセスしてデータを読み込んでいる

```
{
    //get acceralation and angular velocity
    int16_t ax, ay, az, gx, gy, gz;
    unsigned int data;
    data = *(MPU_ADDR_ayax);
    ax = data & 0xffff;
    ay = data >> 16;

    data = *(MPU_ADDR_gxaz);
    az = data & 0xffff;
    gx = data >> 16;

    data = *(MPU_ADDR_gzgy);
    gy = data & 0xffff;
    gz = data >> 16;

    //calculation of roll
    MadgwickFilter.updateIMU(-gz / 131.0, gy / 131.0, gx / 131.0,
                             -az / 16384.0, ay / 16384.0, ax / 16384.0);
    roll = MadgwickFilter.getRoll();
}
```

x,y軸の加速度取得

z軸の加速度，x軸の角速度取得

y,z軸の角速度取得

ソフトウェア: Madgwickフィルタ

Institute of SCIENCE TOKYO

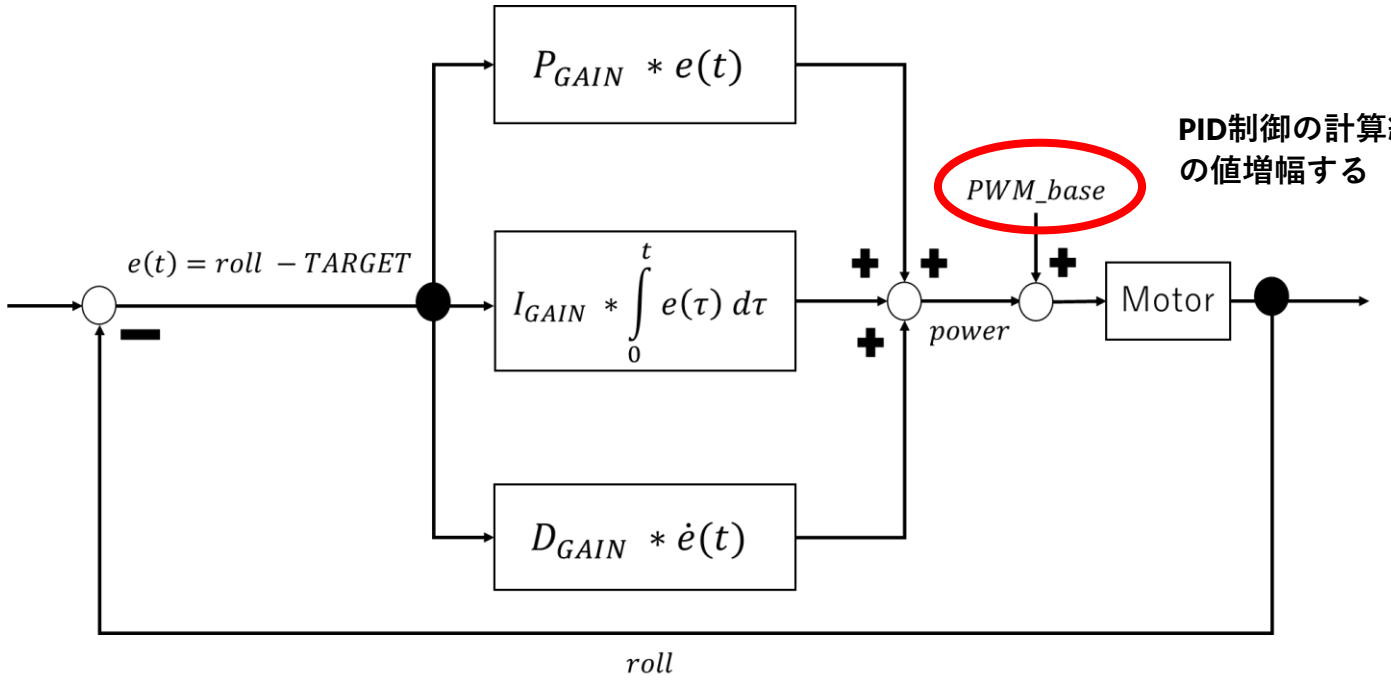
- 3軸の加速度と角速度とMadgwickフィルタを利用することで角度を算出する

- Madgwickフィルタの処理は，main.cppにMadgwickクラスとして定義している

ソフトウェア: PID制御

■ PID制御

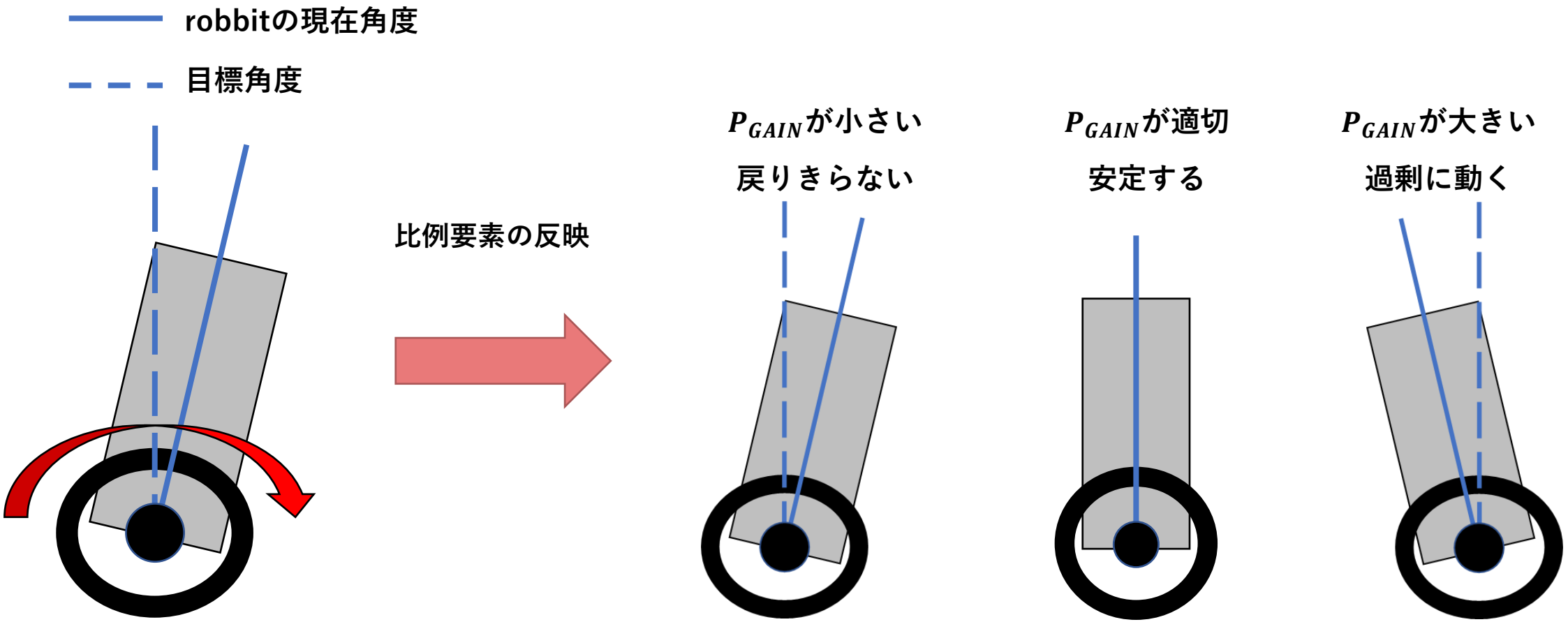
- 比例，積分，微分要素を組み合わせて操作量(角度)を決める
- 各要素の影響度合いは，ゲインによって決定される($P_{GAIN}, I_{GAIN}, D_{GAIN}$)
- 偏差が小さい場合の動力不足を解消するため，PWM_baseを加算



robbitのPID制御のブロック図

PID制御: 比例要素(P成分)

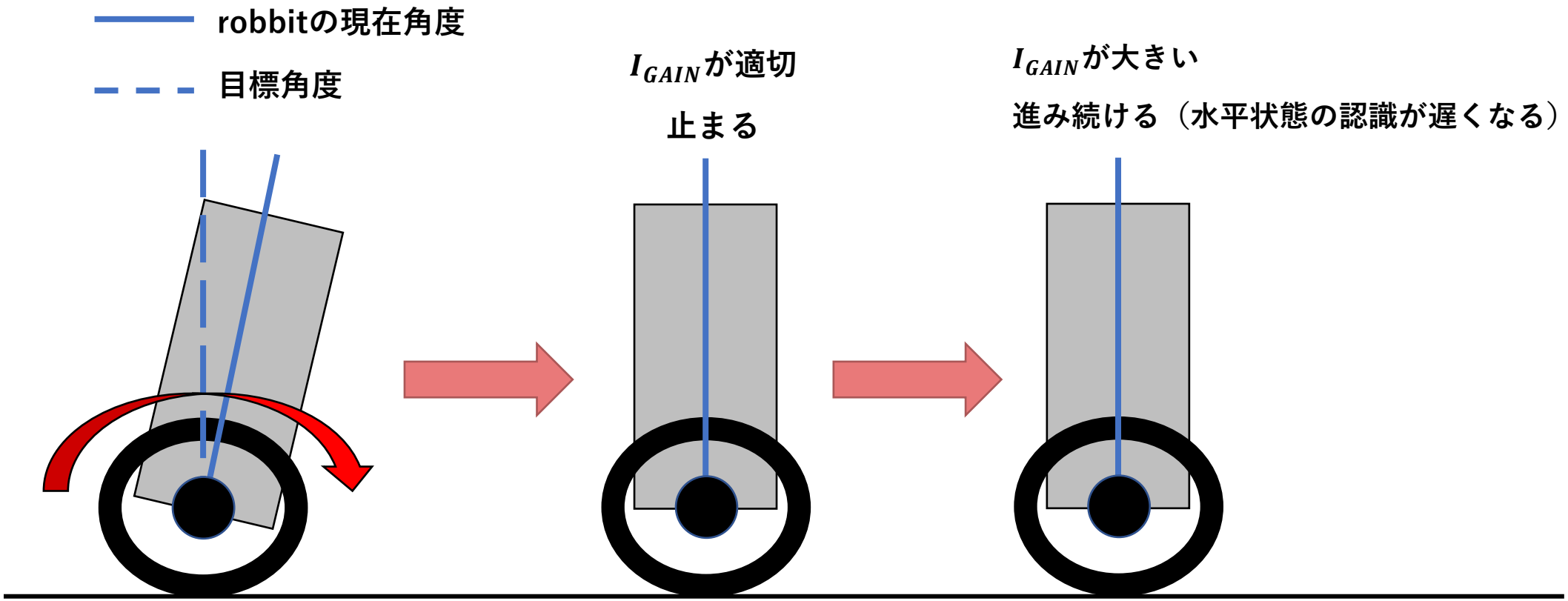
- 比例要素は操作量と目標値の誤差で表される
- P_{GAIN}が大きいと，偏差に対して敏感に反応する



比例要素の影響によるrobbitの動作イメージ

PID制御: 積分要素(I成分)

- 積分要素は操作量と目標値の誤差を時間積分している
- I_{GAIN}を大きくすると偏差を小さくできるが，大きすぎるとI成分の蓄積が大きくなり，システムの速応性や安定性が悪くなる



積分要素の影響によるrobbitの動作イメージ

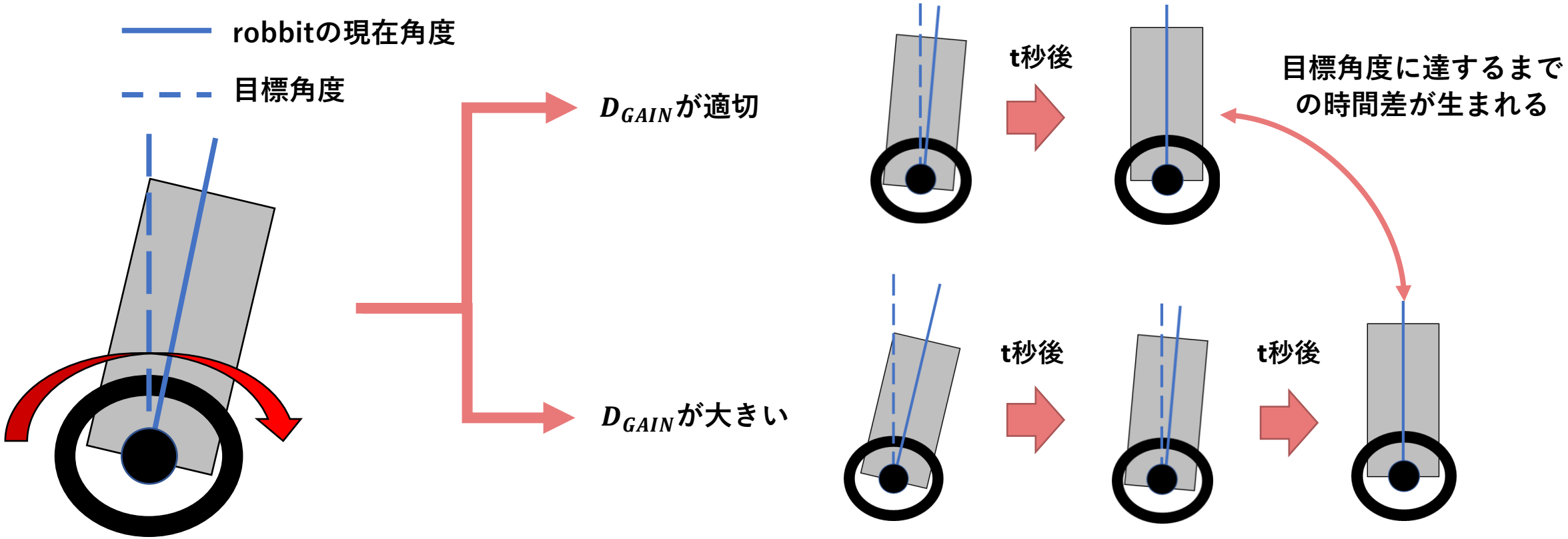
PID制御: アンチワインドアップ

- 前ページで述べた積分要素の蓄積を抑える手段としてアンチワインドアップが存在する
- 実装方法は，積分要素の計算結果に対して上限と下限を設定し，範囲内だったら積分要素の値を更新する

$$I = \begin{cases} I_{MAX} & (|I + P * dt| > I\_MAX) \\ -I_{MAX} & (|I + P * dt| > I\_MAX) \\ I + P * dt & else \end{cases}$$

PID制御: 微分要素(D成分)

- 微分要素は操作量と目標値の誤差を時間微分している
- D_{GAIN}を大きくすると，目標角度を行き過ぎるオーバーシュートが抑制される。大きすぎると目標角度に到達する時間が長くなる。



積分要素の影響によるrobbitの動作イメージ

ソフトウェア: PID制御

Institute of SCIENCE TOKYO

PID制御の実装は以下の通り

```
// PID control
P = (parameter.target - roll) / 90.0;          比例要素の計算
if(fabsf(I + P * dt) < I_MAX)  I += P * dt;  // cap    積分要素の計算（アンチワインドアップ）
D = (P - preP) / dt;     微分要素の計算
preP = P;

power = parameter.Kp * P + parameter.Ki * I + parameter.Kd * D; 出力の計算
```

- 変数Pでは比例要素を計算するため，目標角度(TARGET)と現在角度(roll)の偏差を導出する
- 変数Iでは積分要素を求めるため，比例要素を長方形近似で積分している
  If(fabsf(I+P*dt))の部分がアンチワインドアップの条件式に該当する
- 変数Dでは微分要素を求めるため，微分の公式を用いて計算を行っている
- 最後にpowerにすべての要素の値を足し合わせることで出力を計算する

ソフトウェア: PWM信号の決定

PWM制御の制御信号として，波形がHIGHの割合を0~255で表現する
式で表すと以下の通りである
$power$はPID制御の計算結果を表し，pwm_{base}はPWM信号の増加分を表す(詳しくは次ページ)

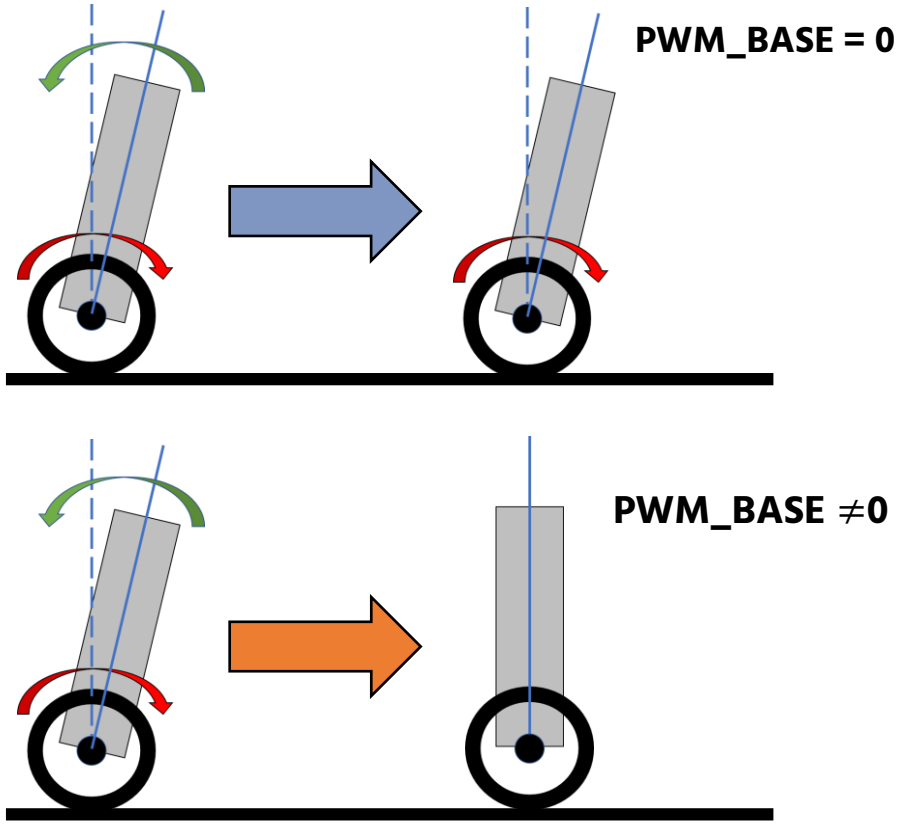
$$PWM = \begin{cases} power + pwm_{base} & (|power| < V_{MAX}) \\ V_{MAX} & (|power| \geq V_{MAX}) \end{cases}$$

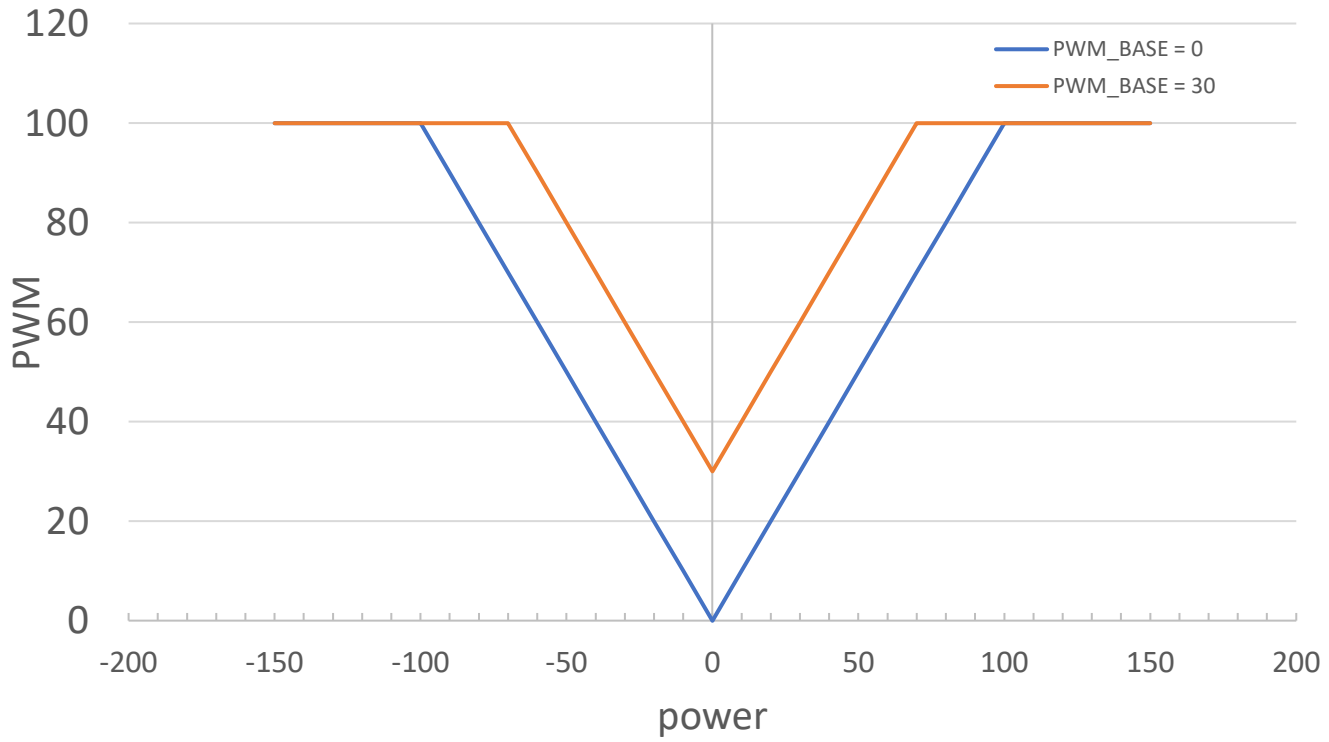
また，powerの符号はモータの回転方向を決める制御信号として使われる

PWM_BASE

PWM_BASE : PID制御の計算結果に加える定数

- PID制御 : 偏差が小さいと十分な動力を得られず角度が戻りきらない
- PID+PWM_BASE : 偏差が小さい場合も動力が確保され，角度が変わる





Thank You!