

倒立振子型ライントレースロボット 製作におけるMATLABの活用例

株式会社デンソーウェーブ
下鳥 晴己

@東京科学大学 大岡山キャンパス
2025-09-02

はじめに：本セッションでの注意点

制御初心者が倒立振子型ライトレースロボットを製作するにあたり、MATLABという強力なツールをどのように活用したかの紹介です

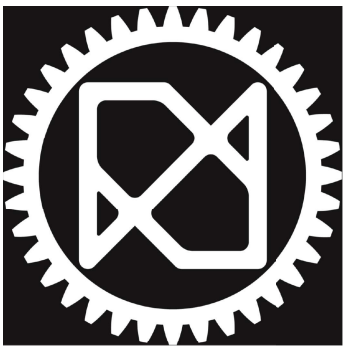
非常に広義な意味でのMBDを想定しています

目次

- 自己紹介
- 会社紹介
- 導入
- 倒立振子の設計
 - モデルの確認
 - 制御設計
- コード生成
- おまけ：ログ解析
- おまけ：PIDゲインチューニング

自己紹介

- 名前：下鳥 晴己（しもとり はるき）
- 全長：1770 [mm]
- 所属：株式会社 デンソーウェーブ
 - 産業用ロボット開発
- 趣味：モノづくり、車、バイク
- 好きなツール：MATLAB, Vim, Linux（初心者）
- YouTubeやってます↓ よかったら見てね



QRコードは株式会社デンソーウェーブの登録商標です



会社紹介

株式会社 デンソーウェーブ

- 事業紹介（会社HPより）



＞ ハンディターミナル



＞ ハンディスキャナ



＞ RFID



＞ オフィスソリューション



＞ QRコードソリューション



＞ 垂直多関節ロボット



＞ 水平多関節ロボット



＞ 人協働ロボット



＞ IoTソリューション



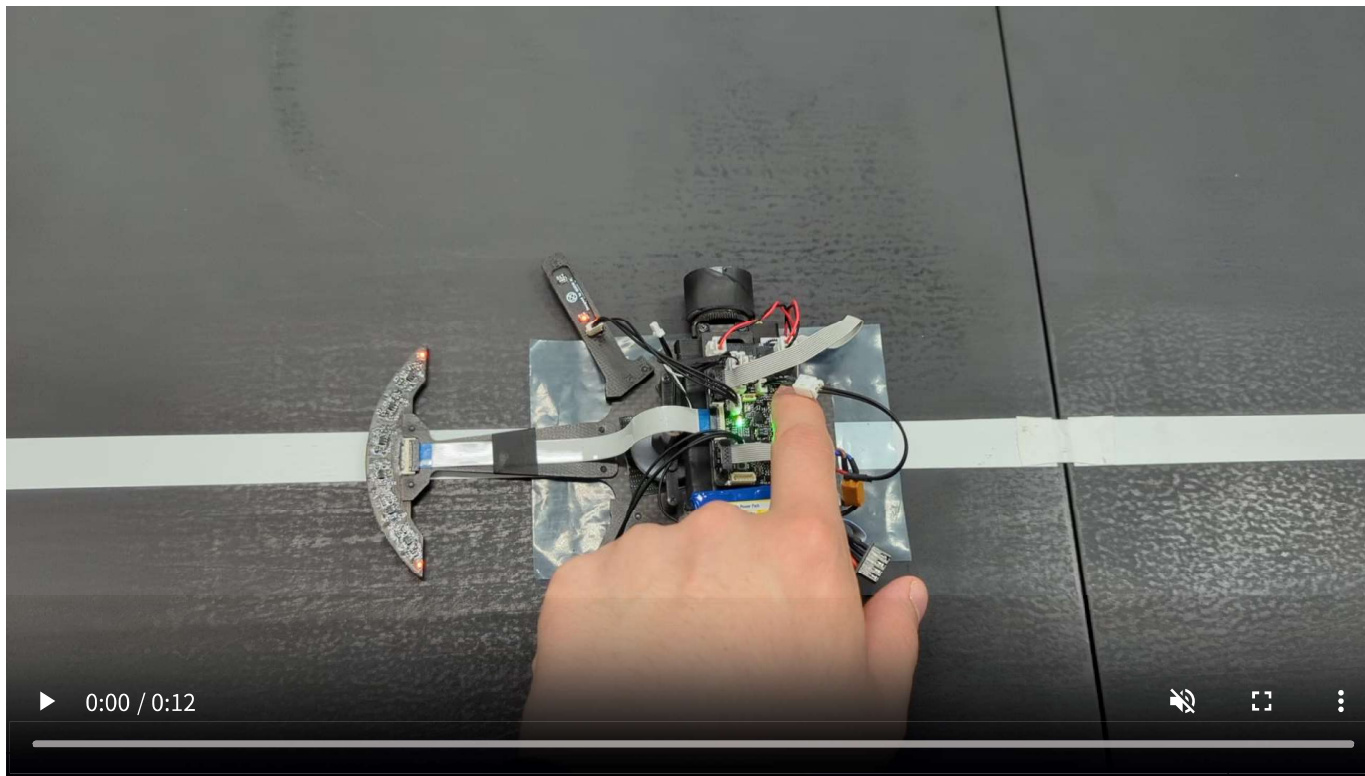
＞ 制御機器

- MATLAB & Simulinkを業務で活用！
- 学生のころからMATLABを利用している経験が活かしている！

導入：マイクロマウス大会について

マイクロマウス大会 ロボトレース競技とは

- ライントレースで走行タイムを競う競技



導入：私にとってのマイクロマウス大会

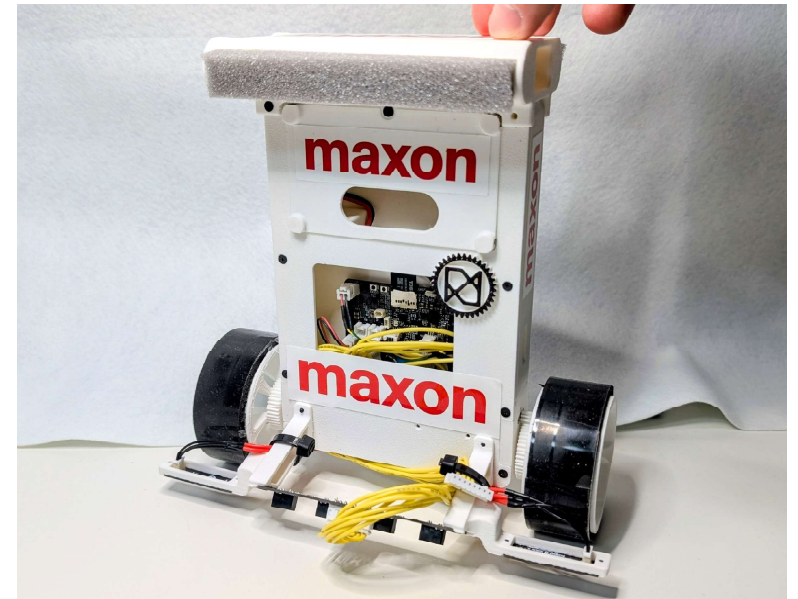
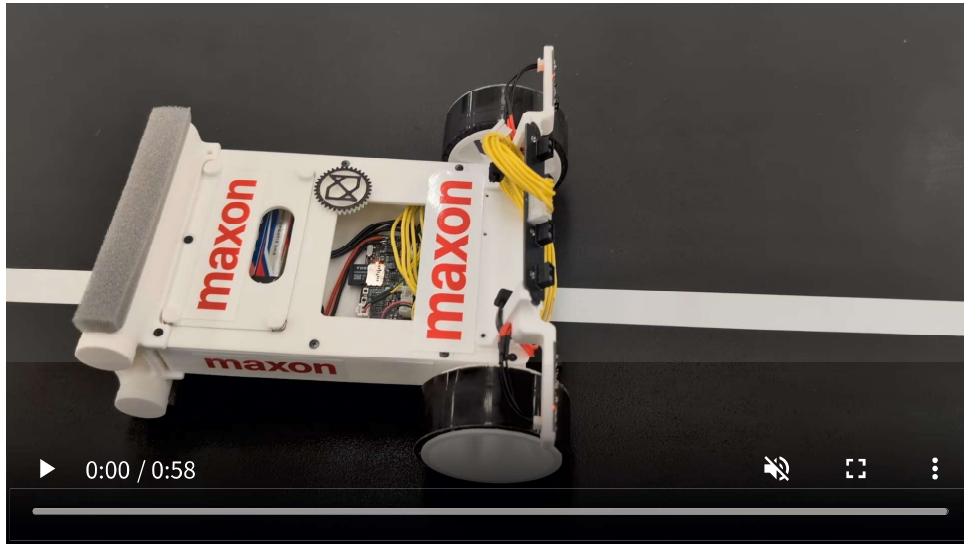
昨年度のモチベーション

- 社会人1年目で学生時代と比べて時間がない & 新しいことしたい & 賞がほしい
↓
- 倒立振子でライトレース！
 - 狙い1：速さではなく一芸で勝負
 - 狙い2：状態フィードバック（現代制御）を実機に適用
 - 狙い3：倒立しながらライトレースしたら映えるので賞を狙えるかも
- きれいに倒立しながらライトレースは結構むずかしい...

MATLABという強力なツールに助けてもらおう！！

導入：ロボットの紹介

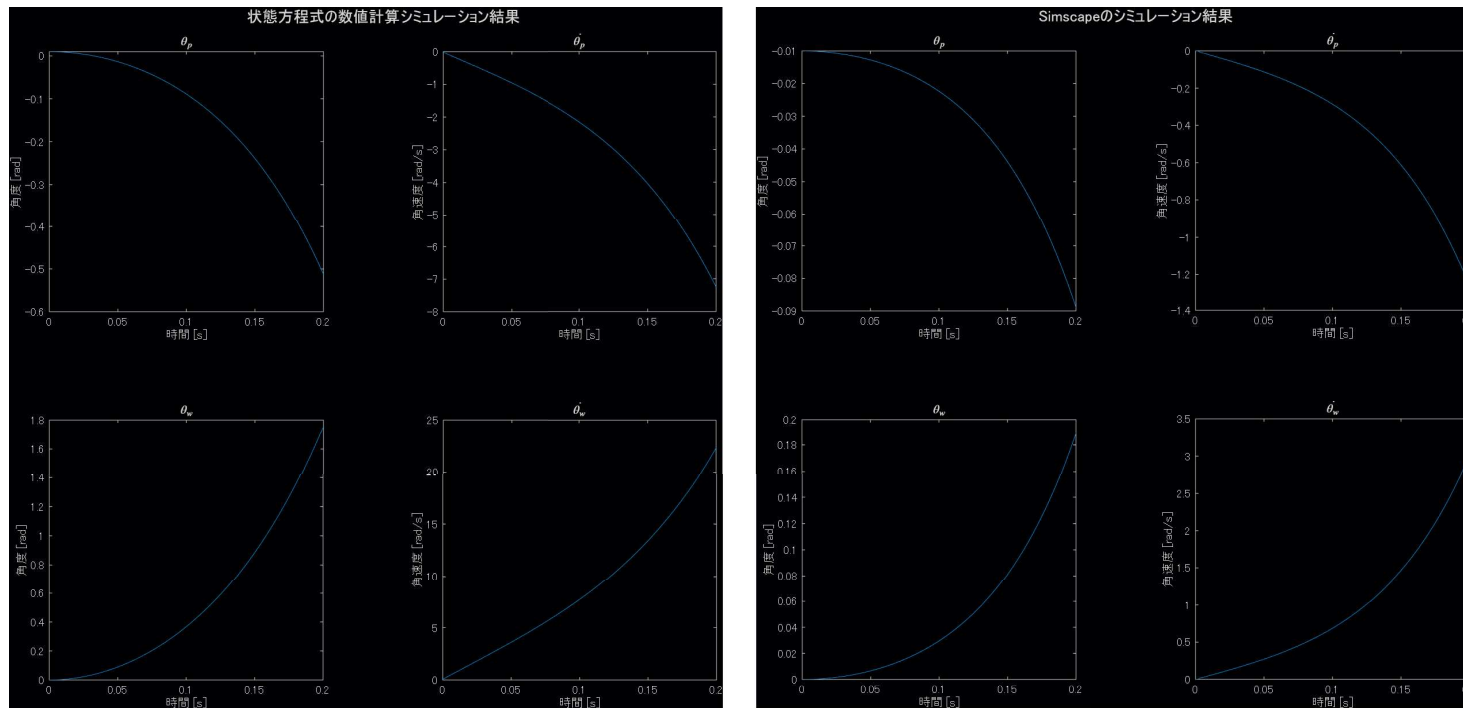
- 倒立しながらきれいに走れている



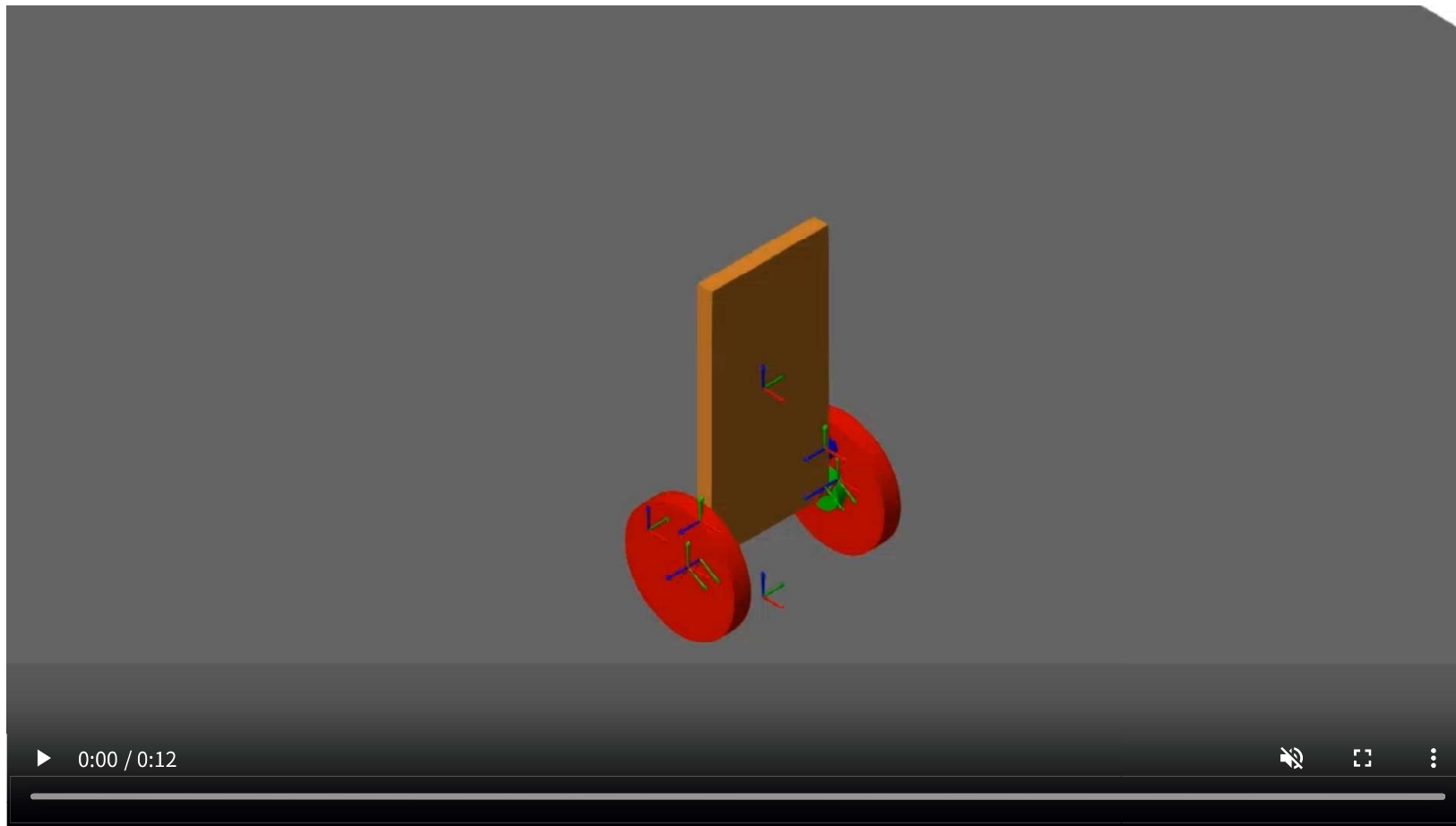
MATLABをどのように活用したかを紹介

MATLABの活用例：倒立振子の設計-モデルの確認

- トランジスタ技術 2019年 7月号を参考にモデル（運動方程式）を決定
- 運動方程式による数値シミュレーション（左図）とSimscape Multibodyによる結果（右図）の形状がほぼ一致



MATLABの活用例：倒立振子の設計-モデルの確認



MATLABの活用例：倒立振子の設計-制御設計

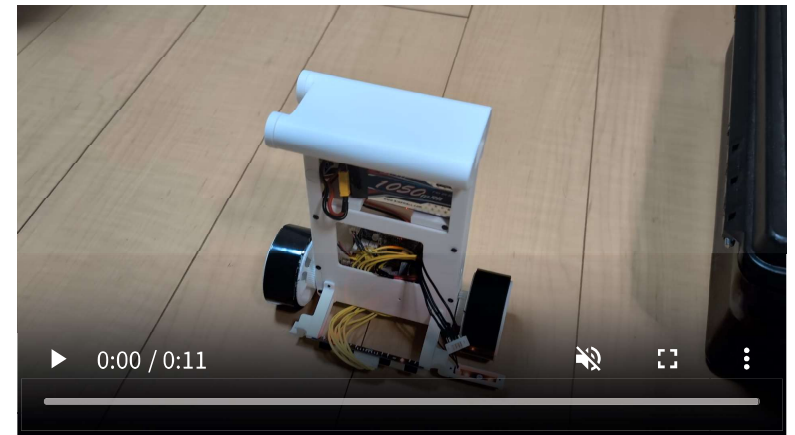
- 状態フィードバックで倒立が目的なので設計
 - といっても、モデルがあるのでQ, R行列を決めて`lqr`関数を実行するだけ
 - Qが大：機敏に動く、Rが大：省エネで動く

```
f = lqr(A, B, Q, R);
```

- あとは下記のイメージでロボットに実装

```
double stateFeedback(const double x[4], const double f[4])  
{  
    return ((-f[0] * x[0] + -f[1] * x[1]) + -f[2] * x[2]) + -f[3] * x[3];  
}
```

- 注：一発では倒立しないのでQ, Rやモデルを調整



振子の角度とロボットの位置を制御

MATLABの活用例：倒立振子の設計-カルマンフィルター

- 振子の角度推定にカルマンフィルターを使用
 - ジャイロセンサーと加速度センサーを融合
- カルマンフィルターをMATLABで実装。
Embedded CoderでCコードを生成し実機に移植
 - 理由：行列計算が楽なので

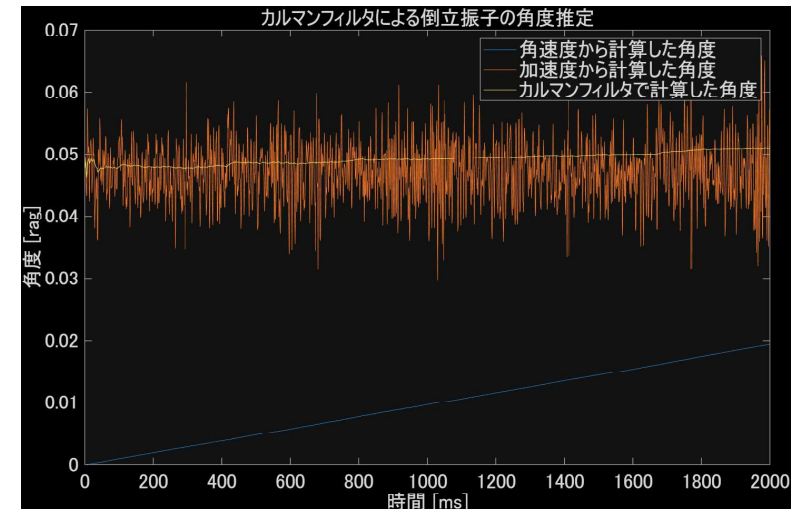
```
function [estimated_robot_theta, P] = kalmanFilter(dt, omega_offset, pre_P, pre_theta, U, W, omega, theta)
P = pre_P;
theta_hat = [pre_theta; omega_offset];

A_theta = [1, -dt;
           0, 1];
B_theta = [dt;
           0];
C_theta = [1, 0];

%予測ステップ
P_dash = A_theta * P * A_theta.' + B_theta * U * B_theta.';
theta_tilde = A_theta * theta_hat + B_theta * omega;

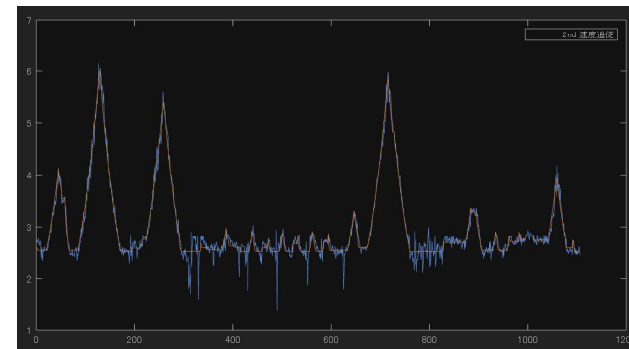
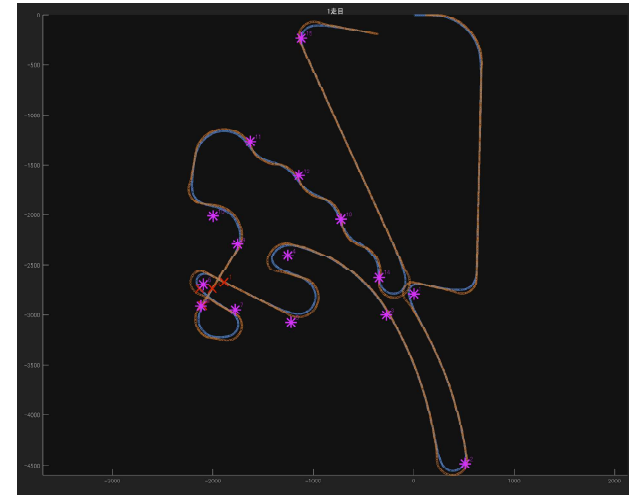
%更新ステップ
G = P_dash * C_theta.' * (W + C_theta * P_dash * C_theta.)^(-1);
P = (eye(2) - G * C_theta) * P_dash;
theta_hat = theta_tilde + G * (theta - C_theta * theta_tilde);

estimated_robot_theta = theta_hat(1);
end
```



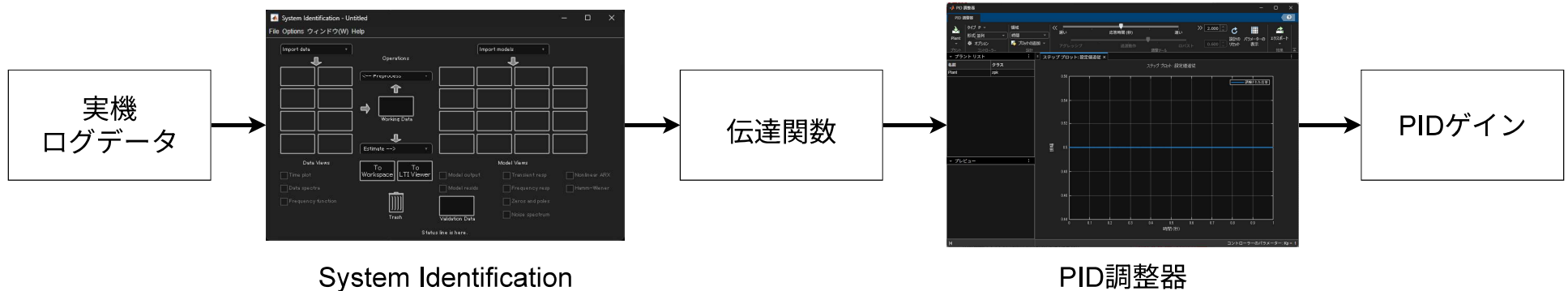
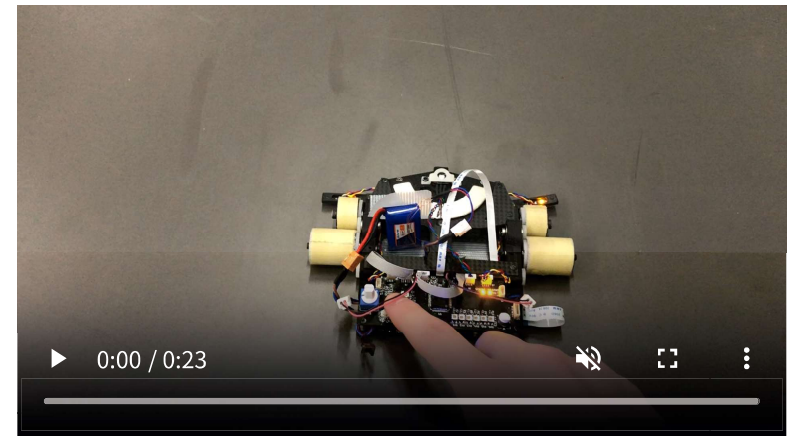
MATLABの活用例（おまけ）：ログ解析

- MATLABは可視化に強い
 - 可視化すると問題がよく分かる
- おすすめはSDカードによるログ管理
 - ロボットにSDカードを搭載してログを保存
 - メリット
 - データが大きくなるとUARTなどよりPCへのデータ移動が（経験上）速い
 - ファイルシステムが使える
 - 大容量保存できる
- ログデータが少ないならMATLABと直接シリアル通信してログを取る方法が便利



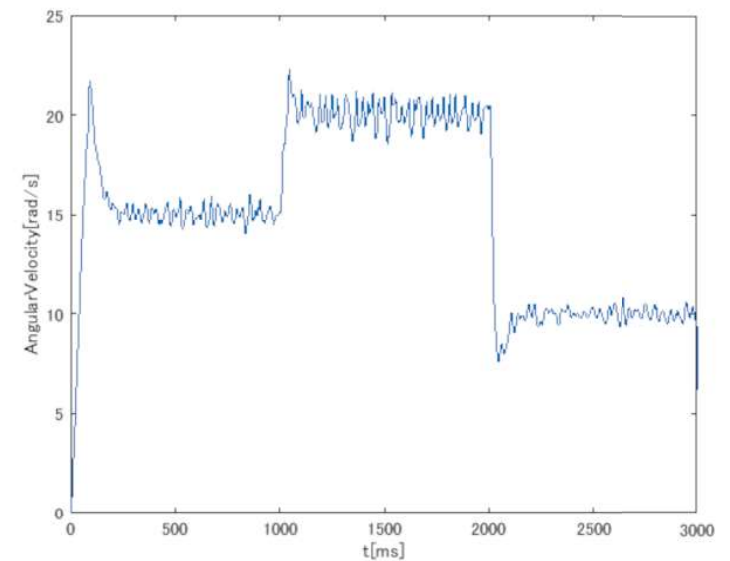
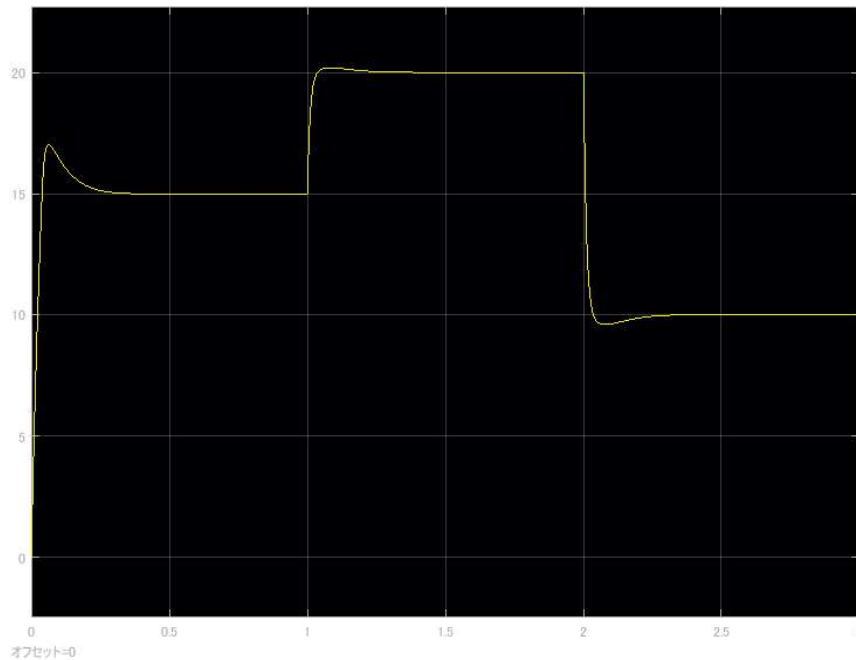
MATLABの活用例（おまけ）：PIDゲインチューニング

- ロボットの移動速度をPID制御する場合
 - System Identification Toolboxで並進方向の速度に関する伝達関数を同定
 - 伝達関数に対してPID調整器で所望の応答になるPIDゲインに調整
 - 実機にゲインを書き込んで動かせばOK！



MATLABの活用例（おまけ）：PIDゲインチューニング

- 左図がシミュレーション結果で右図が実機のログでほぼ一致
 - 性能を求めるなら人力チューニングがおすすめ



まとめ

- 倒立振子型ロボトレーサーを製作するにあたり、どのようにMATLABを活用したかを紹介
 - Simscape Multibodyによる運動方程式の妥当性の確認
 - 状態フィードバックのゲイン計算
 - カルマンフィルターのアルゴリズムをMATLABで実装後、Cコードを生成して実機に移植
 - ログ解析
 - 実機の伝達関数を同定してPIDゲインチューニング

MATLAB & Simulinkは便利です
仕事でも役立つので使えるときに使って慣れておこう

参考文献

- 株式会社 デンソーウェーブ ホームページ
- トランジスタ技術 2019年 7月号, CQ出版社
- id研: マイクロマウスの機体を同定する, <https://idken.net/posts/2017-06-02-systemident/>

参考：フライホイール型倒立振子

- フライホイール型倒立振子のモデルの確認の例
- ちゃんと合わせ込めば数値計算とSimscapeの結果がほぼ一致

