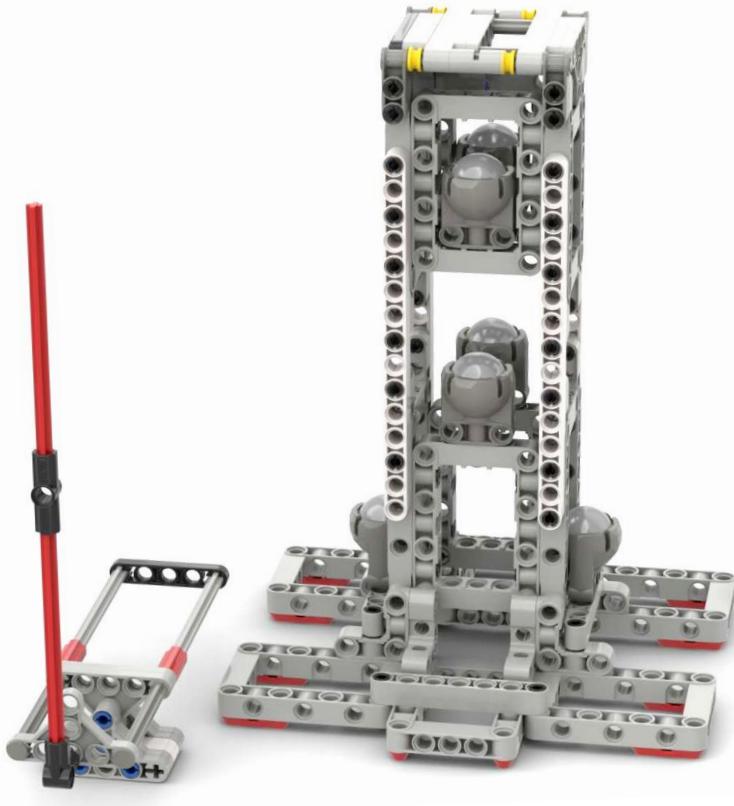


『制御工学』を学習するための LEGO 倒立振子の開発

— やっぱり数式を追いかけるだけでなく
モノを動かしてみたいでしょ！ —



北九州工業高等専門学校
生産デザイン工学科
情報システムコース



川田 昌克



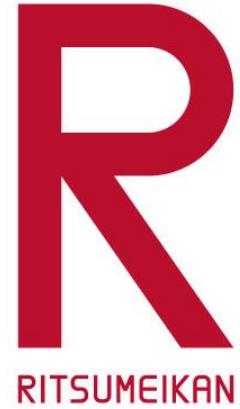
- はじめに
- LEGO 倒立振子の製作
- PID 制御の学習
- モデリングの学習
- 現代制御の学習
- アドバンスト制御の学習
- まとめ

■ 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

私と「倒立振子」の出会い





1988.4-1992.3	理工学部 情報工学科
1992.4-1994.3	理工学研究科 情報工学専攻 博士前期
1994.4-1997.3	理工学研究科 情報工学専攻 博士後期
1995.4-1997.3	理工学部 情報系 任期制助手
1997.4-1998.3	理工学部 電気電子系 任期制助手



1998.4-2022.3 電子制御工学科 教員

2023.4-

生産デザイン工学科
情報システムコース 教員





1988.4-1992.3	理工学部 情報工学科
1992.4-1994.3	理工学研究科 情報工学専攻 博士前期
1994.4-1997.3	理工学研究科 情報工学専攻 博士後期
1995.4-1997.3	理工学部 情報系 任期制助手

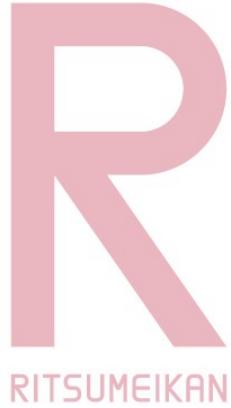
学生時代の研究テーマは…

「交流モータの非線形ロバスト制御」

- 厳密な線形化
- H_∞ 制御

パワエレわからんし、
実機動かしてないし、
いまいち興味が…





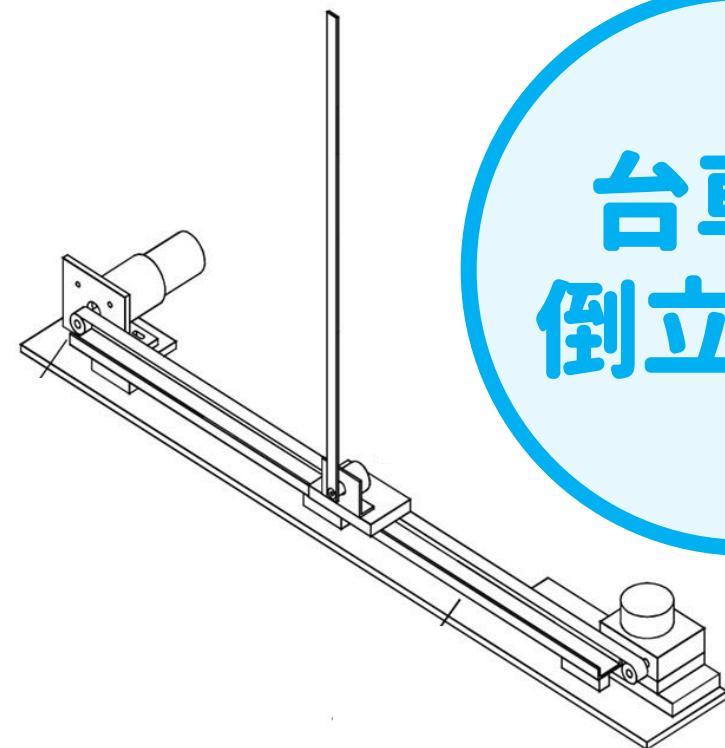
1997.4-1998.3 理工学部 電気電子系 任期制助手

とにかく何かを動かしてみたい！

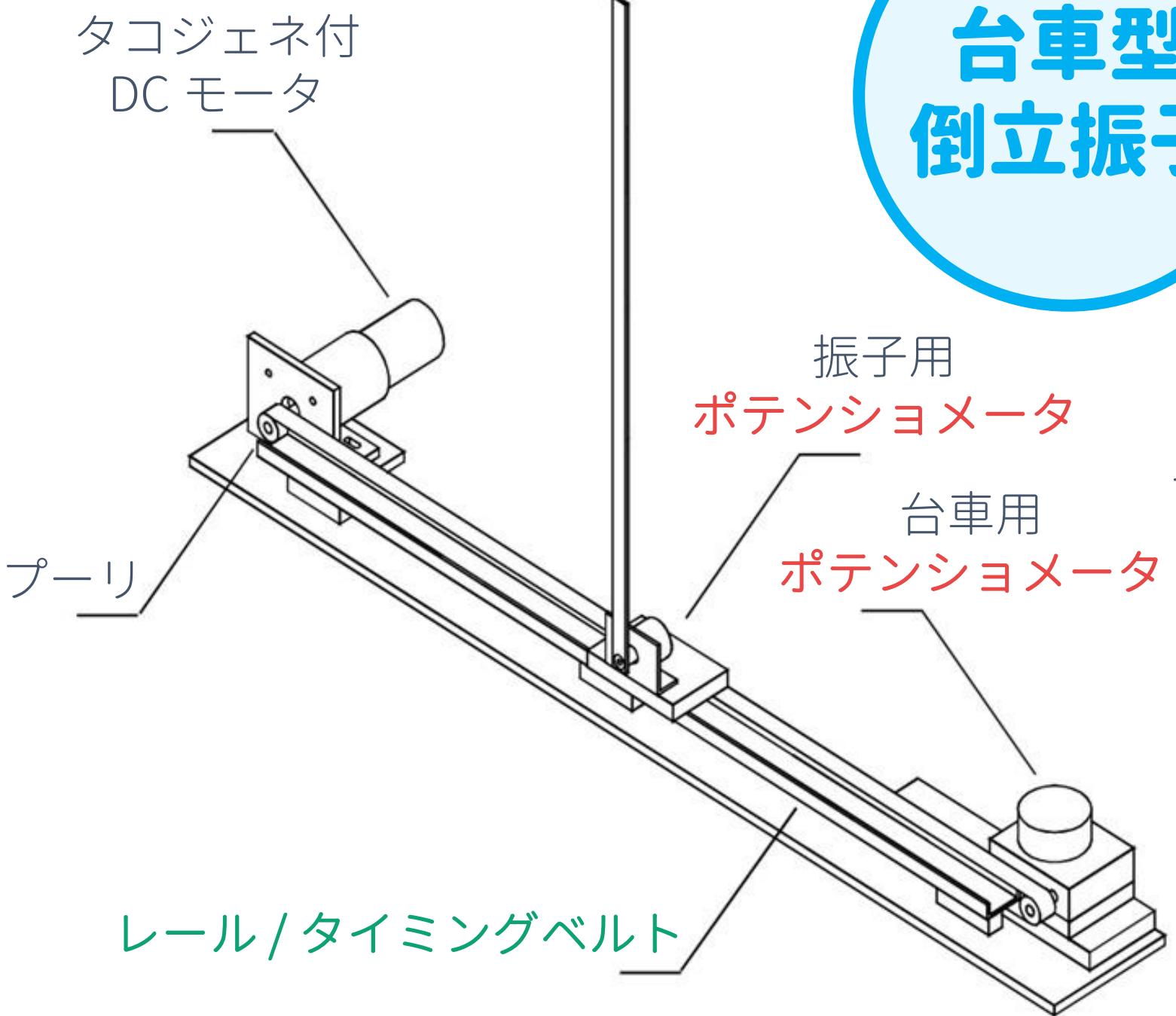
少しだけ**非線形制御**とか**ロバスト制御**とか
勉強したし、その**検証**を**実機**で行いたい！

でも、**機械設計・加工**とかできないし…

恩師の井上和夫先生が
実験装置を買ってくれた！



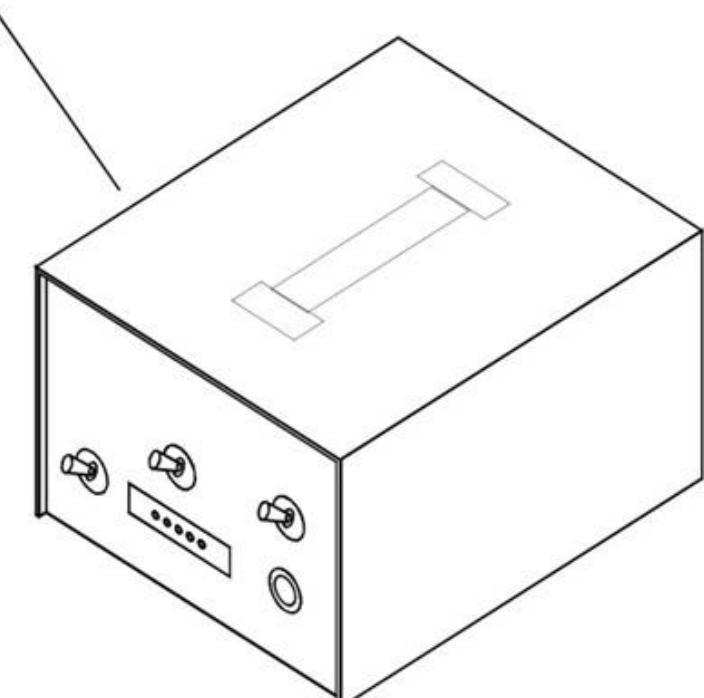
台車型 倒立振子



ServoTechno
サーボテクノ株式会社

川谷先生監修

速度制御型
モータドライバ

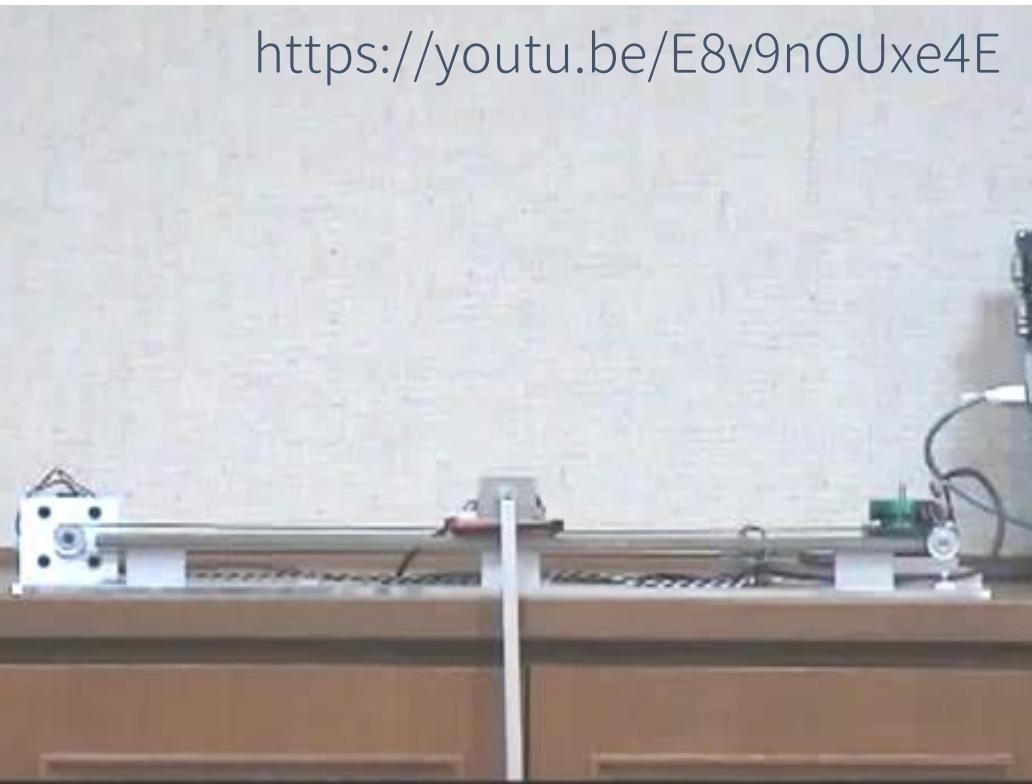


ServoTechno

サーボテクノ株式会社

ピタッと止まる！
すげえ！

<https://youtu.be/E8v9nOUxe4E>

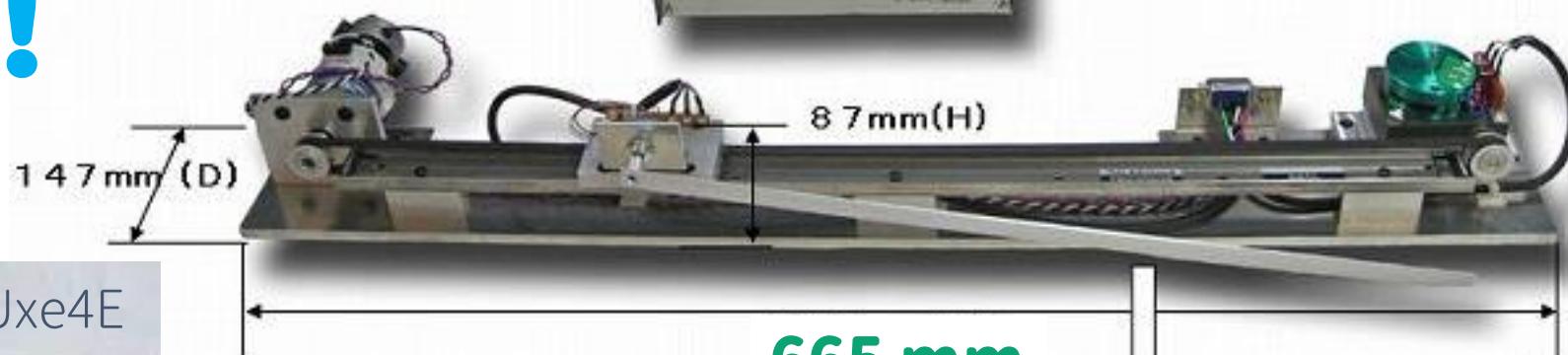


倒立振子サイズ

重量：

ドライバ BOX：約 4 Kg

懸構部：約 2 Kg



665 mm

振子部分



405 mm

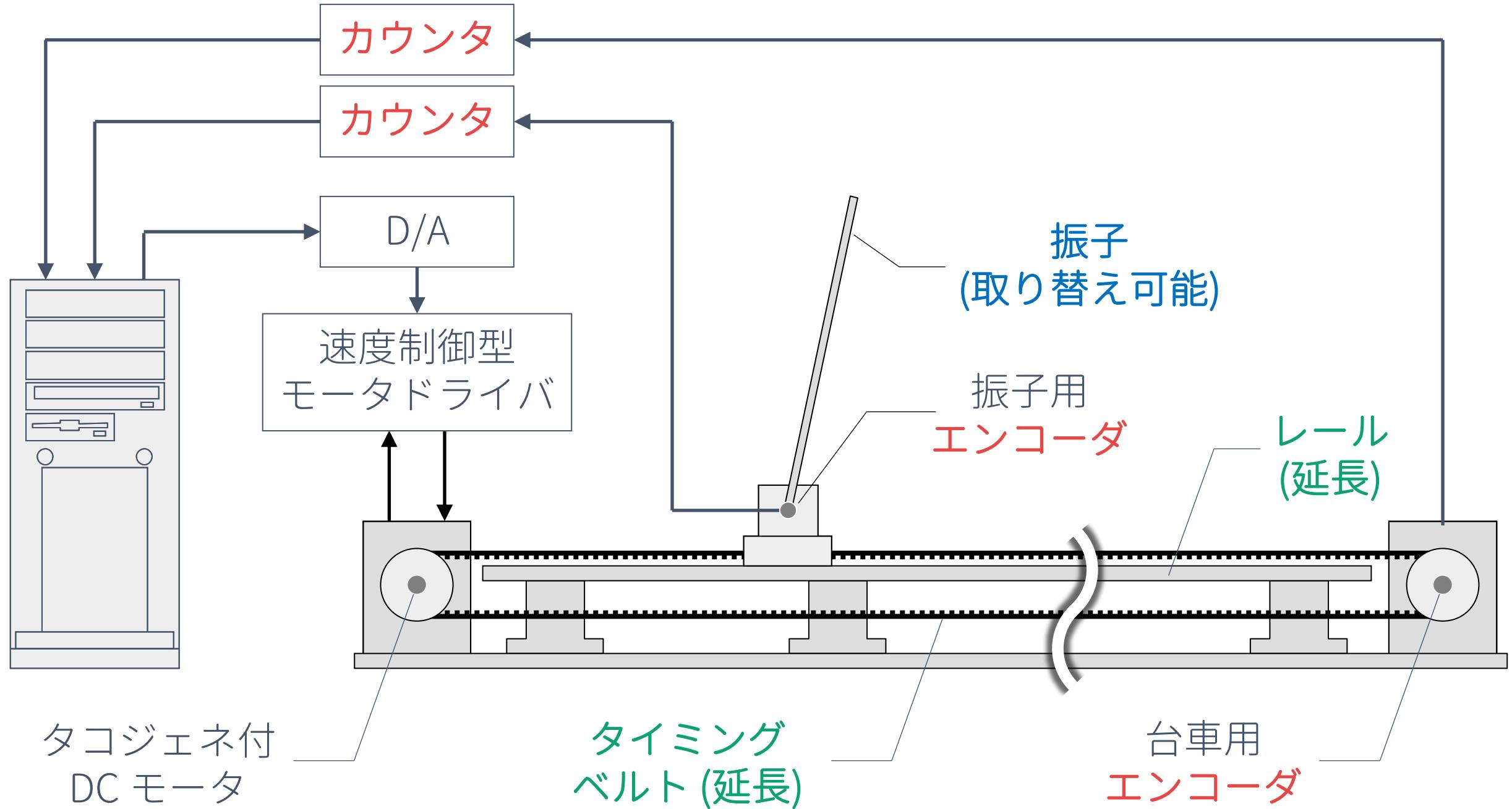
性能は良いけど、稼働範囲が短い(405mm)し、
振子を変更できないし、非線形制御や
ロバスト制御の検証用としては…

しゃあない、改良するぞ！

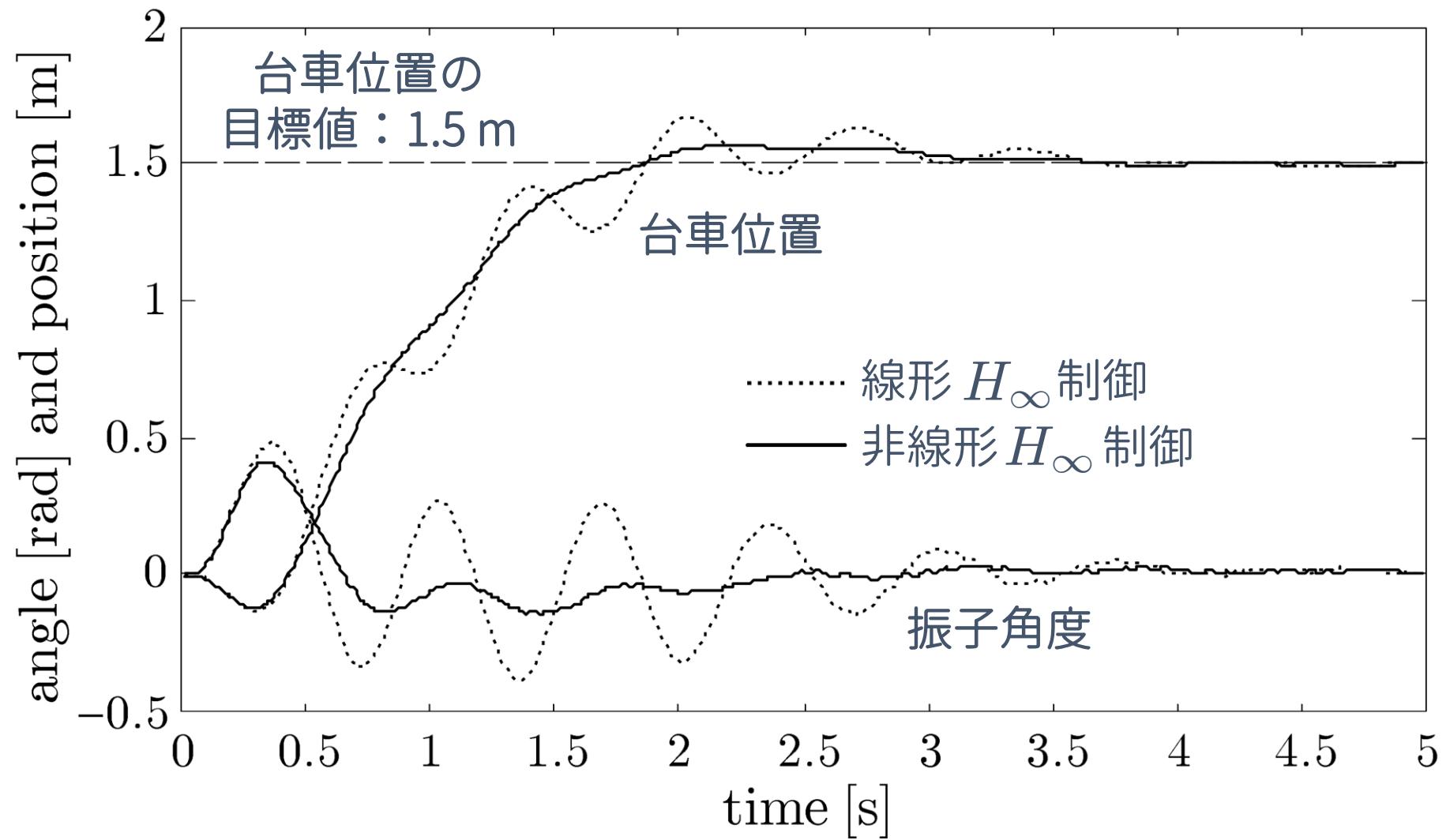
ルーズリーフに下手くそな図面を手描きし、
実習工場の職員に相談し、空き時間に
マシニングセンタで加工してもらう！



できた！



おそらく
世界初！



- 川田, 島津, 井上 : 倒立振子システムの非線形 H_∞ 状態フィードバック制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 35, No. 2, pp. 294-296 (1999)
- 川田, 島津, 井上 : Hamilton-Jacobi 方程式に基づく非線形 H_∞ 制御の近似実現, システム制御情報学会論文誌, Vol. 11, No. 7, pp. 401-410 (1998)

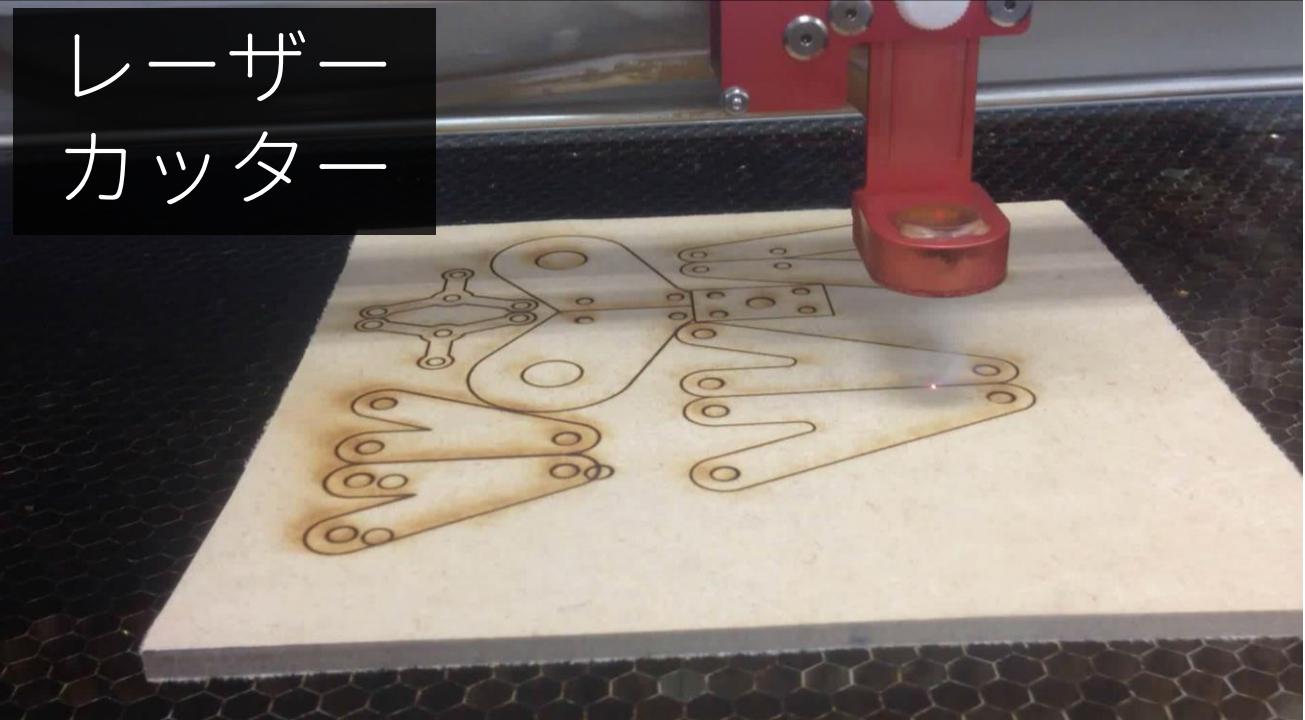


1998.4-2022.3 電子制御工学科 教員

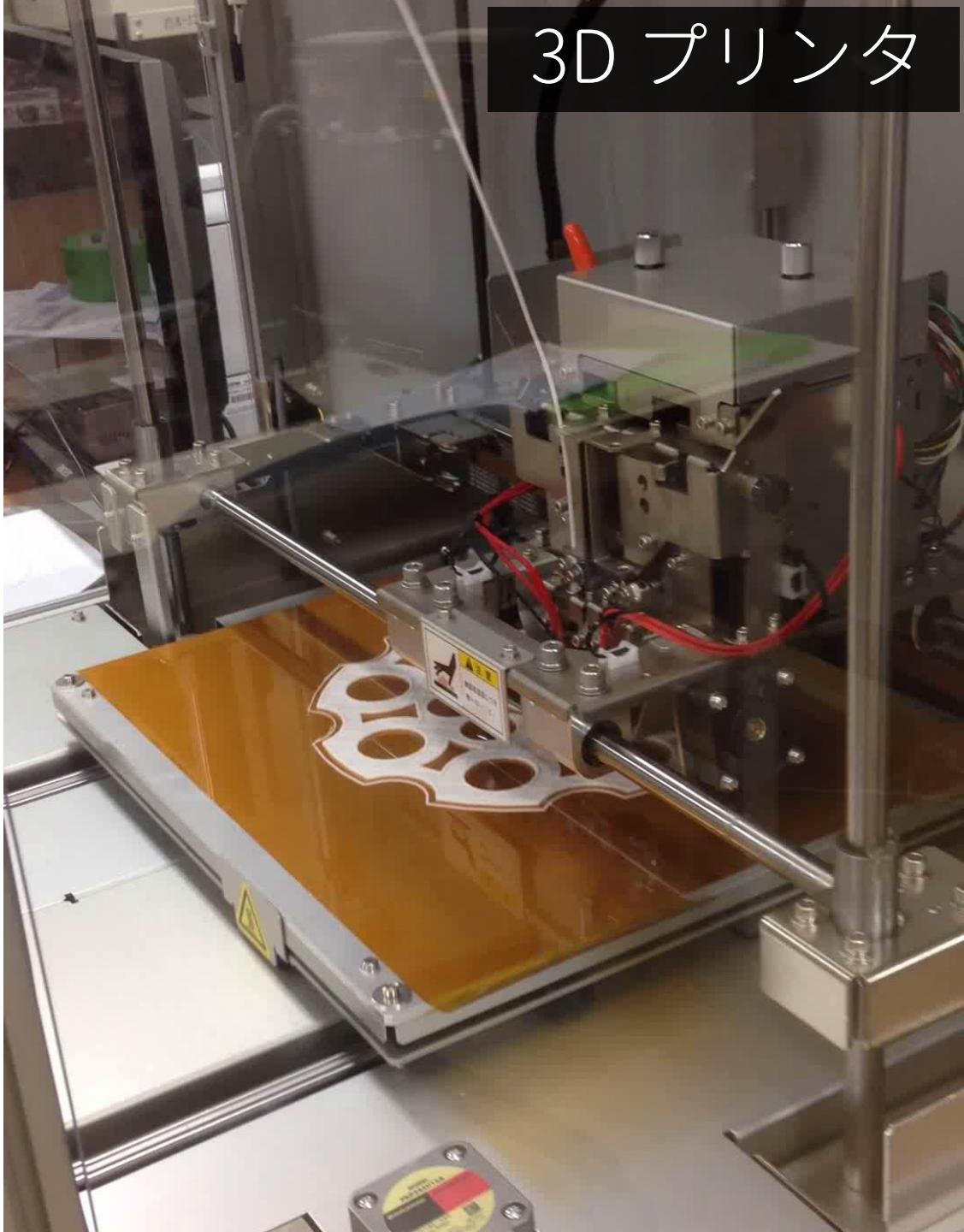
高専の学生はモノづくりが好き！
(であることが多い)



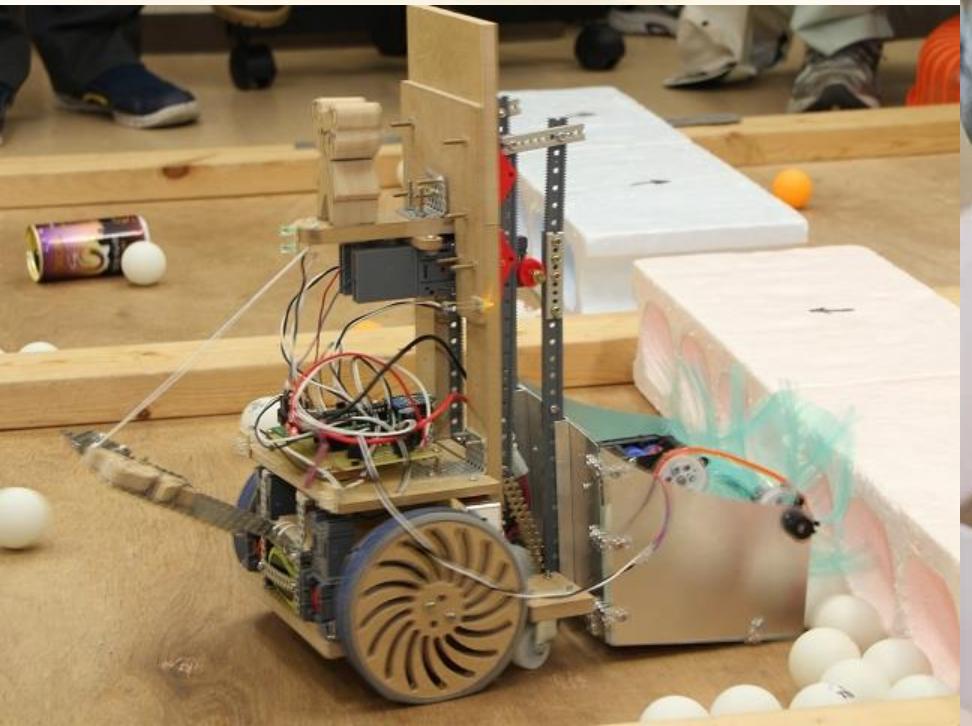
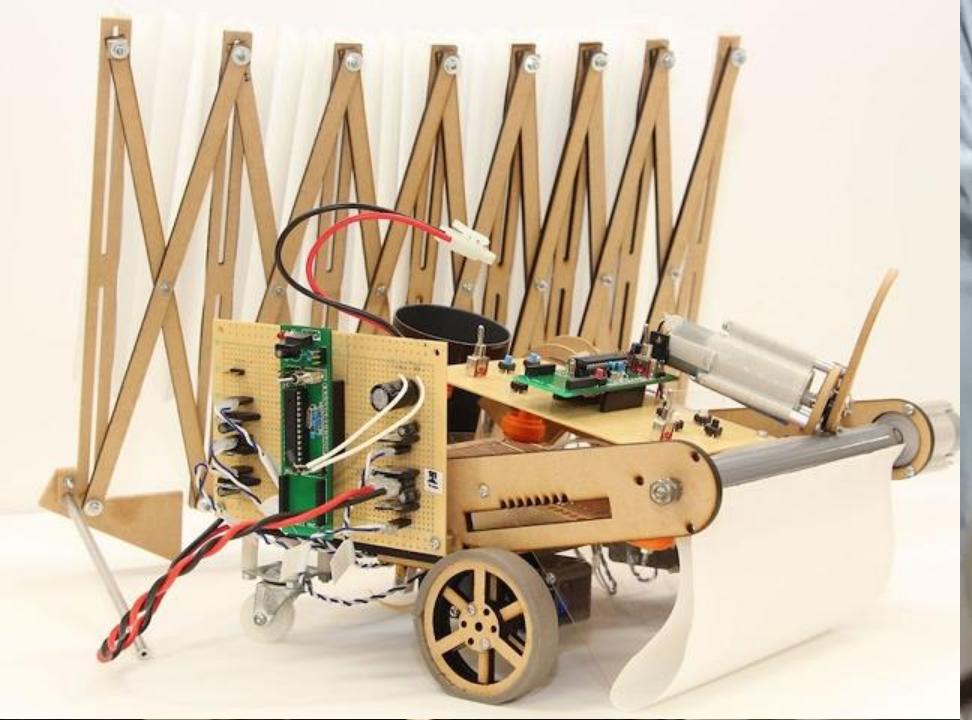
旋盤



レーザー
カッター



3D プリンタ





1998.4-2022.3 電子制御工学科 教員

ということで、
学生に**様々なタイプの倒立振子**を
作成してもらいました。



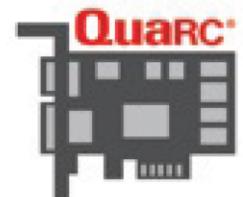
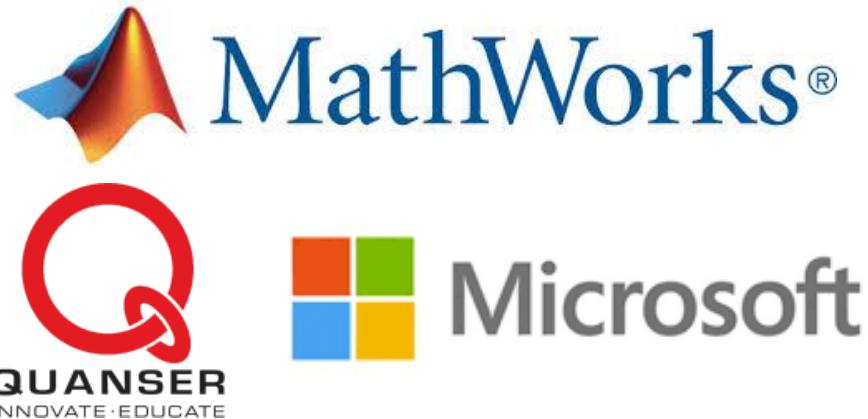
1998.4-2022.3 電子制御工学科 教員

MS-DOS 環境で C プログラミング

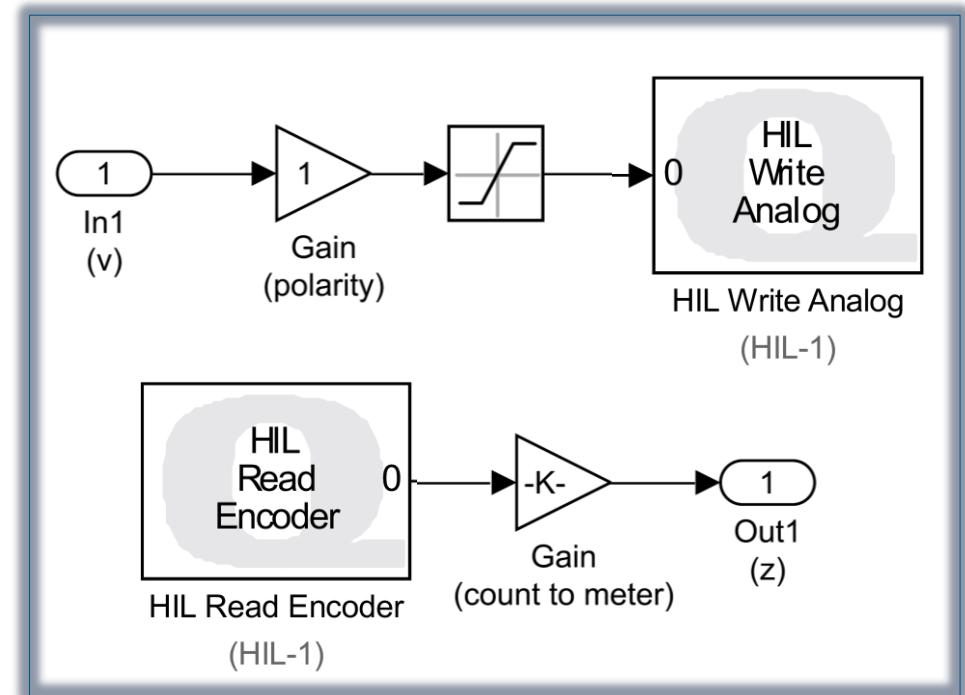
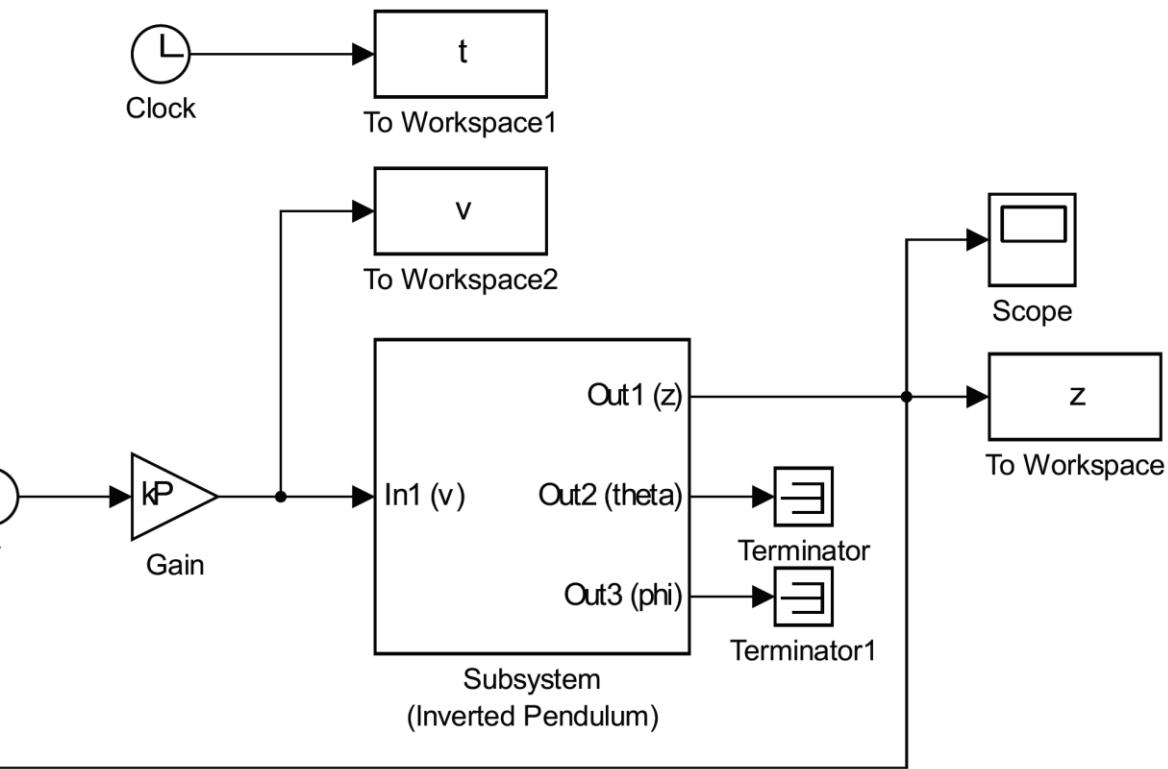
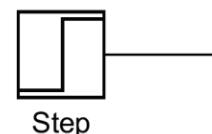
→ Windows 環境で
MATLAB/Simulink + QuaRC

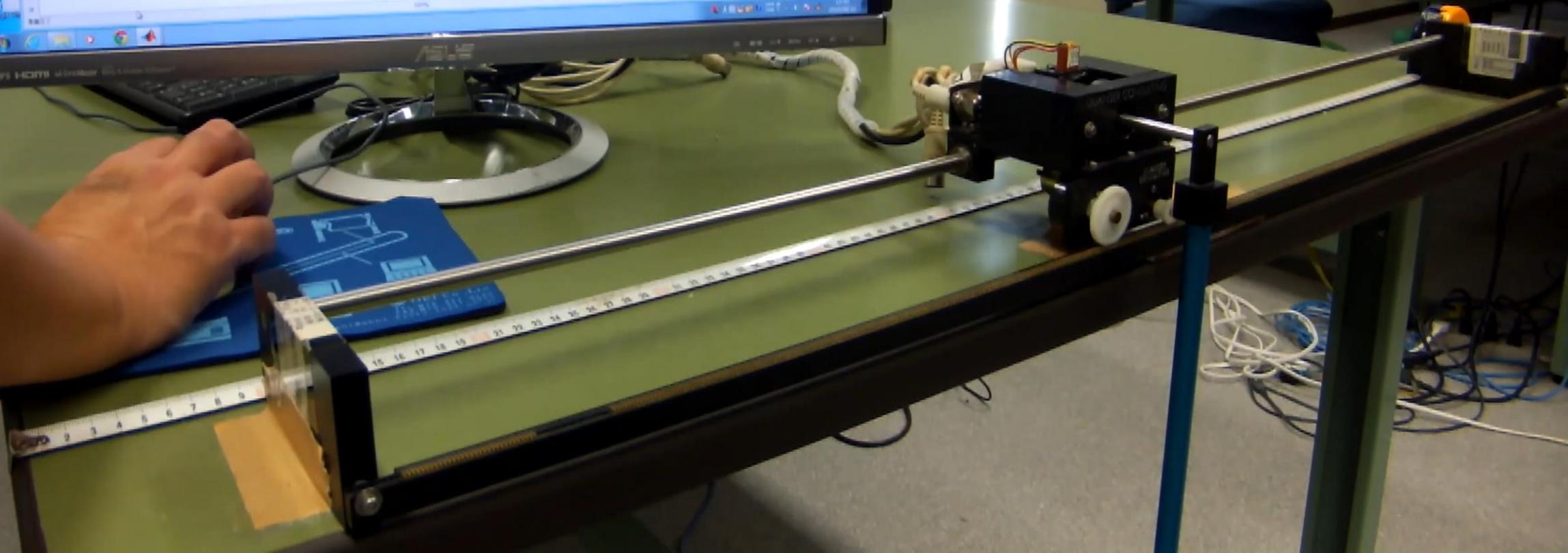
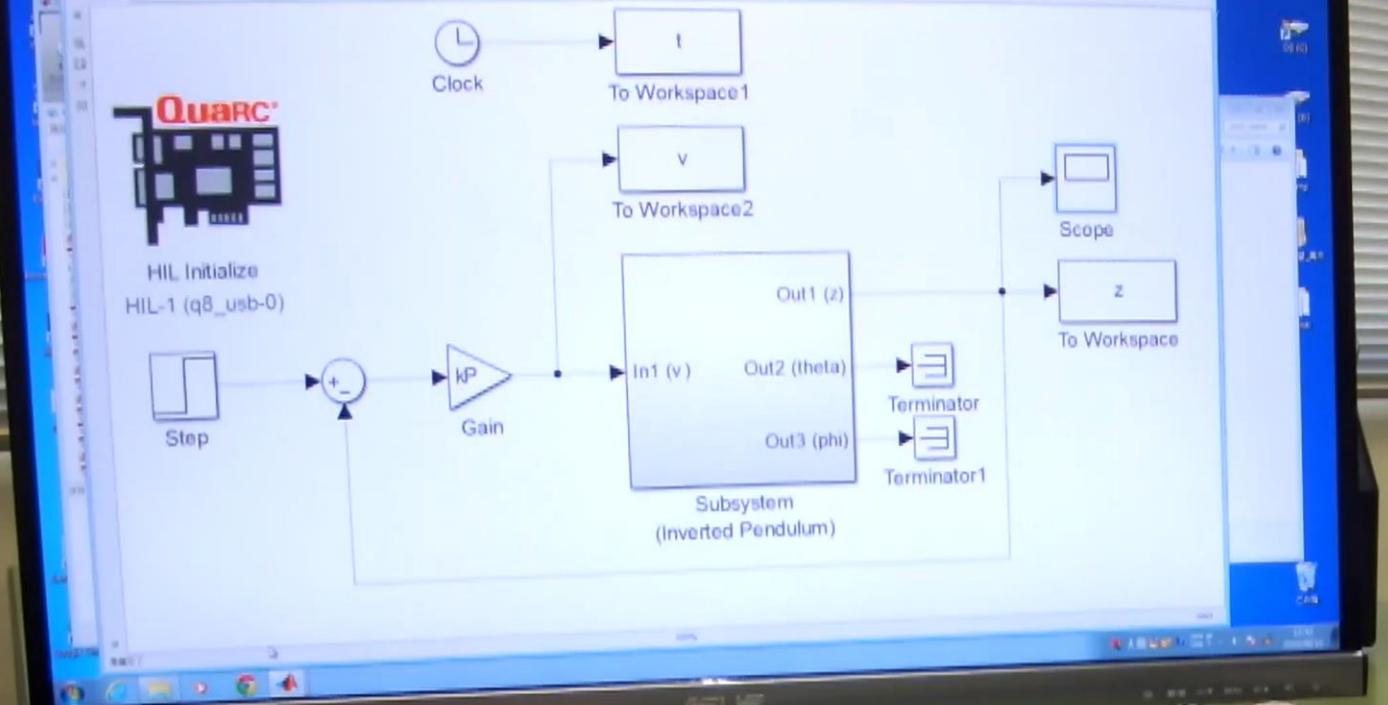
- 労力を少なくする！

- MATLAB/Simulink (MathWorks 社)
- QuaRC (Quanser 社)
- Visual C++ (Microsoft 社)



HIL Initialize
HIL-1 (q8_usb-0)



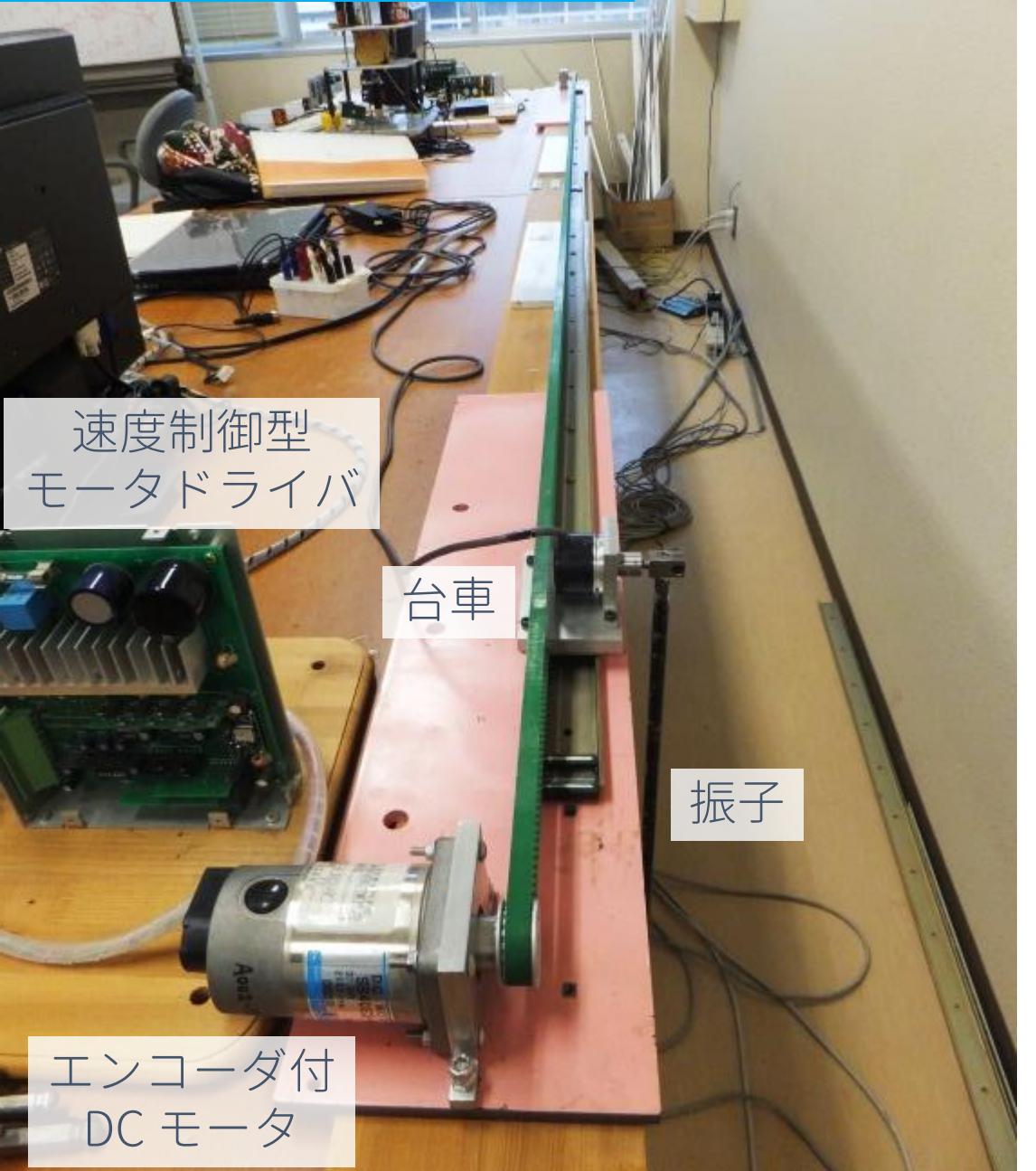




1998.4-2022.3 電子制御工学科 教員

それでは、学生たちが**製作した**
実験装置を少しだけ紹介します！

台車型倒立振子



LMIによる口バスト制御

棒：長い、おもり：最下端



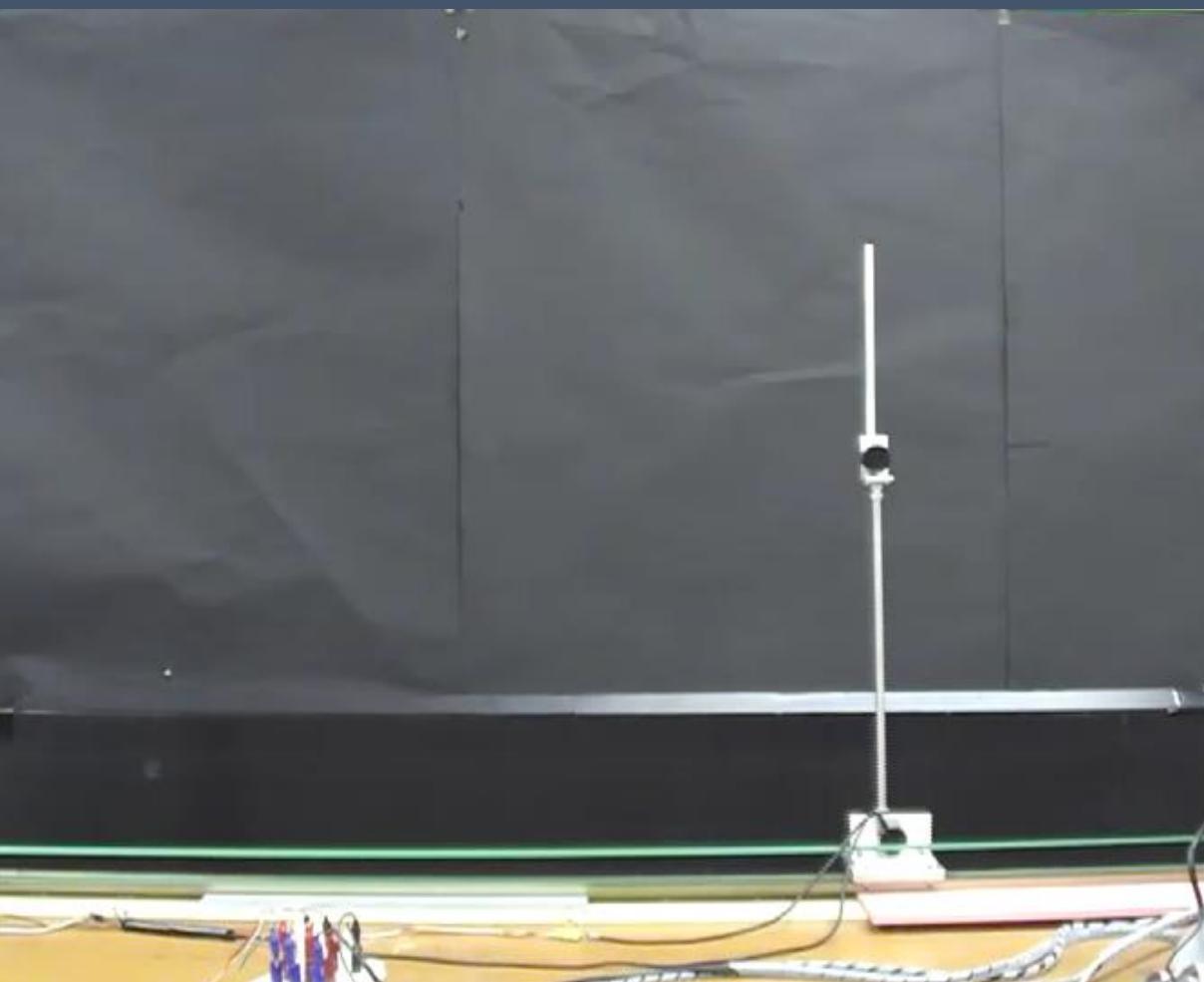
棒：長い、おもり：最上端



台車型直列二重倒立振子

最適レギュレータ

第2振子の長さ：公称値



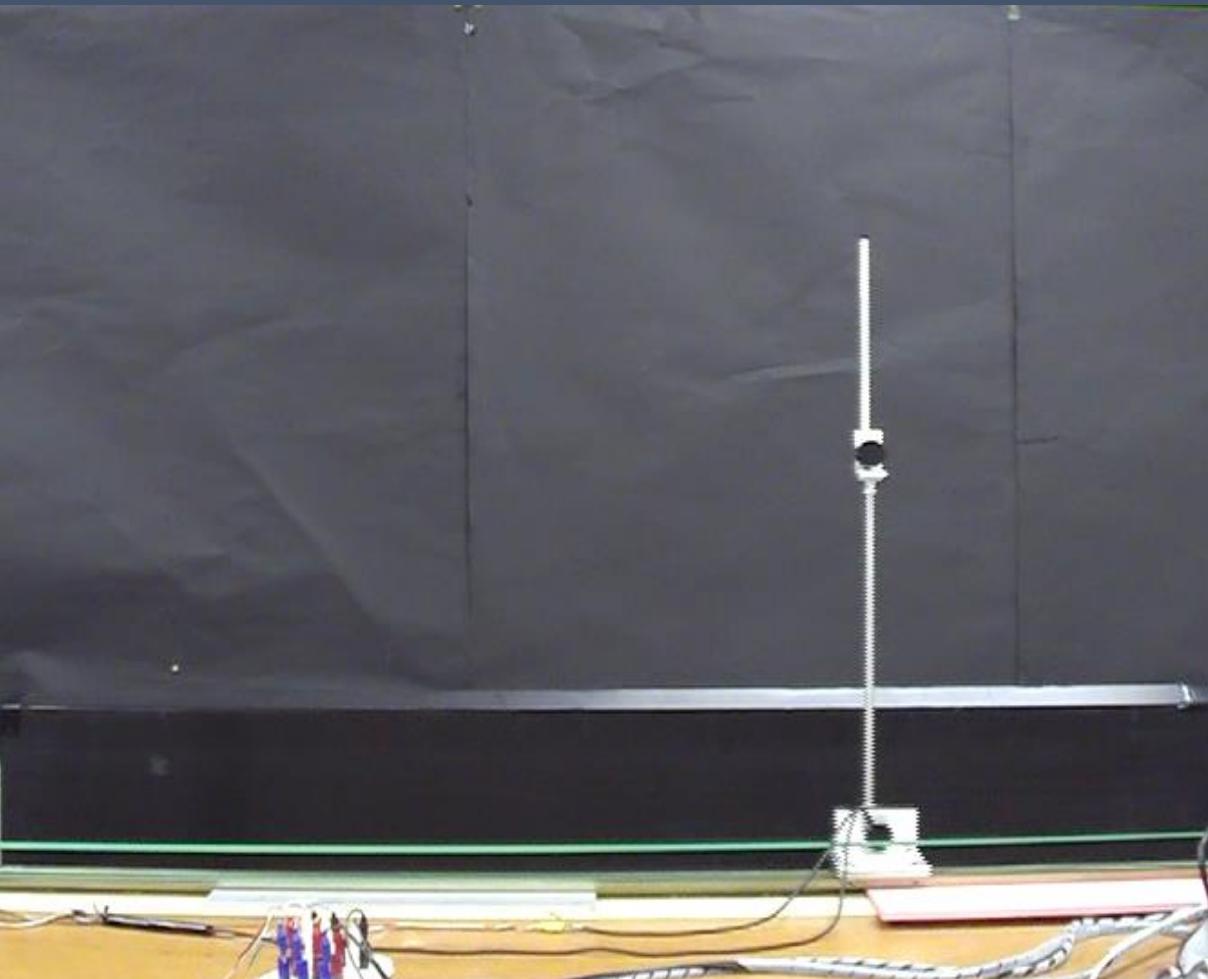
第2振子の長さ：公称値と異なる



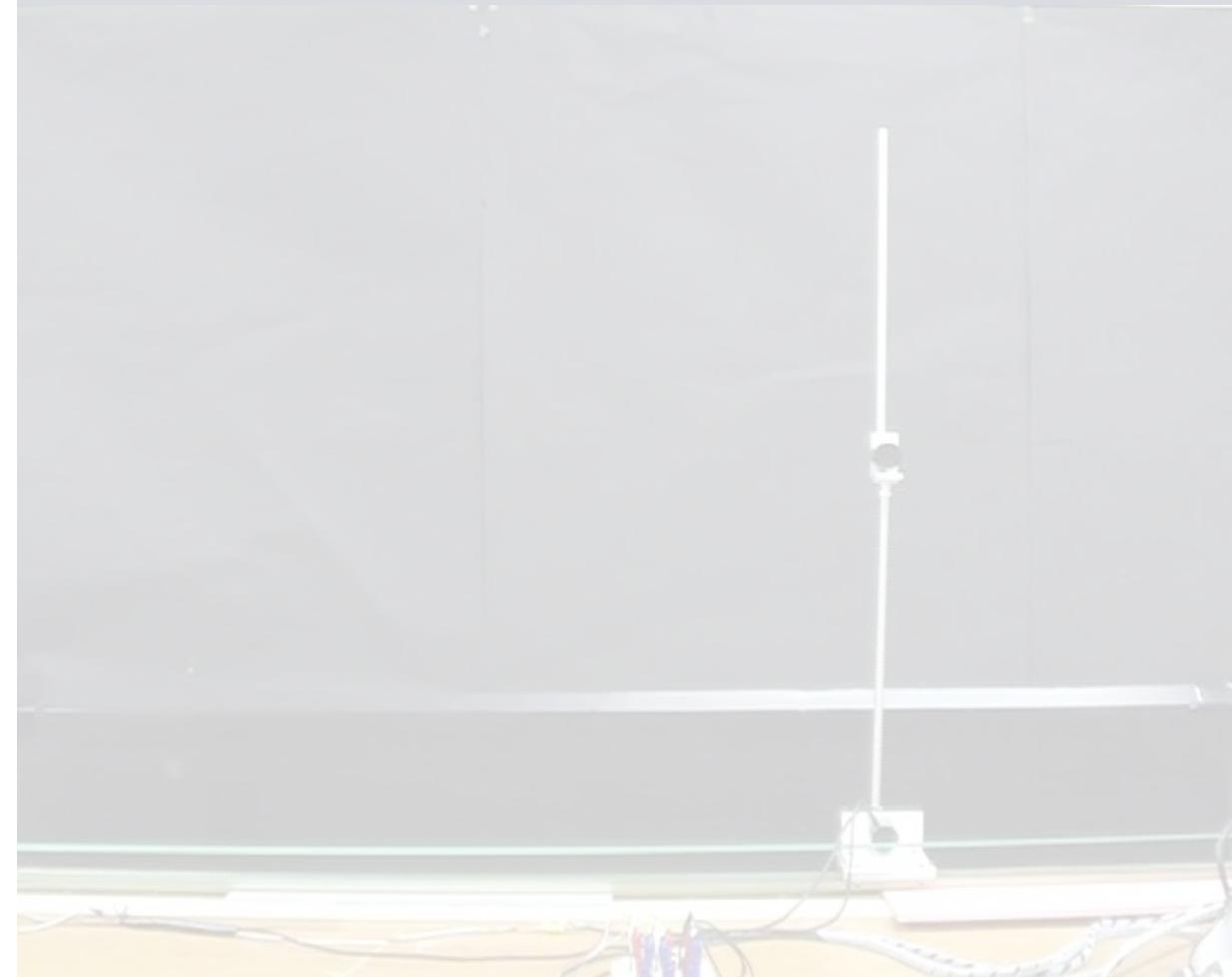
台車型直列二重倒立振子

LMIによる多目的制御

第2振子の長さ：公称値



第2振子の長さ：公称値と異なる



アーム型倒立振子 (up/up)

線形最適レギュレータ

アーム角が
大きいと発散



ゲインスケジューリング制御

アーム角が
大きくても安定



シーソー型倒立振子

LMIによる多目的制御

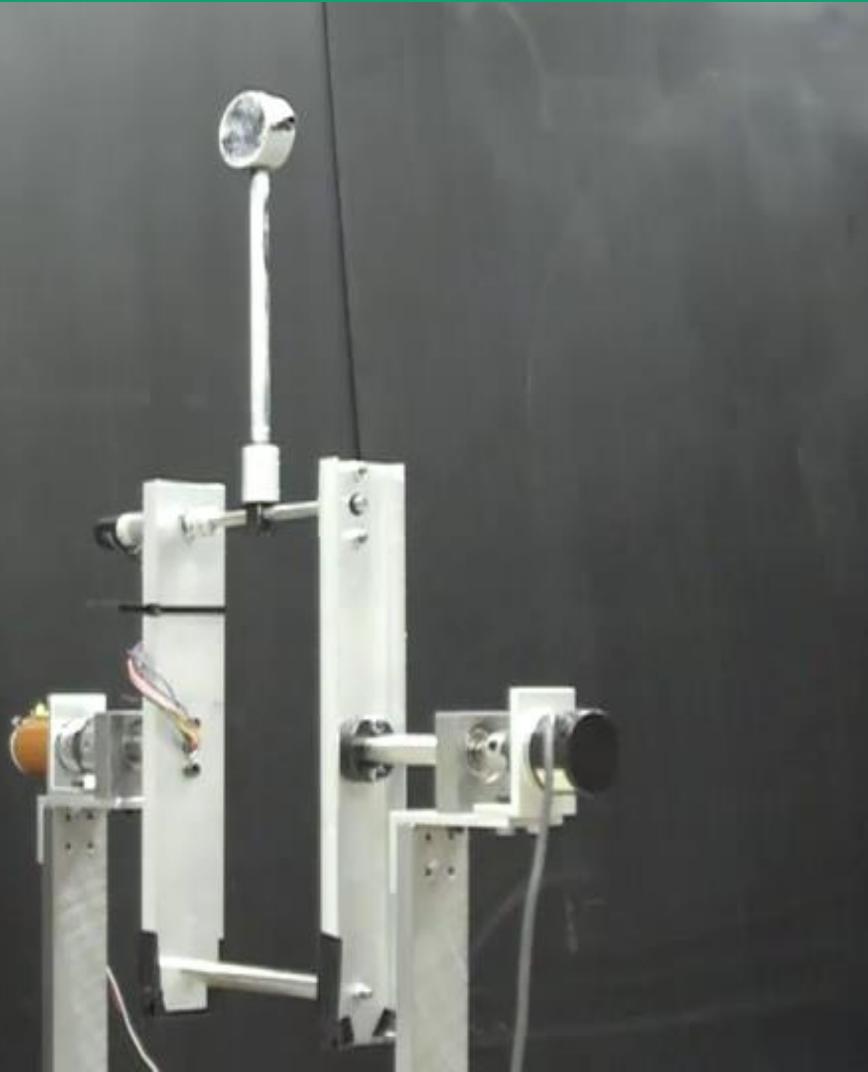
- はじめは台車位置とシーソー角のみを制御
(振子は無制御)
- 振子を手で持ち上げた後、振子角の制御を開始！



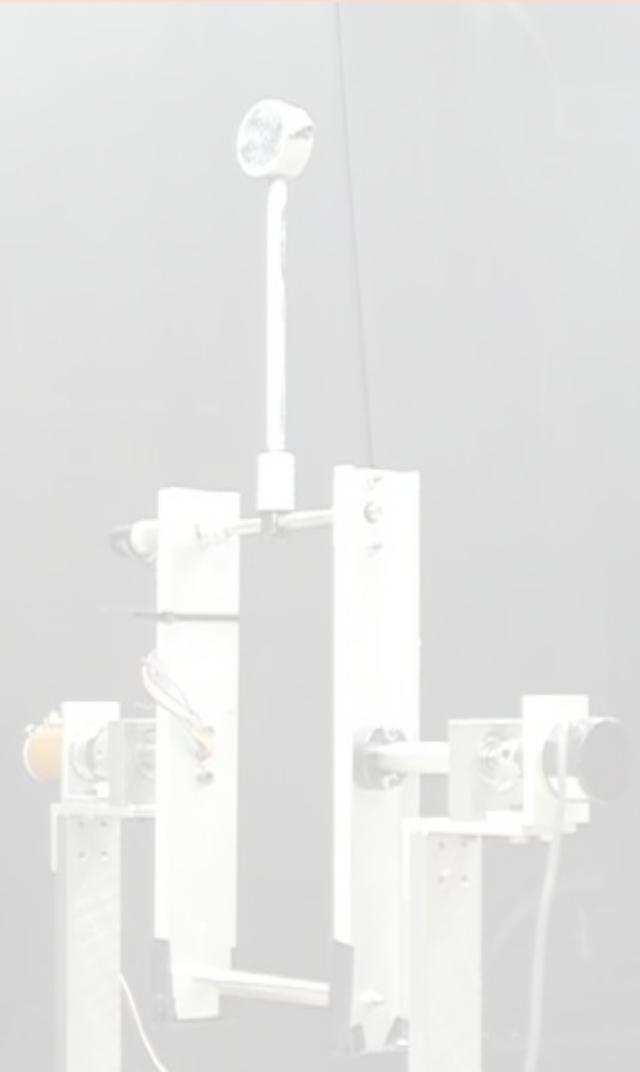
アクロボット (up/up)

受動リンクの目標角度：40 [deg]

線形最適レギュレータ



SDRE 法



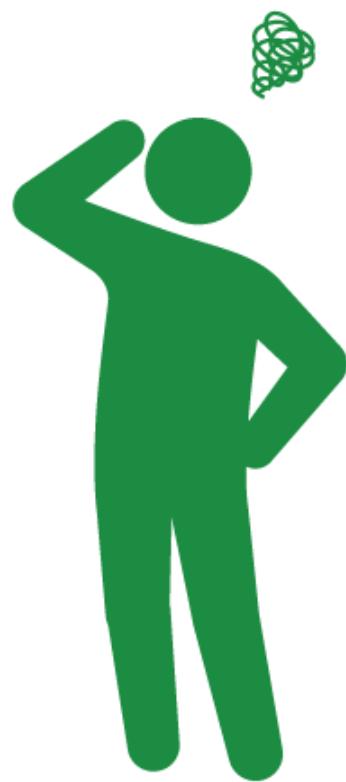
いまさらながら

「倒立振子」って良い教材じゃね？

- 倒立を成功させるためのプロセスにいろいろな知識が必要！

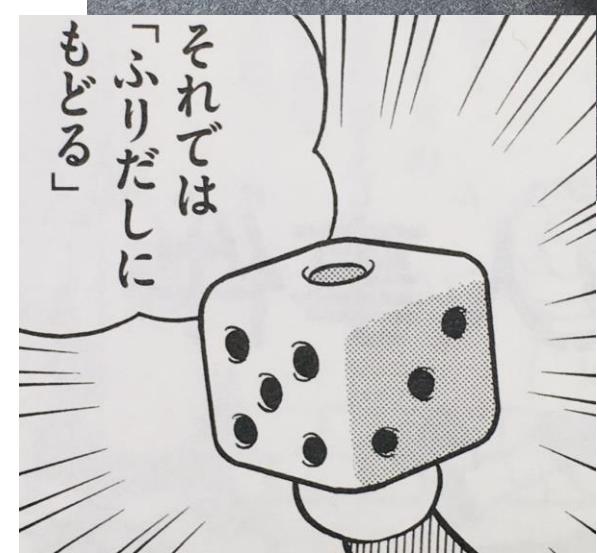
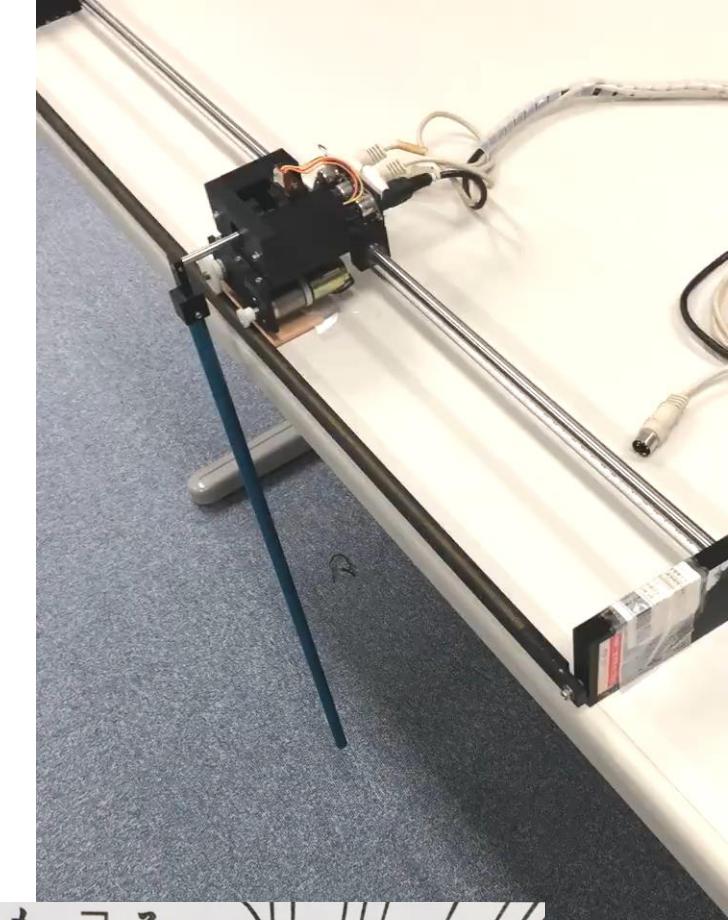
モデリング 信号処理 最小2乗法
1・2次遅れ系 フィルタ処理 離散化
PID 制御 現代制御 etc

でも…

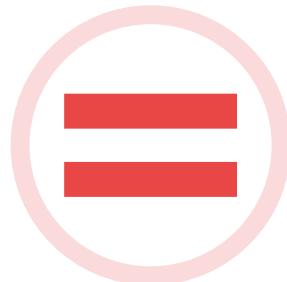


ヨワヨワな私は、
お金ないし…
機械加工できないし…
プログラムとかわからんし…
家でも実機を動かしたいし…

簡単に作れないかなあ



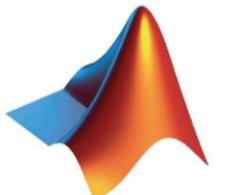
「制御工学」を 実践的に学ぶための教材



mindstorms
EV3



MATLAB®
&SIMULINK®



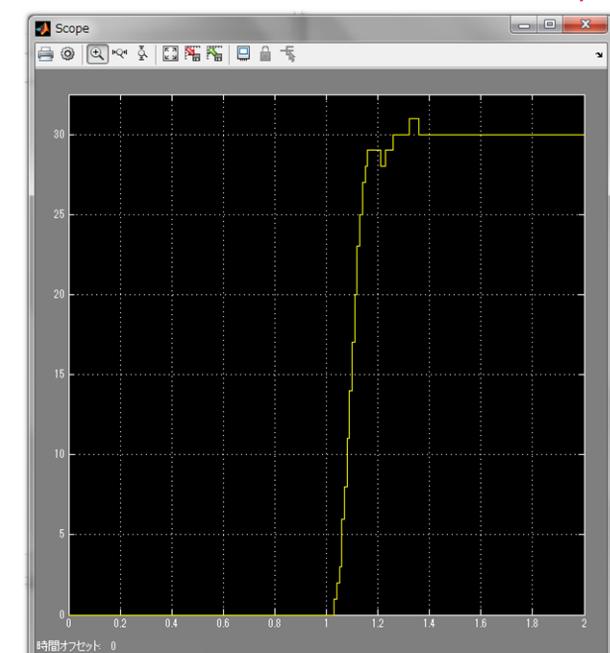
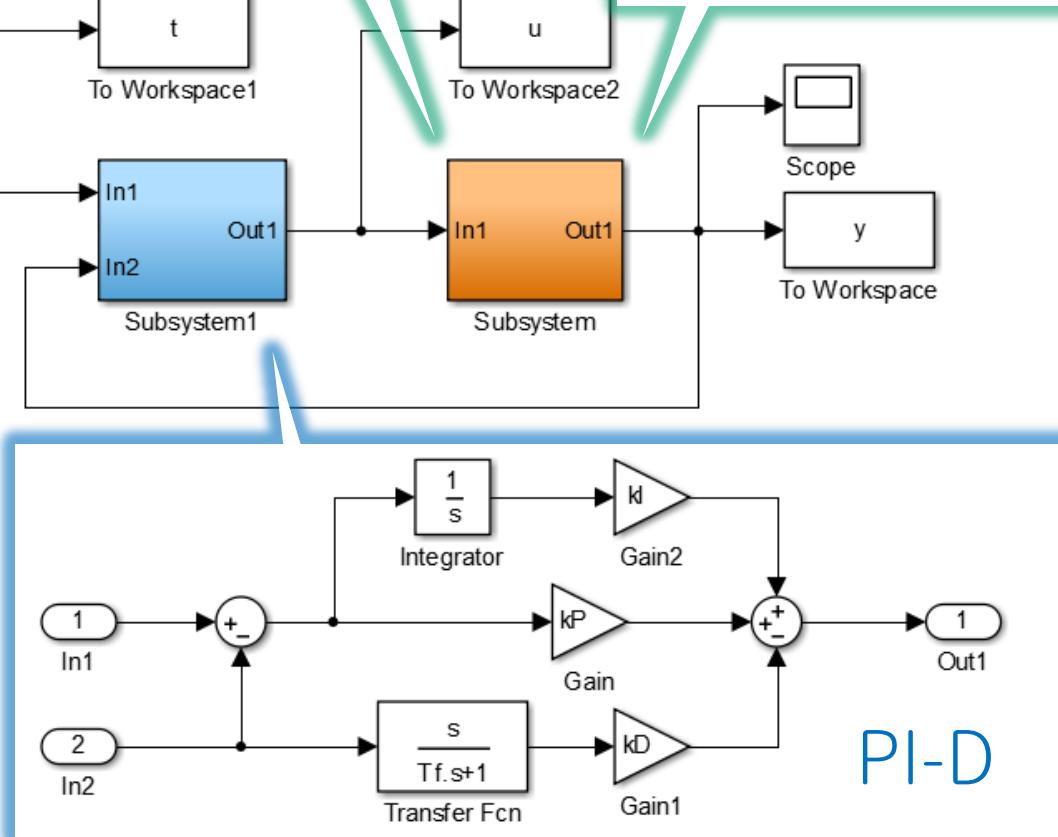
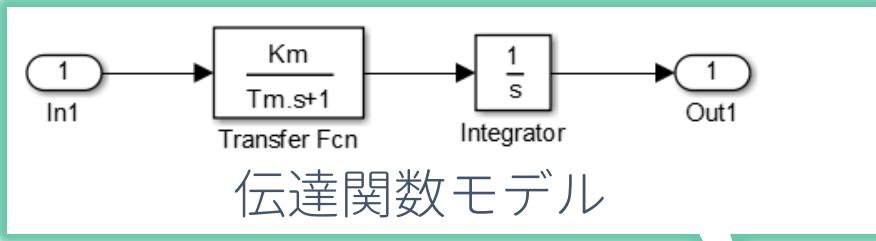
LEGO なので…

- 組み立てが**簡単！**
- 暴走しても**ケガの心配がない！**
- 市販の教育用実験装置と比べると**安価！**
- **家でも動かせる！**



Simulink なので…

シミュレーション(数値実験)



2013

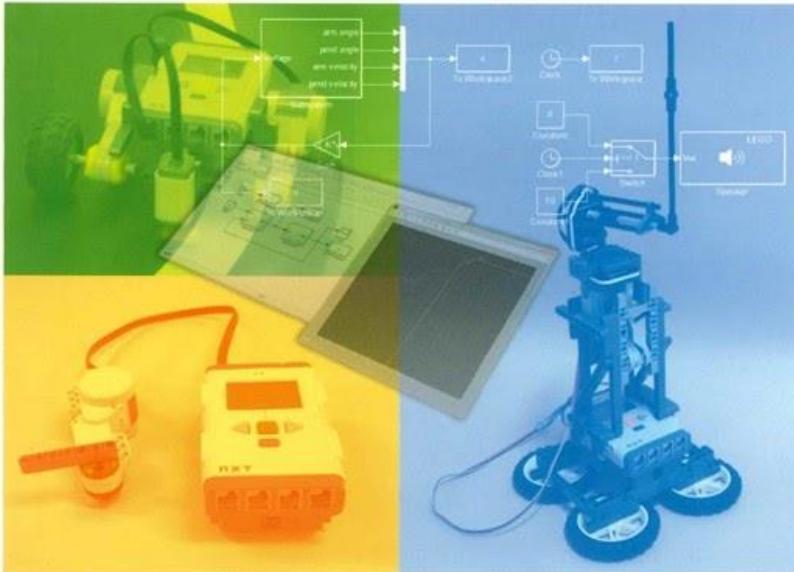
TechShare



MATLAB®
and Simulink®
examples

MATLAB/Simulinkと実機で学ぶ 制御工学 —PID制御から現代制御まで—

■ LEGO MINDSTORMS NXTによる制御実験



川田 昌克 著

計測と制御, Vol. 54, No. 3, pp. 192-195

2015

事例紹介：特集

制御教育のための教材 – 理論・実験両面からの提案

LEGO MINDSTORMS を利用した 回転型倒立振子の開発

川田 昌克*

* 独立行政法人国立高等専門学校機構 舞鶴工業高等専門学校
京都府舞鶴市字白屋 234

* National Institute of Technology, Maizuru College, 234 Aza Shiroya,
Maizuru, Kyoto, Japan

* E-mail: kawata@maizuru-ct.ac.jp

キーワード：倒立振子 (inverted pendulum), レゴマインドストーム EV3(LEGO MINDSTORMS EV3), Simulink サポートパッケージ (Simulink support package).
JL 0003/15/5403-0192 ©2015 SICE

1. まえがき

LEGO MINDSTORMS は LEGO 社とマサチューセッツ工科大学により共同開発された教育用ロボット玩具のキットであり、テクニックパーツ以外に、モータ、センサやインテリジェントブロックなどが含まれている。容易に筐体を組み立てることができるので、小学校から大学までの幅広い教育現場や企業研修で活用されている¹⁾。

LEGO MINDSTORMS は第一世代の RCX が 1998 年 9 月に発表されて以来、第二世代の NXT (2006 年 8 月)、第三世代の EV3 (2013 年 9 月) へと発展している。NXT や EV3 は付属するモータがロータリエンコーダ (角度センサ) を内蔵するサーボモータであるので、容易にモーションコントロールを実現できる。しかし、このサーボモータの形状やバックラッシュが大きいという構造的な問題と、LEGO 社純正のセンサの種類の少なさが要因で、「制御工学」の教育に活用した事例は少ない^{2)~4)}。そこで、筆者は、NXT だけでなく LEGO Power Functions のモータや、サードパーティの角度センサを併用することで、回転型倒立振子を製

た⁵⁾。ソフトウェアとしては、「制御工学」の分野で標準的な MATLAB の Simulink サポートパッケージを利用し、Simulink モデルから NXT を直接的に駆動している。

本稿では、文献 5) で提示した NXT ベースで開発された回転型倒立振子を、EV3 に拡張した事例を紹介する⁶⁾。

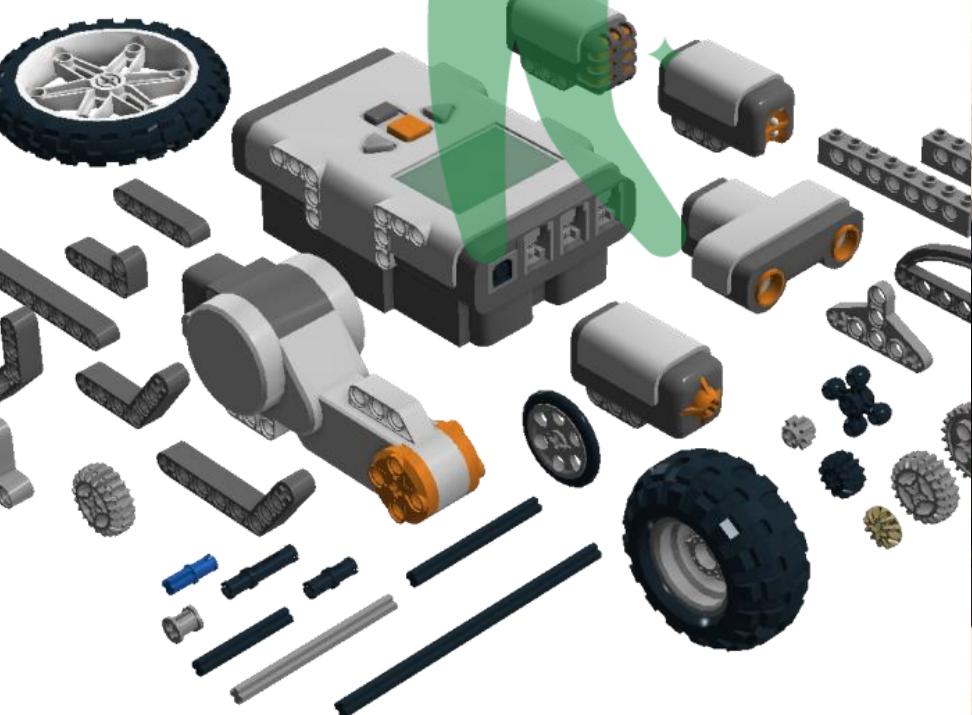
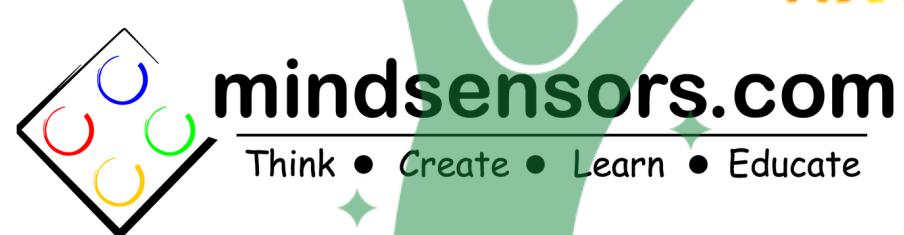
2. MINDSTORMS とその周辺

2.1 インテリジェントブロック

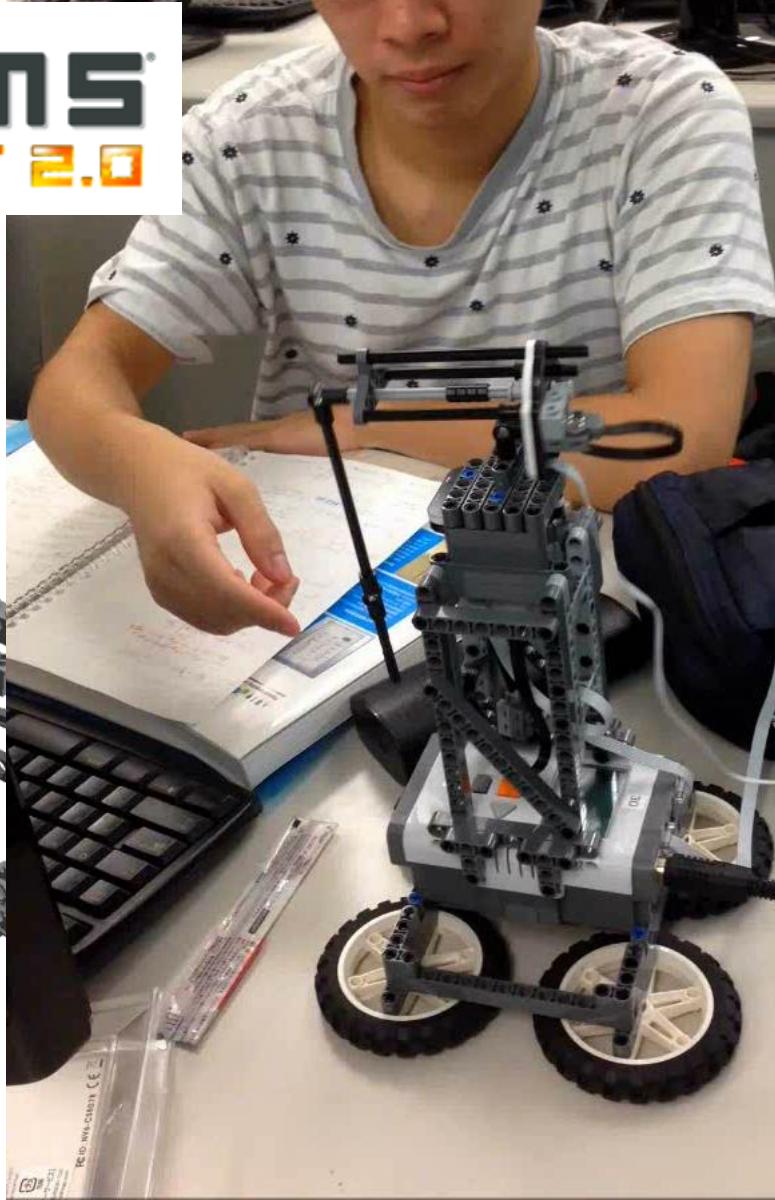
NXT と EV3 のインテリジェントブロックの性能を比較したものを表 1 に示す。

パソコンとインテリジェントブロックとの通信方式は、NXT、EV3 ともに USB と Bluetooth がサポートされている。さらに、EV3 はインテリジェントブロックの USB ポートに Wi-Fi ドングル (無線) かもしくは Ethernet アダプタ (有線) を取り付けることで、LAN を利用した通信が可能である^(注1)。ただし、本稿で利用する Simulink サポートパッケージでは、各モード^(注2)に応じて

- NXT (ノーマルモード) : USB もしくは Bluetooth
- NXT (エクスチューナルモード) : USB と Bluetooth の



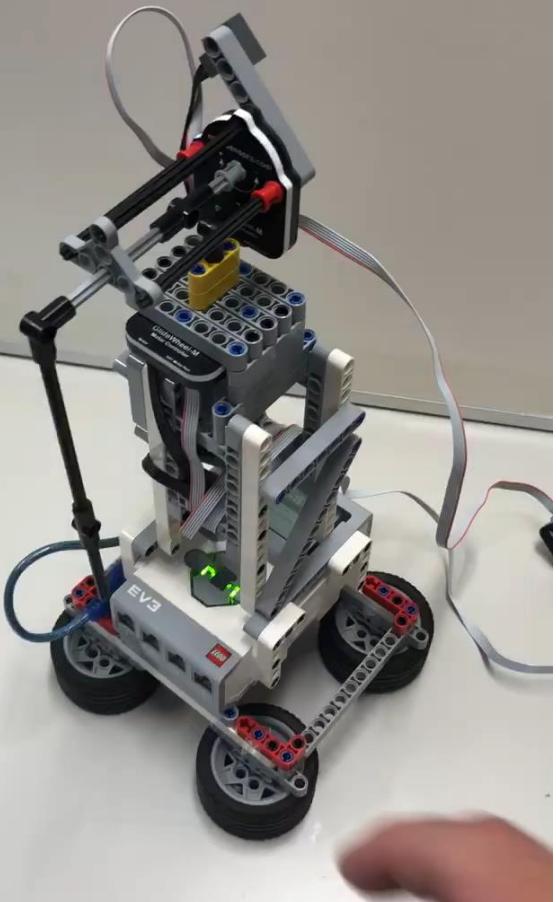
舞鶴高専専攻科



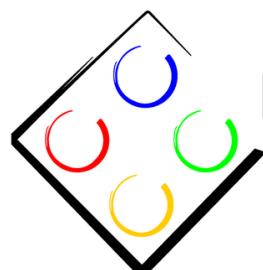


LEGO mindstorms
EV3

回転型倒立振子



神戸大・高知高専

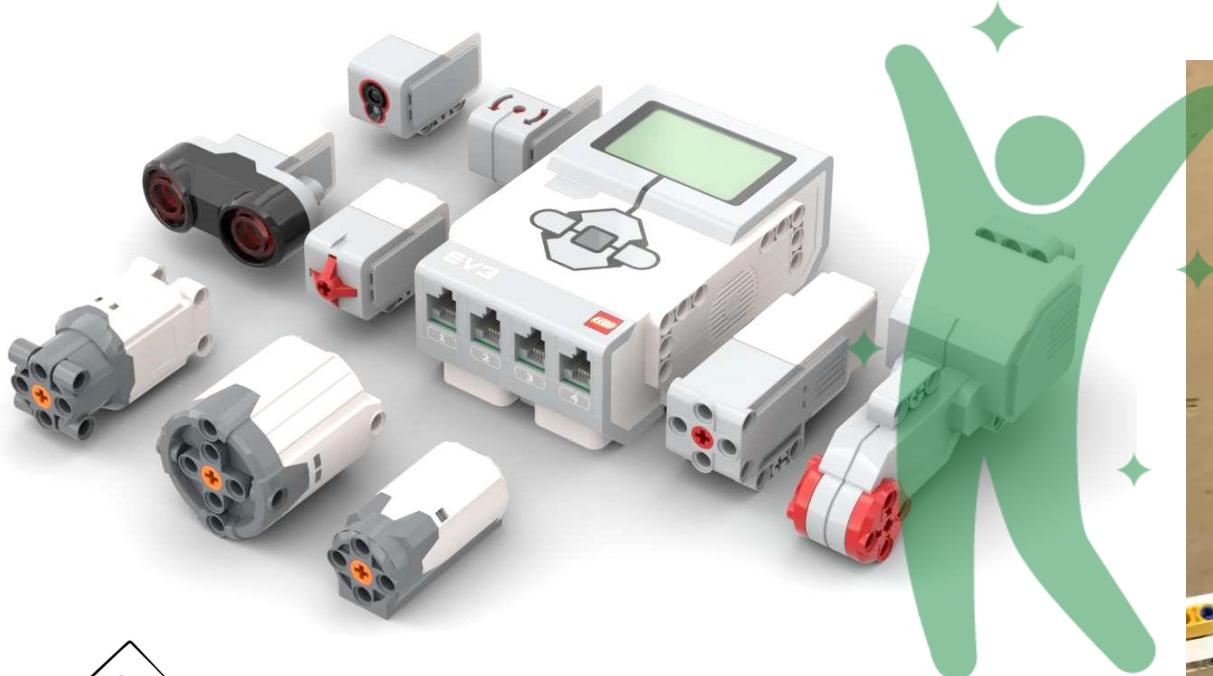


mindsensors.com
Think • Create • Learn • Educate

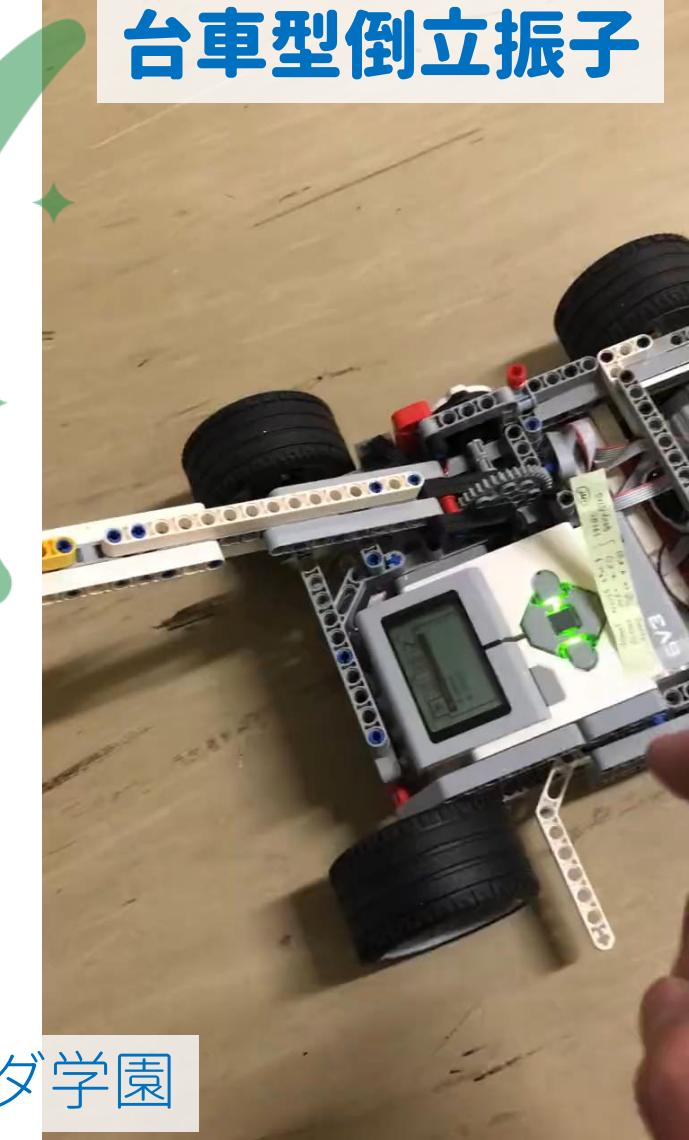


エンコーダ

ホンダ学園



台車型倒立振子

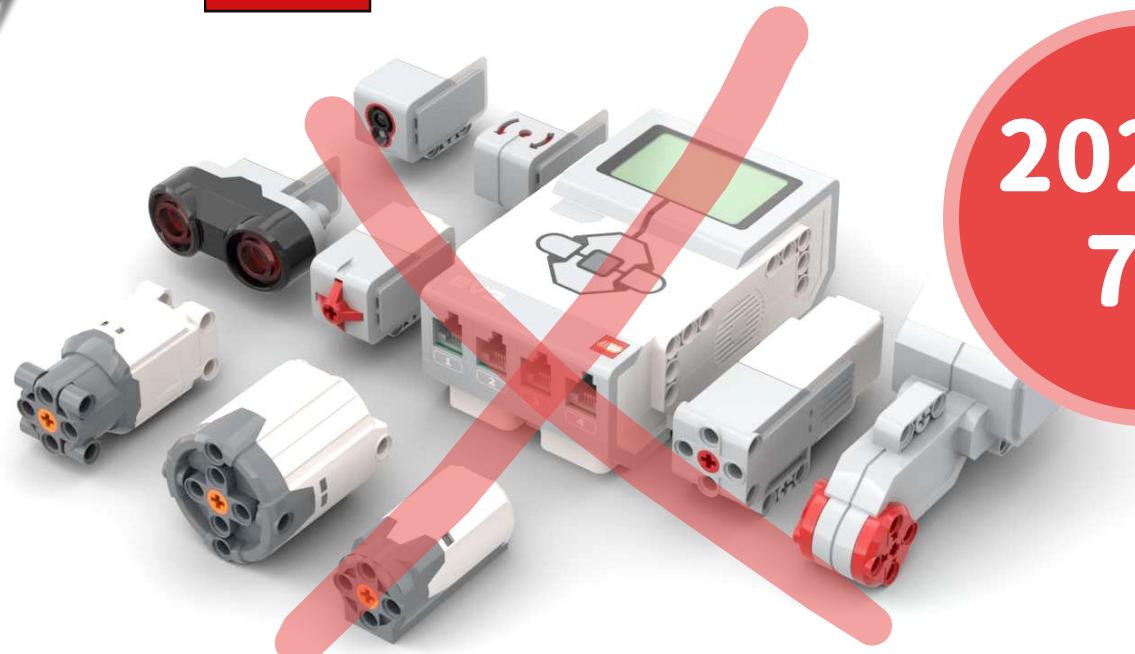




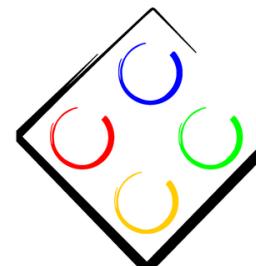
LEGO mindstorms
EV3

しかし ...

製造終了



2021年
7月



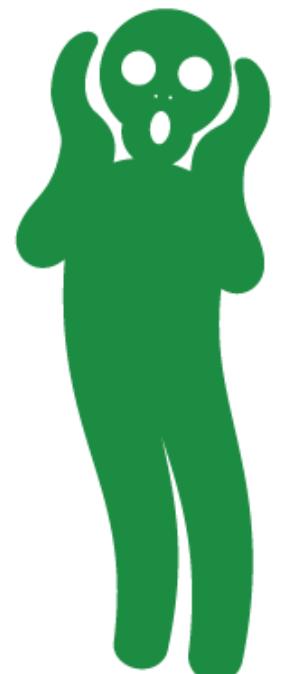
mindsensors.com

Think • Create • Learn • Educate

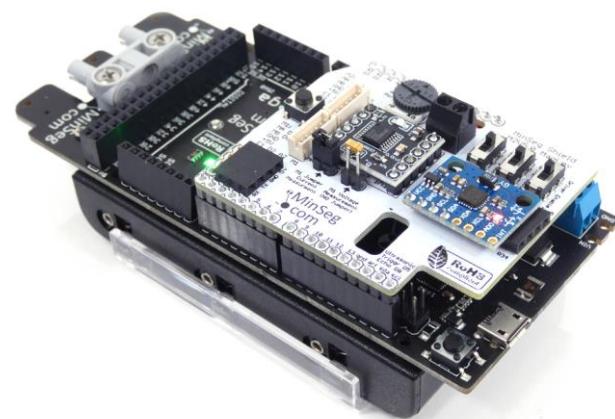
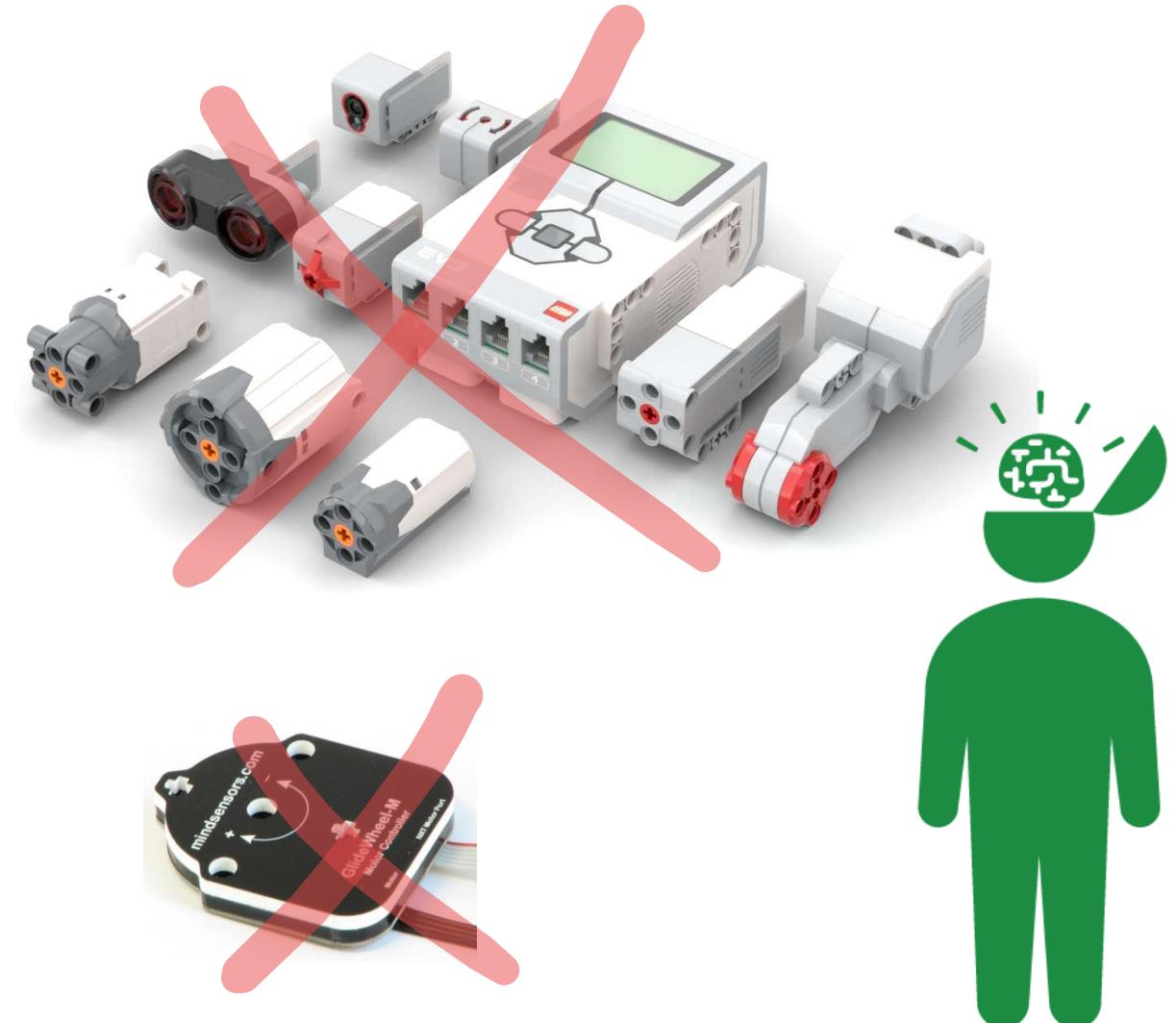


2021年
以前

エンコーダ



そこで…



Arduino MEGA 互換ボード
+ MinSegShield
(モータドライバ、6軸センサ)



DFROBOT
DRIVE THE FUTURE



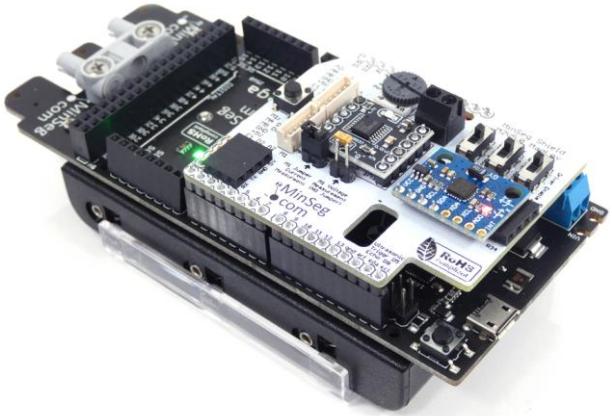
汎用

エンコーダ付モータ

Autonics



エンコーダ



MinSeg
com™

Arduino MEGA互換ボード
+ MinSegShield
(モータドライバ、6軸センサ)



DFROBOT
DRIVE THE FUTURE



エンコーダ付モータ

汎用

Autonics

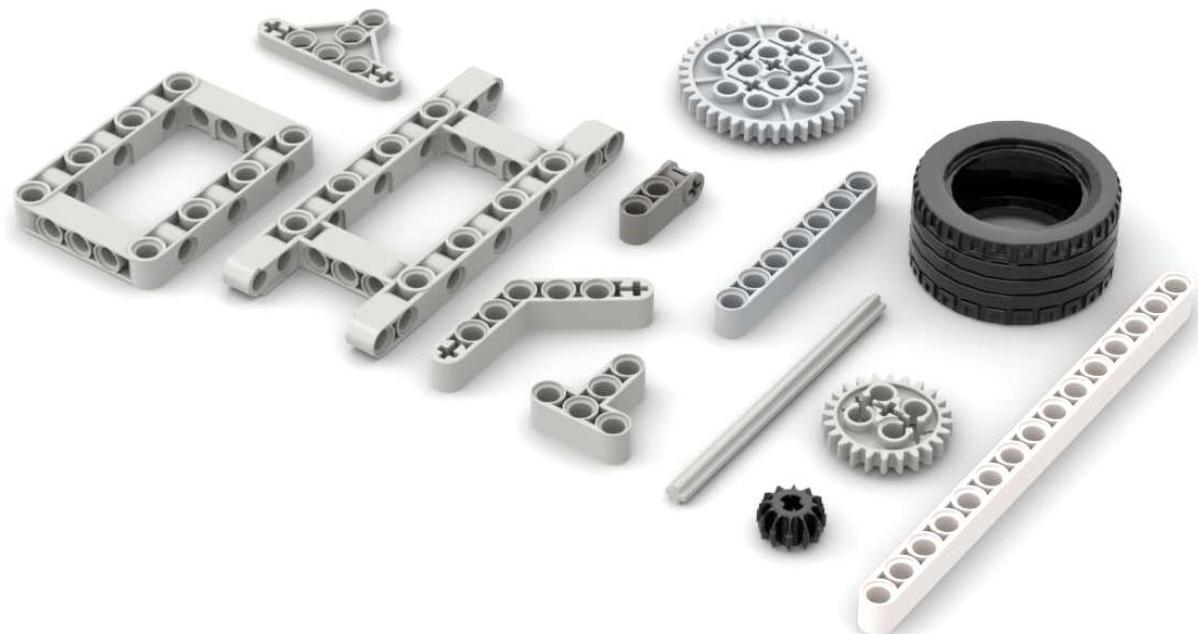


エンコーダ

ただし、**本体**は
LEGO 部品で製作！



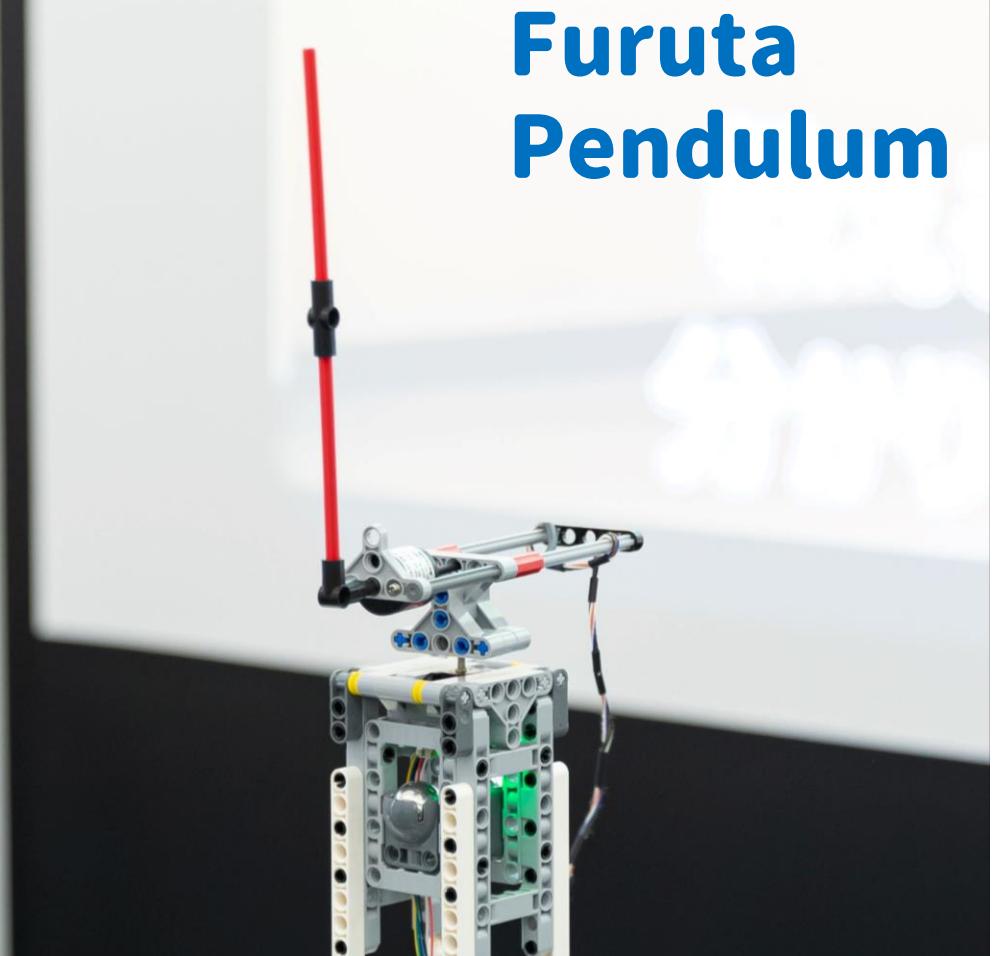
簡単



本講演では…

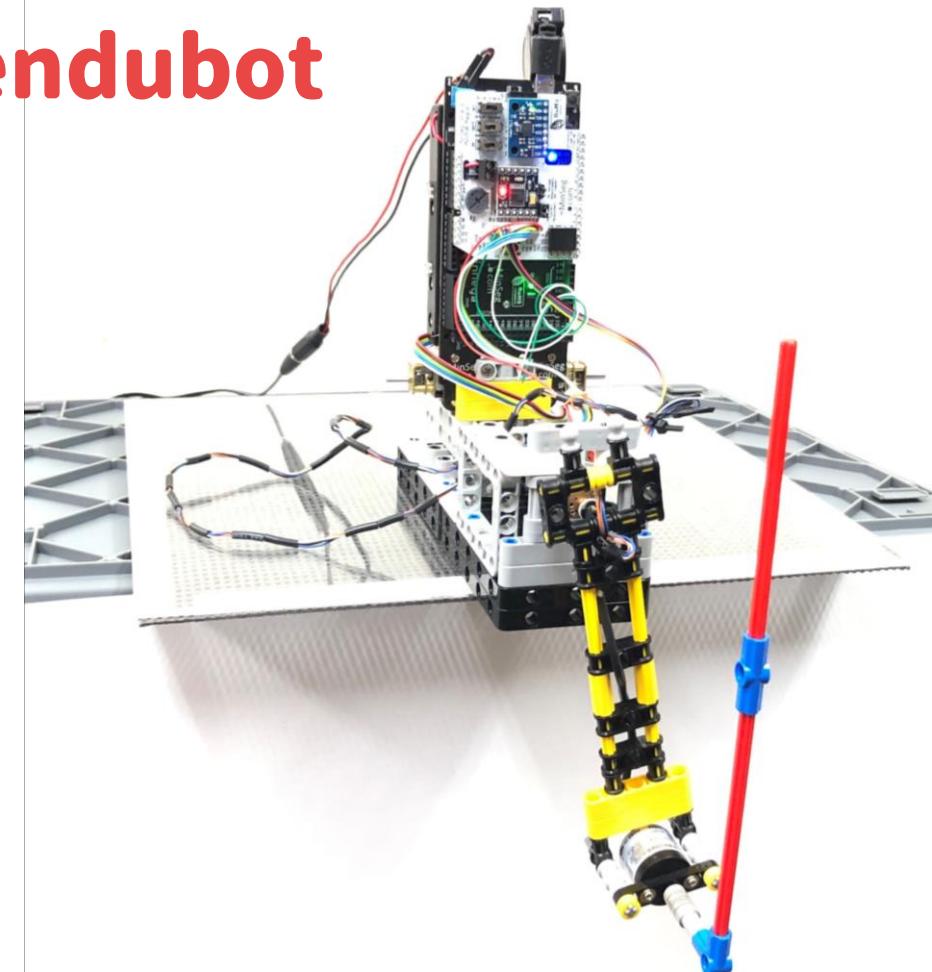
回転型 LEGO 倒立振子

Furuta
Pendulum



アーム型 LEGO 倒立振子

Pendubot



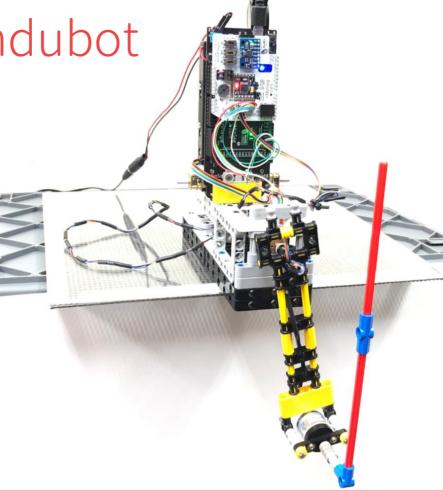
回転型 LEGO 倒立振子

Furuta
Pendulum



アーム型 LEGO 倒立振子

Pendubot



のレシピとそれを利用した
「制御工学」 の**学習**について
お話しします。

回転型 LEGO 倒立振子 (Furuta Pendulum)



機械工作が得意ではない私が
LEGO の部品を利用して
「回転型倒立振子」を
作ってみた話。

Qiita Ver.



電子工作が得意ではない私が
「回転型倒立振子」で使う
ケーブルを加工して
配線してみた話。

Qiita Ver.



機械屋さんではない私が
MATLAB を利用して
「回転型倒立振子」の
運動方程式を導出した話。

Qiita Ver.



制御屋さんの私が
MATLAB/Simulink を利用して
「回転型倒立振子」の
パラメータ同定をした話。

Qiita Ver.

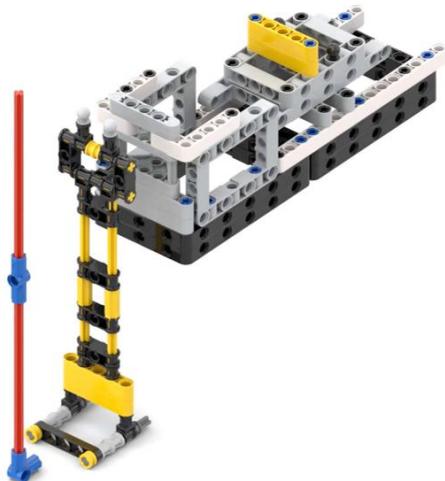


でレシピ、部品表、
MATLAB ファイル
や発表動画を公開！

アーム型 LEGO 倒立振子 (Pendubot)

MSCS 2023

制御工学を実践的に学ぶことができる
LEGO 倒立振子の開発



かーたー
@carter_control

Qiita



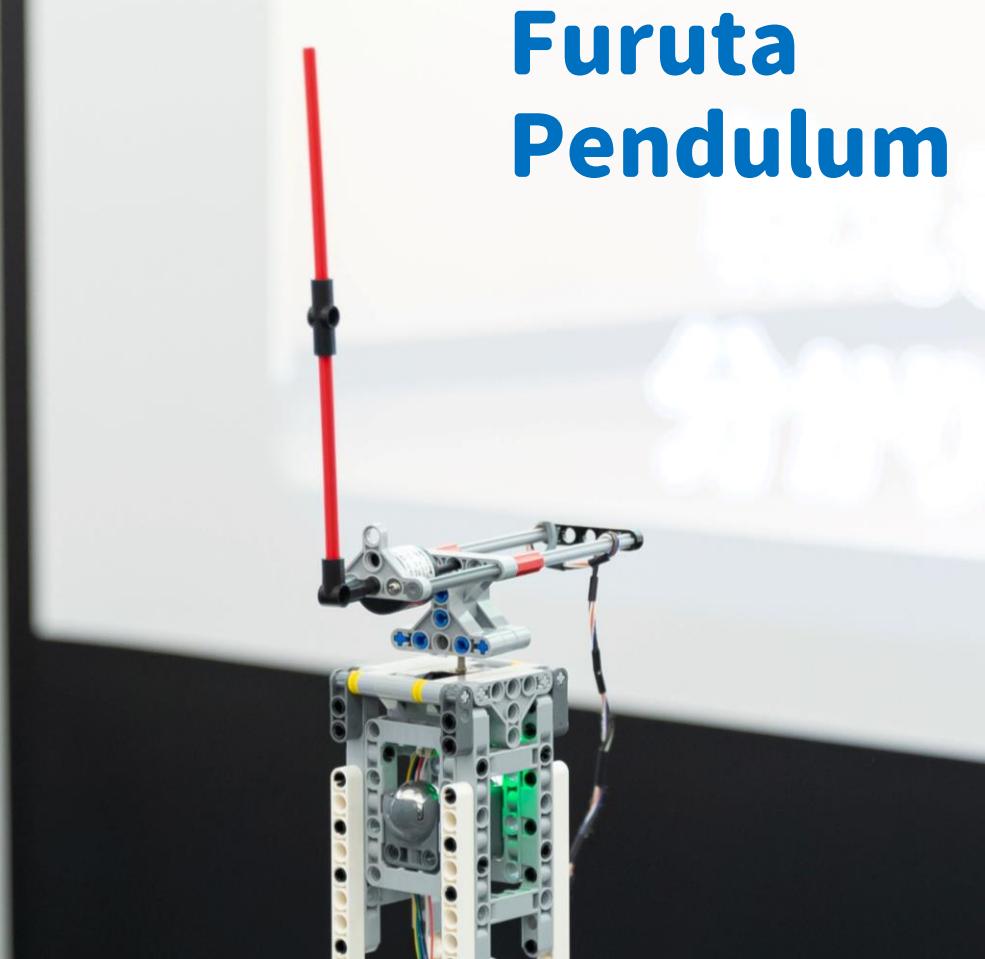
で発表動画や
部品表を公開！

とりあえず、デモ機を
動かしてみますね！

それぞれの特徴は？

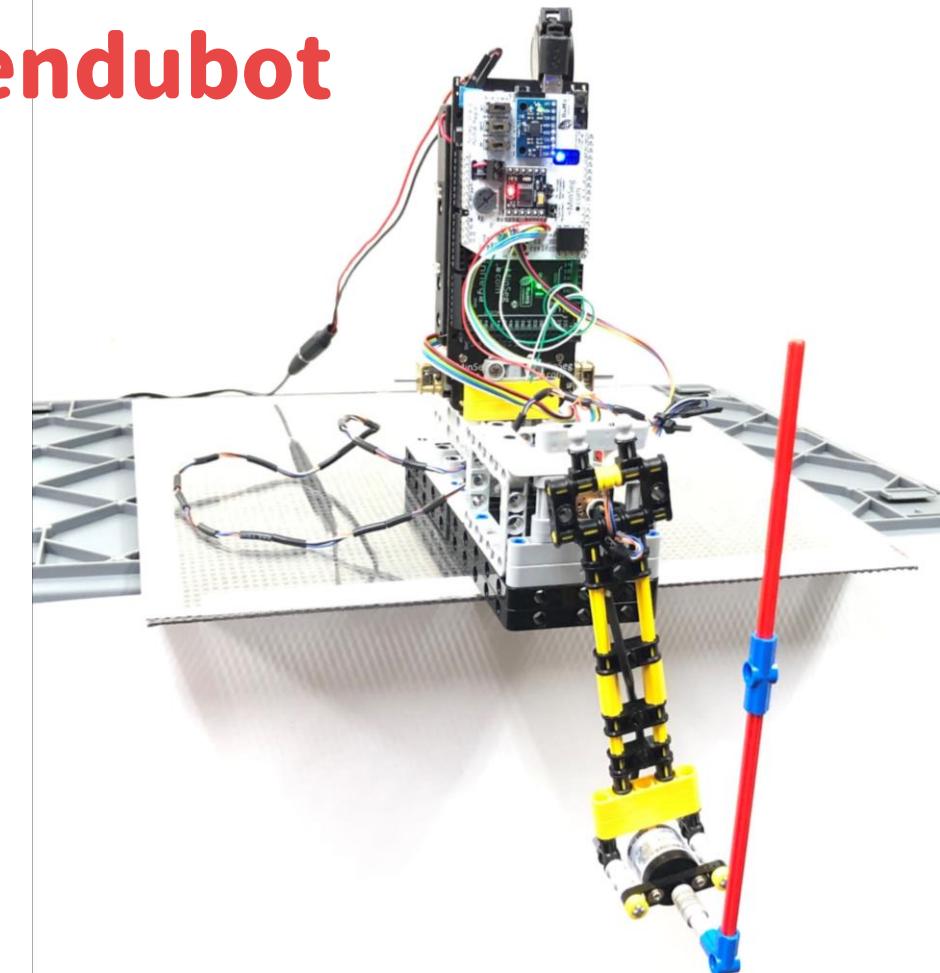
回転型 LEGO 倒立振子

Furuta
Pendulum



アーム型 LEGO 倒立振子

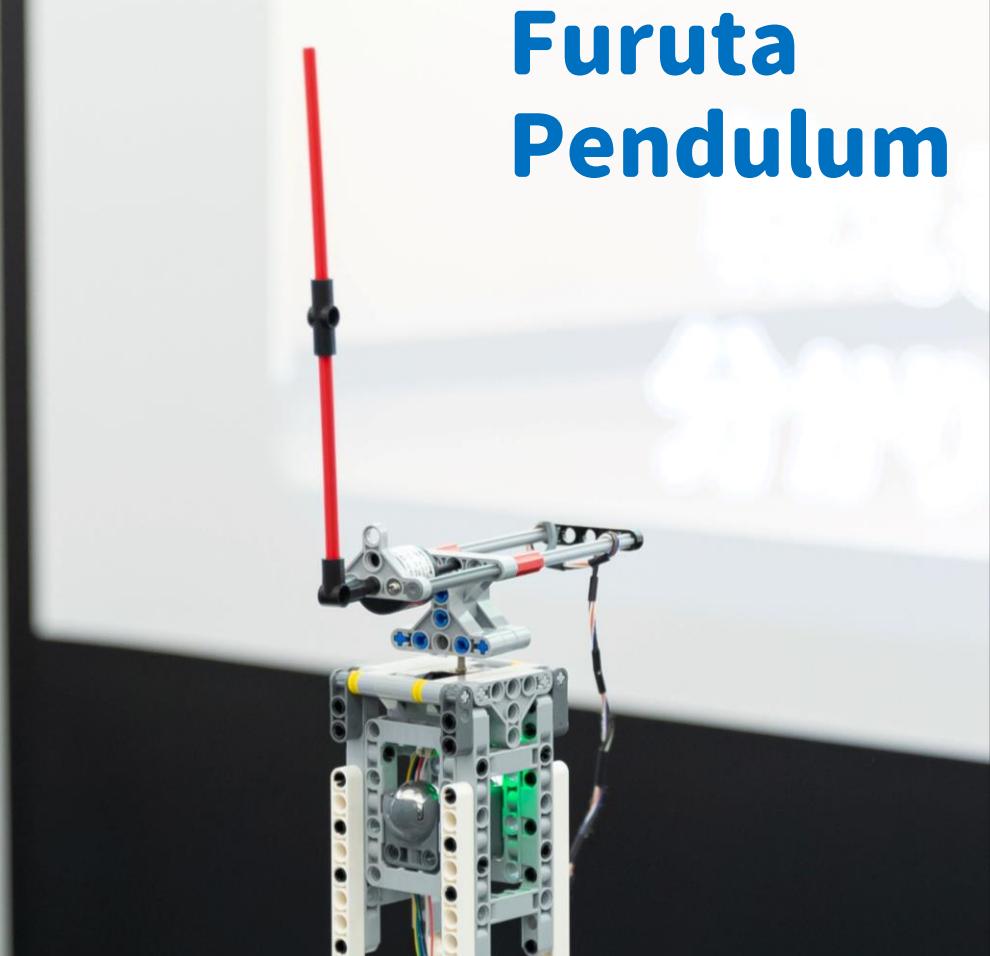
Pendubot



いずれのタイプも…

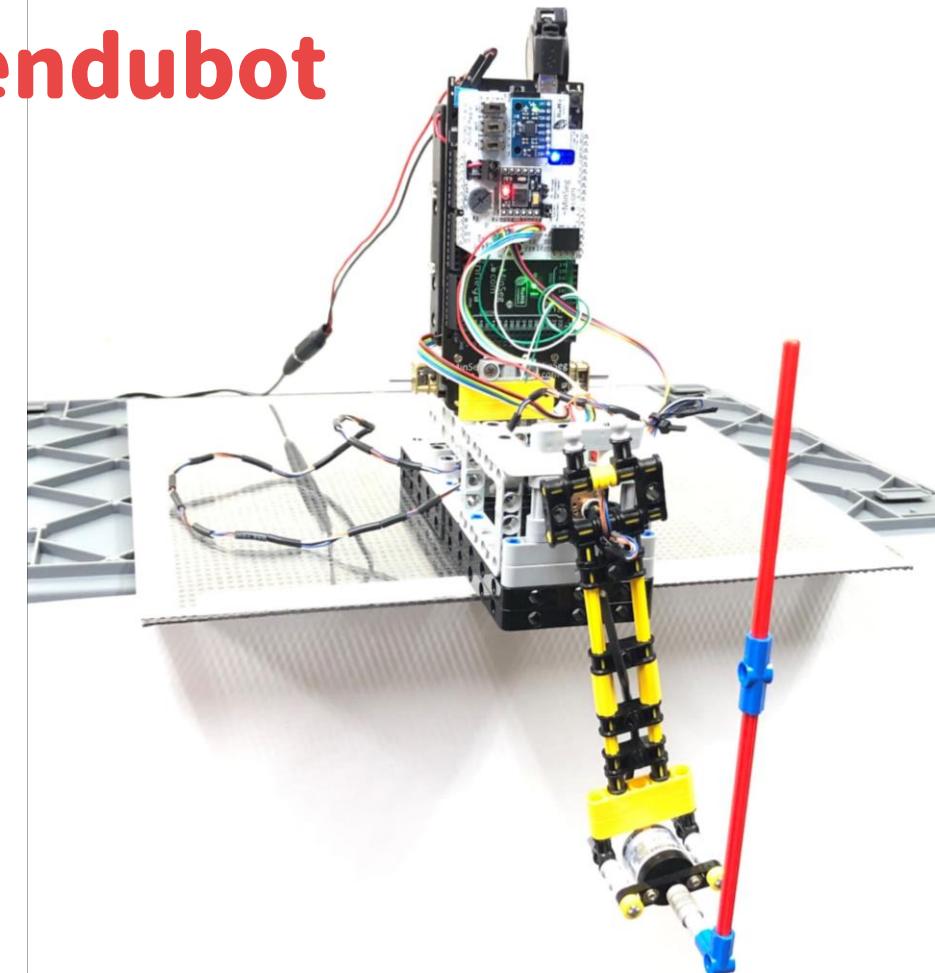
回転型 LEGO 倒立振子

Furuta
Pendulum



アーム型 LEGO 倒立振子

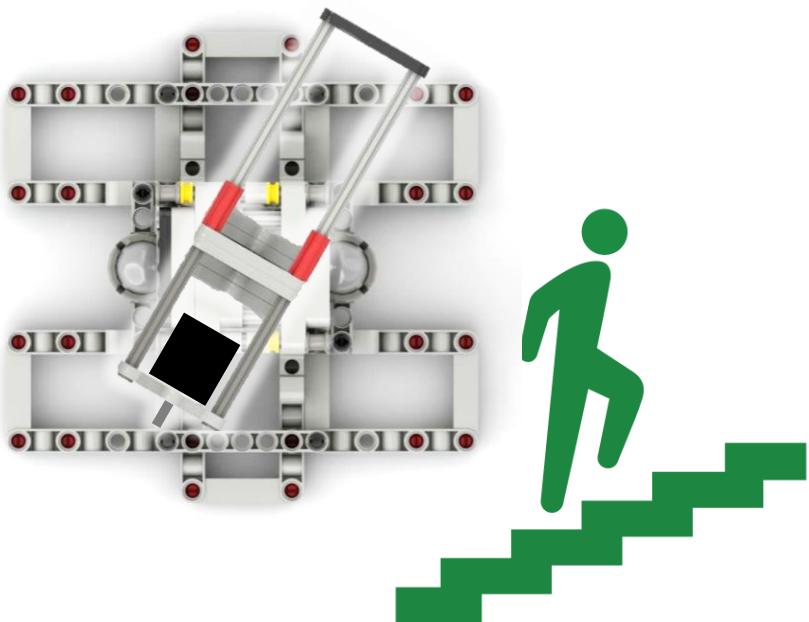
Pendubot



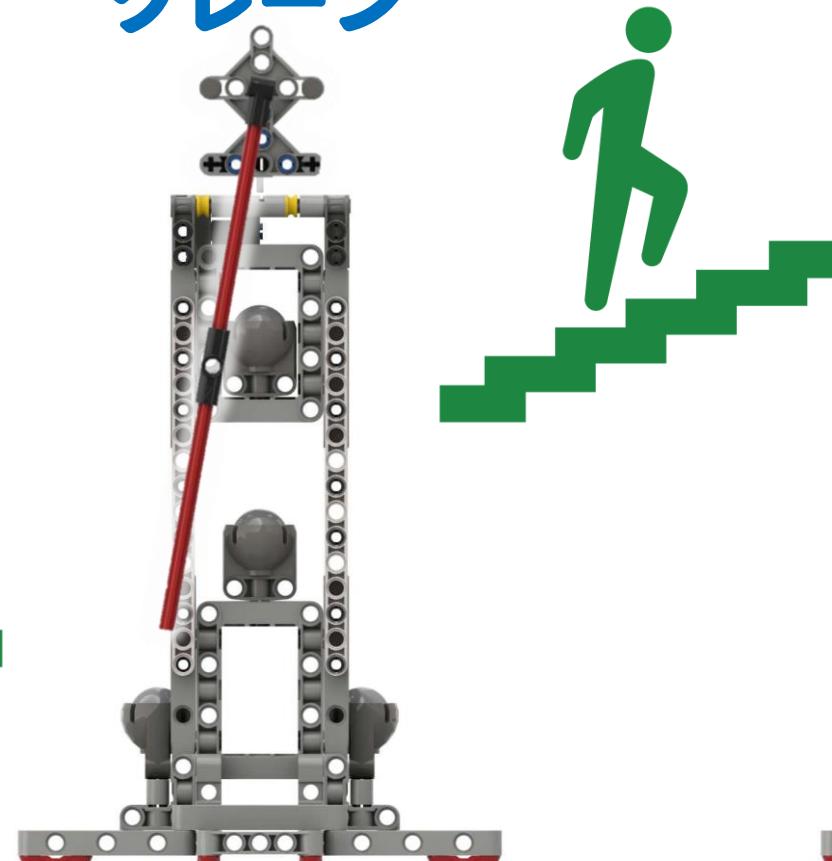
いずれのタイプも…

学習内容や
レベルにより
実験装置を変更

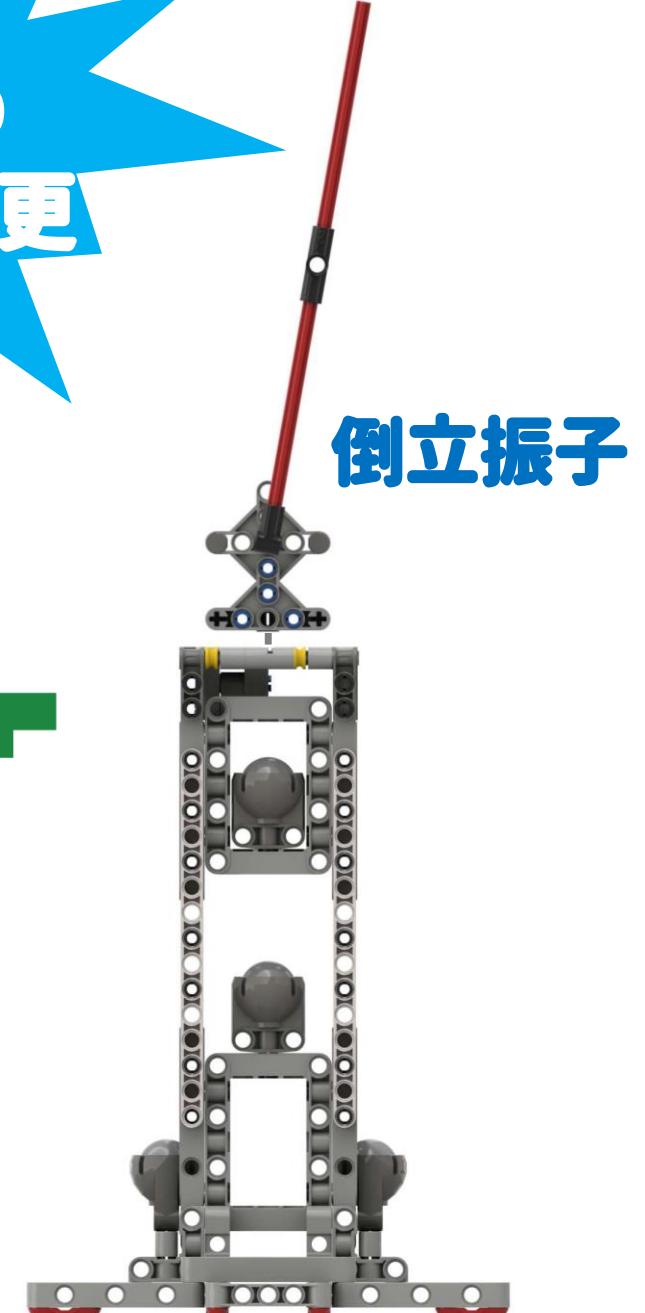
水平面を回転する
アーム



クレーン



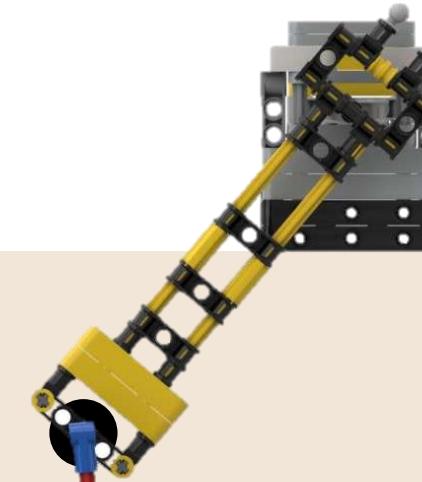
倒立振子



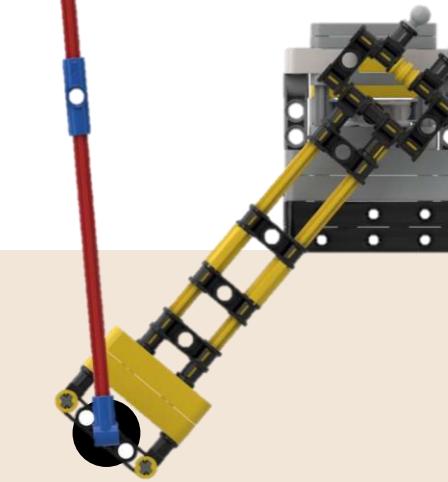
いずれのタイプも…



鉛直面を回転する
アーム



クレーン
(down/down)



倒立振子
(down/up)

学習内容や
レベルにより
実験装置を変更

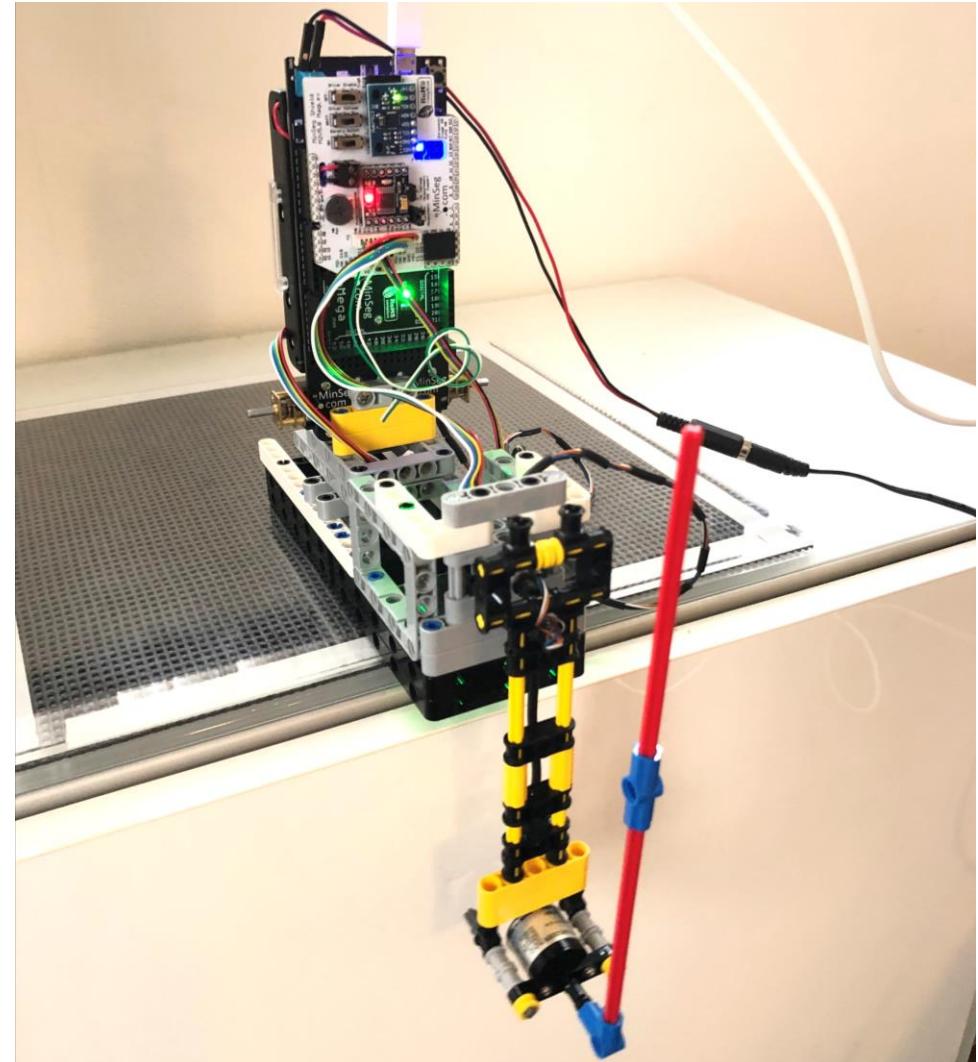
回転型 LEGO 倒立振子

- コンパクトな構造で平らな場所であればどこでも設置可能



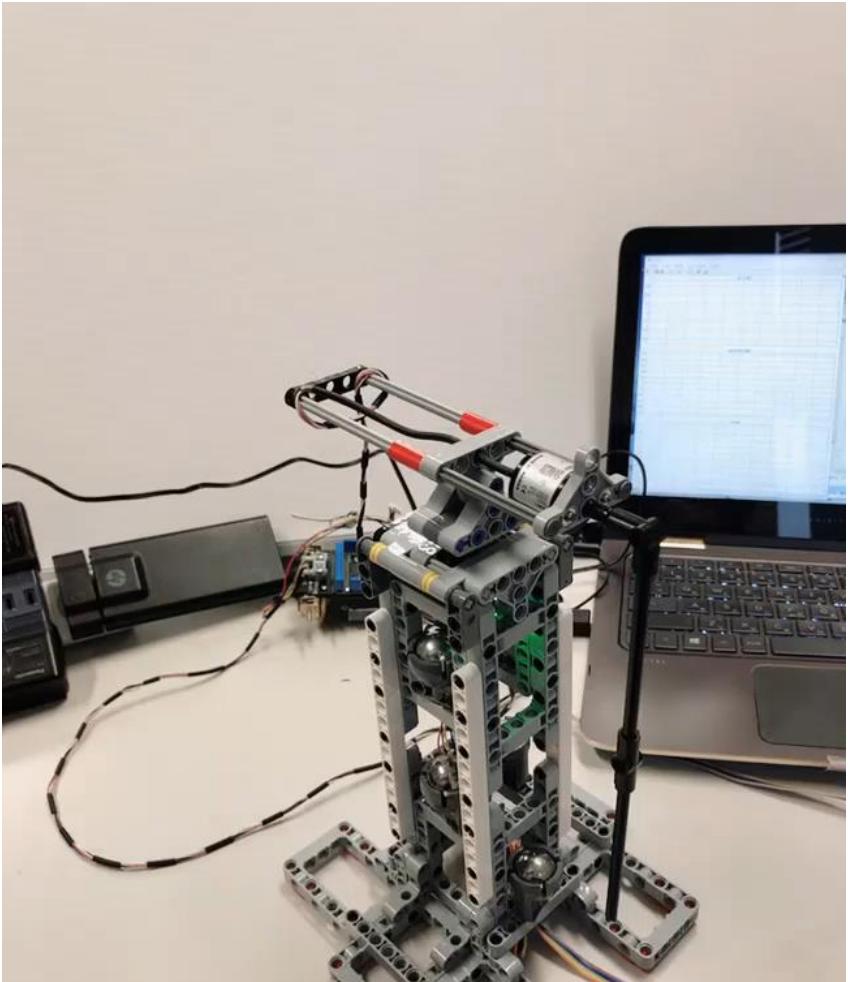
アーム型 LEGO 倒立振子

- 机の端に設置



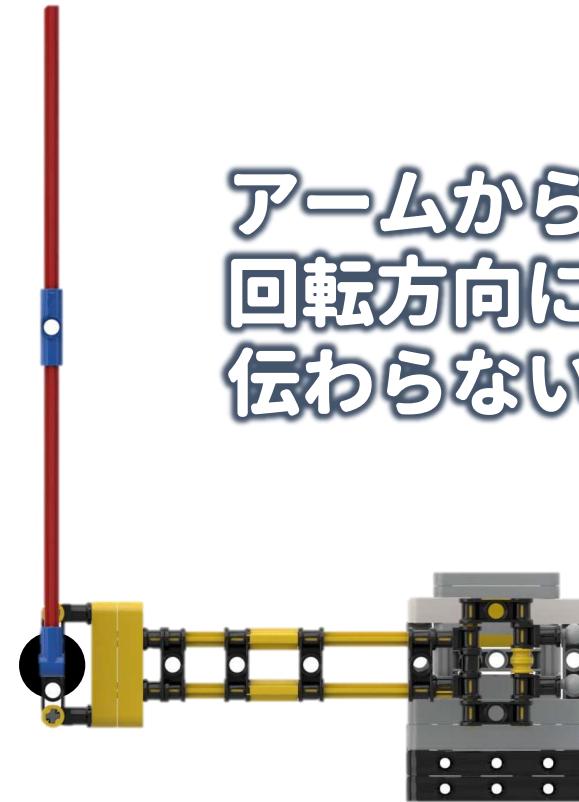
回転型 LEGO 倒立振子

- アーム角の有効範囲が広い
(暴走しても大丈夫)

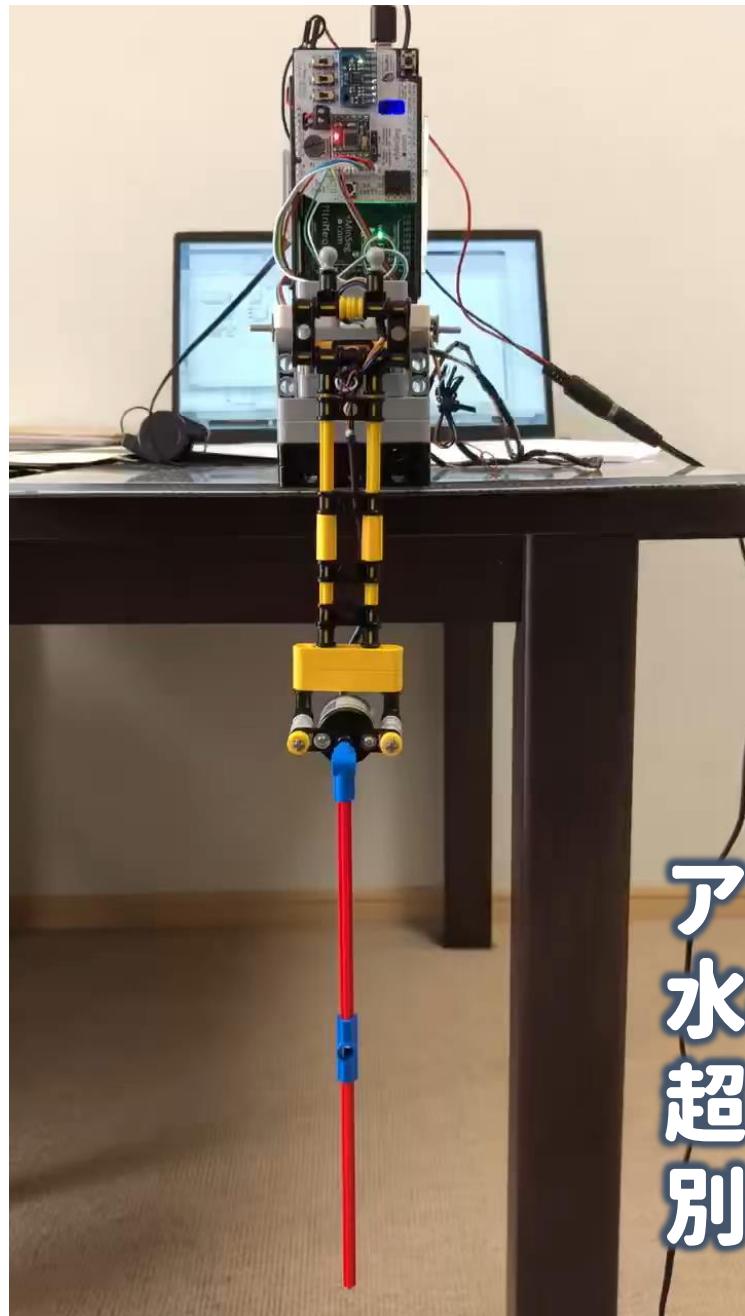


アーム型 LEGO 倒立振子

- アーム角の有効範囲が狭い
(アームが水平付近で不可制御)



アームから振子の
回転方向にトルクが
伝わらない！



アームが
水平位置を
超えると、
別のモード

アーム型 LEGO 倒立振子

- アーム角の有効範囲が狭い
(アームが水平付近で不可制御)

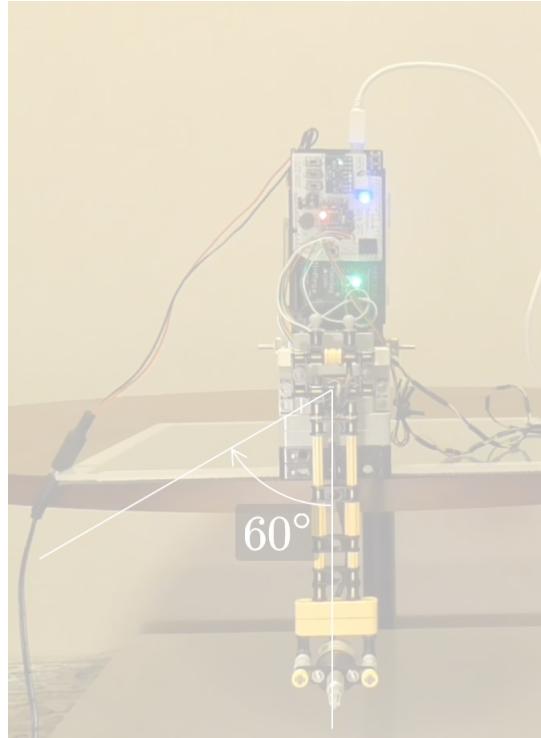


アームから振子の
回転方向にトルクが
伝わらない！

回転型 LEGO 倒立振子

- 倒立振子の中では**難易度は低い**

▷ アームの重力項の非線形性

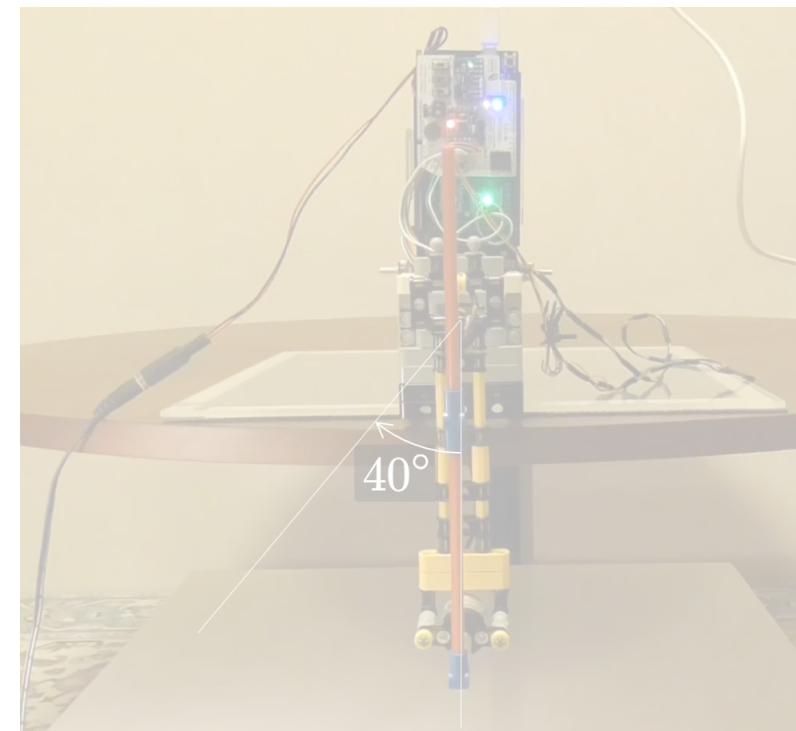
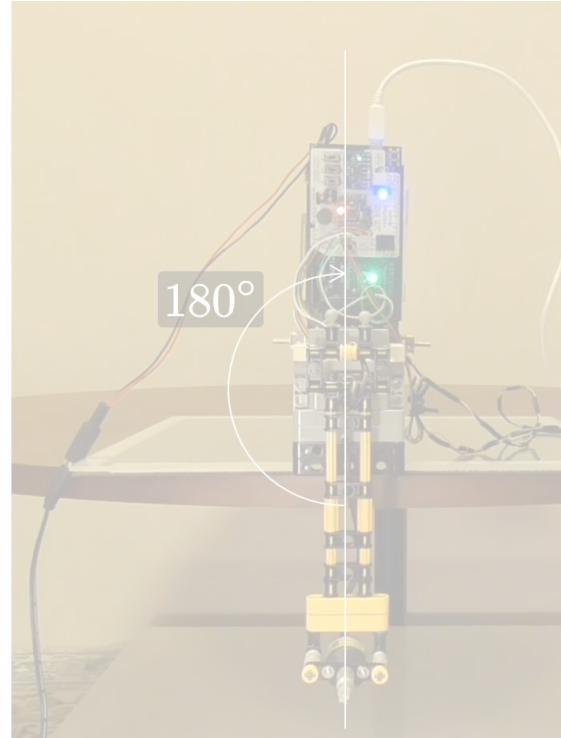


鉛直面を回転するアームの I-PD 制御

アーム型 LEGO 倒立振子

- 倒立振子の中では**難易度は高い**
(アームが鉛直面を回転する影響)

▷ アーム角・振子角の間の非線形性



アームの目標値追従制御

このスライドは終了です。