

# 第2回 openarm勉強会

名古屋工業大学  
土岐勇介



1. 自己紹介
2. 前回の復習
3. 外乱オブザーバとは
4. 4chバイラテラル制御



# 自己紹介



土岐勇介  
名古屋工業大学  
@tokinoketsu32



編集

とき 認証を受ける

@tokinoketsu32

QUADRO | オープンソースフルカスタマイズ可能な4脚ロボットの開発 | バイラテラル制御と4脚の合体 | 大学生  
Github : [github.com/tokirobot](https://github.com/tokirobot) Blog : [tokirobotics.com](https://tokirobotics.com)

📍 愛知県 📅 2019年3月からXを利用しています

1,027 フォロー中 1,798 フォロワー

## • 大学での研究内容

産業用ロボットの位置と力のハイブリッド制御  
産業用ロボットの最適軌道生成

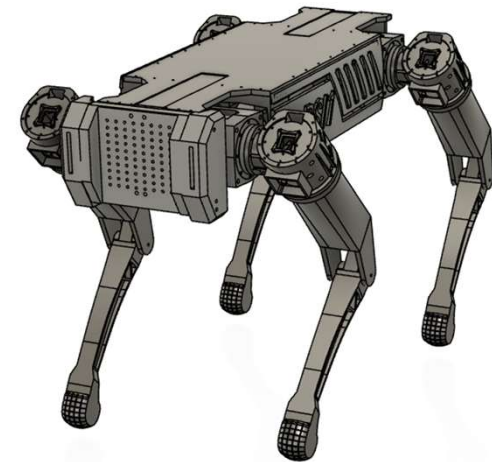


## • レアゾンでの研究

今年の1月くらいから名古屋で活動  
多関節ロボットのバイラテラル制御(今はALOHA)

## • 個人の活動

オープンソース4足歩行ロボットの開発  
→[github.com/tokirobot](https://github.com/tokirobot)にてハード公開  
4足歩行ロボットのブログ記事  
→[tokirobotics.com](https://tokirobotics.com)で書いてます



# 前回の復習



# — 双腕マニピュレータALOHA

オープンソースロボットアーム(trossen robotics)  
ALOHA(A Low-Cost Open-Source Hardware)



<https://github.com/interbotix>にて模倣学習プログラムやユニラテラル制御など様々なプログラムが公開(バイラテはない)

ROS1, 2のバージョンごとのブランチが存在し、URDFも利用可能

物	個数
ViperX 300S (組み立て済み)	2
Widow 250X (組み立て済み)	2
昇降式電動テーブル	1
テーブル用フレーム	多数
USBhub	2
USBcable	6~10
USBcamera	5~7
ワイヤー系	多数

\$ 30000



ちょっと直してほしいところ...

→手先機構が摩擦強すぎる

→Widowの手先が電流制御モードが使えない

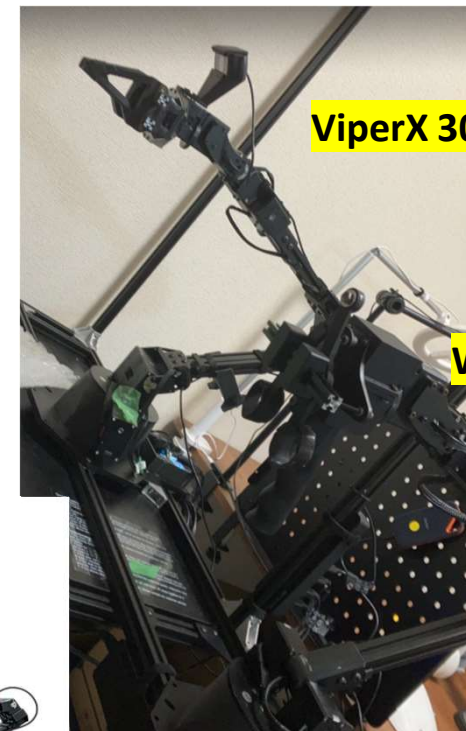


Fig. 名古屋研究所のALOHA2



## バイラテラル制御について

### ✓バイラテラル制御とは

→テレオペレーションによる、**力覚フィードバックを直感的に実現する**手段。一言で言うと遠隔操作しているロボットの触感や重さが操作しているこちら側にも帰ってくる。

### ✓なぜバイラテラル制御が必要か

→人は作業するとき視覚、聴覚などの遠隔感覚のほかに実際に触ったときの触覚や力覚などの近接感覚を用いている。バイラテラル制御を用いて人間に必要な**触覚や力覚を再現することでより複雑なタスクをロボットが再現可能になるようにする。**

### ✓Openarmの目指すバイラテラル制御

#### 操作性と再現性の両立

操作性...操作しているときの軽さ

再現性...環境の硬さや柔らかさをどれだけ再現できるか

### ✓ALOHAのバイラテラル制御

再利用性を高めるためROS2で実装

リーダーとフォロワーでサイズが違う

→異スケージングバイラテラル制御

#### 実応用例

Motion Lib ABCcore

SONY 精密バイラテラル制御

ユニパルス ユニサーボ

人機一体

Etc...

[1]参考 : Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation

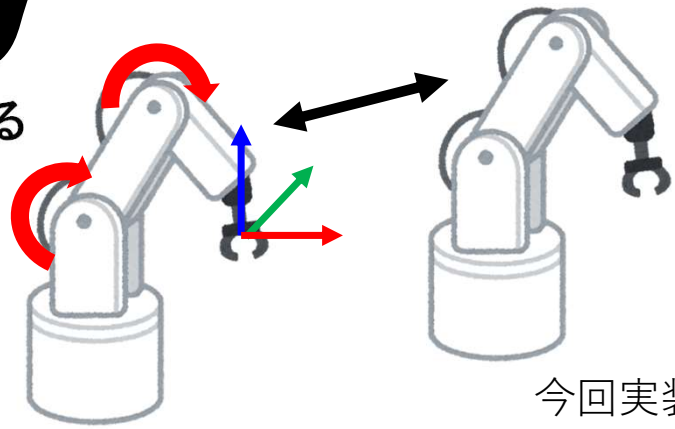


# バイラテラル制御について

✓バイラテラル制御の種類→実は色々な方法が考案されている

バイラテしたい!!!

- 関節空間で組む?
- 作業空間で組む?
- 異構造?
- 異スケール?



今回実装したのがこれ

## 位置対称型

- リーダ:位置FB制御
- フォロワ:位置FB制御
- ✓重い
- ✓安定
- ✓実装が楽

## 力逆走型

- リーダ:力FF制御
- フォロワ:位置FB制御
- ✓重い
- ✓安定
- ✓力計測が必要

## 力帰還型

- リーダ:位置FB制御
- フォロワ:力FB制御
- ✓軽い
- ✓不安定
- ✓力計測が必要

## 力順送型[2]

- リーダ:位置FB制御
- フォロワ:力FF制御
- ✓軽い
- ✓安定
- ✓パワーアシスト
- ✓力計測が必要

↑  
人機一体の手法

## 4ch型

- リーダ:位置FB+力FB制御
- フォロワ:位置FB+力FB制御
- ✓軽い
- ✓そこそこ安定
- ✓力推定
- ✓外乱除去

[2]参考:油圧アクチュエータを用いた人間パワー増幅ロボットの二足歩行制御手法の開発

# バイラテラル制御について

✓ ALOHAで実装した4chバイラテラル制御

$$\tau_l = \underbrace{J_{ln} C_{lp} (x_f - x_l)}_{\text{位置制御} \rightarrow \text{再現性}} - \underbrace{C_{lf} (f_l + f_f)}_{\text{力制御} \rightarrow \text{操作性}} + \underbrace{\hat{\tau}_{ldis}}_{\text{推定外乱}}$$

$$\tau_f = \underbrace{J_{fn} C_{fp} (x_l - x_f)}_{\text{位置制御} \rightarrow \text{再現性}} - \underbrace{C_{ff} (f_l + f_f)}_{\text{力制御} \rightarrow \text{操作性}} + \underbrace{\hat{\tau}_{fdis}}_{\text{推定外乱}}$$

外乱オブザーバによる外乱除去と位置制御と力制御の複合により高い再現性と操作性を実現

$$C_{*p} = K_p + sK_d$$

$$C_{*f} = K_f$$

説明  
 △動いているときに位置制御が働いて触ったときの感触が力制御で分かる  
 ◎ものを触ったときの感触が位置制御、動かしているときの軽さが力制御

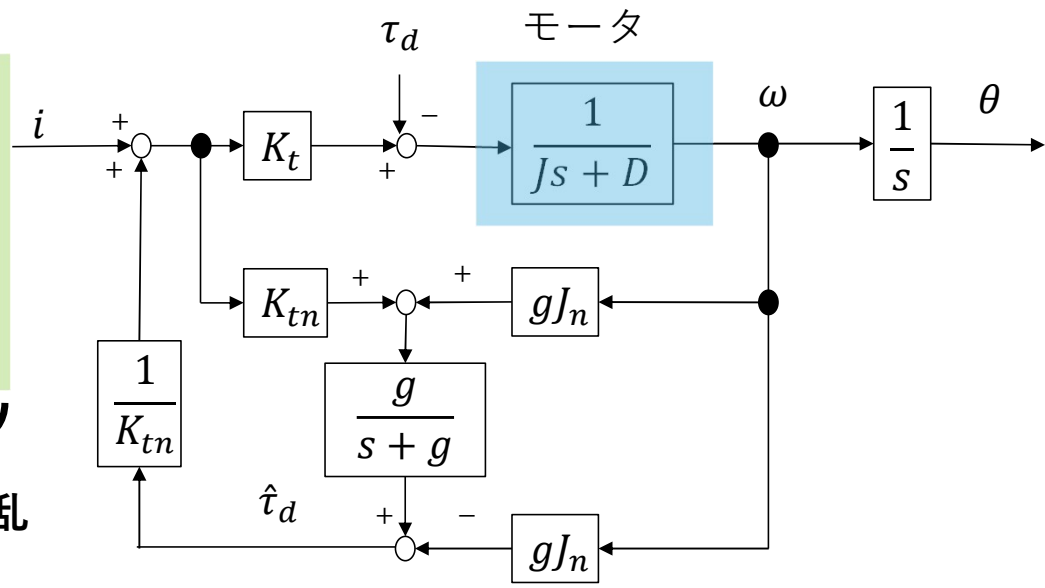
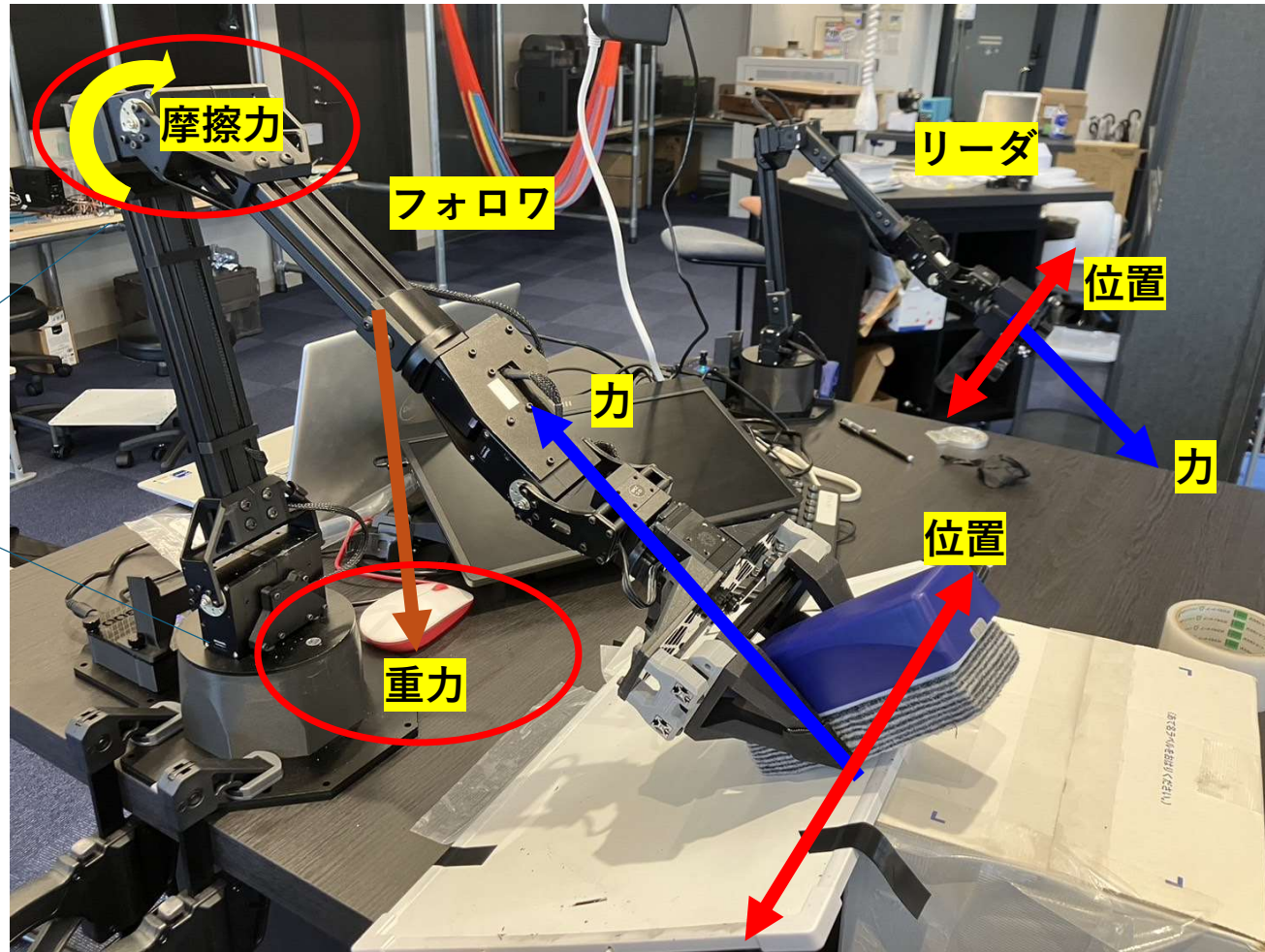


Fig.外乱オブザーバのブロック線図

動作周波数は500Hzほど(やや心もとない)



# バイラテラル制御について



リーダーと  
フォロワで  
位置と力を  
同期させる

外乱オブザーバ  
で補償



# バイラテラル制御について

✓ 4chバイラテラル制御の性能を上げるには

操作性

操作するときの軽さや  
滑らかさを評価

再現性

触れた感触をどれくら  
い再現できるかを評価

4chバイラテのデメリット

- ・ **実装がめんどくさい**
- システム同定、
- ・ 高い動作周波数が必要
- 通信の工夫

ここが6.5割くらい

- ・ バックドライバビリティの高さ→環境再現
- ・ 低減速比→重さ、減速比倍の重さが慣性に乗ってくる
- ・ 摩擦やバックラッシュなどの機械損失の少ないアクチュエータ→ノイズ
- ・ 動作周波数→帯域向上 500hz 足りない 1khz うれしい 10khz神
- ・ 高剛性→DOBの性能上
- ・ DCモーターよりブラシレスモーター→トルク密度
- ・ 低遅延→帯域向上
- ・ モデル化誤差の最小化→ゲイン設定
- ・ エンコーダなどのセンサ分解能の高さ→DOB帯域向上



## — ALOHAで実装して...

- フォロワーと構造が違うため、重さが引っかかる。細かいタスクは難しそう。ユニラテラル制御と比べると操作性は悪い。
- 手先がPWM制御なので、重たい(新しいの買ったほうがいいかも)
- デュアルモータの部分のパワーと剛性の高いアルミフレームで触った感覚はそこそこ
- 今後は遠隔地で、動かせるかトライ



## 今回の発表内容

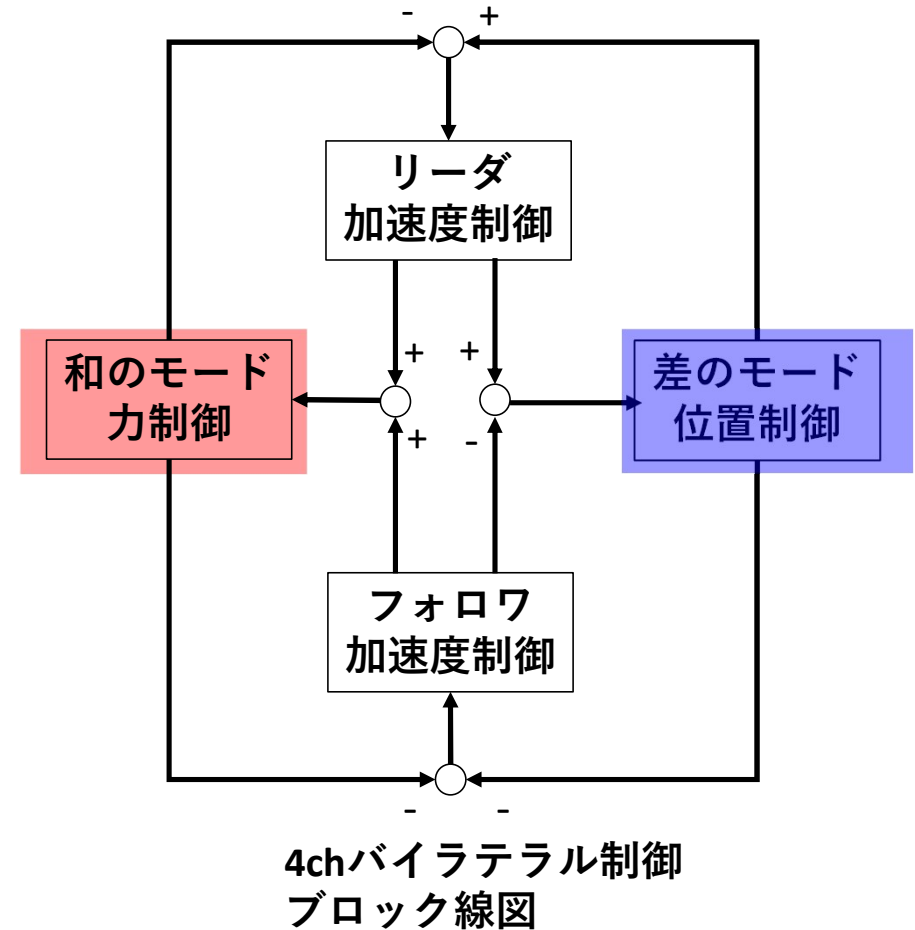
### 4ch型バイラテラル制御の詳細な解説

→力制御とは

### 外乱オブザーバについて

→外乱オブザーバは何をしているのか

→多関節ロボットとの合体 HOW TO



# 外乱オブザーバとは -ちょっとだけ勉強-

## s...ラプラス演算子(微分)

$$\text{例) } \sin\omega t \rightarrow \boxed{s} \rightarrow \omega \cos\omega t \quad (\text{微分})$$

$$\sin\omega t \rightarrow \boxed{\frac{1}{s}} \rightarrow -\frac{1}{\omega} \cos\omega t \quad (\text{積分})$$

ラプラス変換の世界では微積分は掛け算割り算になる

$$\boxed{\frac{g}{s+g}} \quad \text{カットオフ周波数 } g \text{ のローパスフィルタ}$$

$$\begin{aligned} C_{*p} &= K_p + sK_d && \longrightarrow && \text{位置のPD制御} \\ C_{*f} &= K_f && && \text{力のP制御} \end{aligned}$$

$J$  ... イナーシャ(慣性)

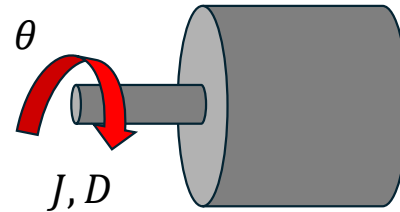
$D$  ... ダンピング(粘性摩擦)



# 外乱オブザーバとは -概要-

## Disturbance Observer、DOB 等

$$\frac{1}{Js + D}$$



$$J\ddot{\theta} = K_t i + D\dot{\theta} + d$$

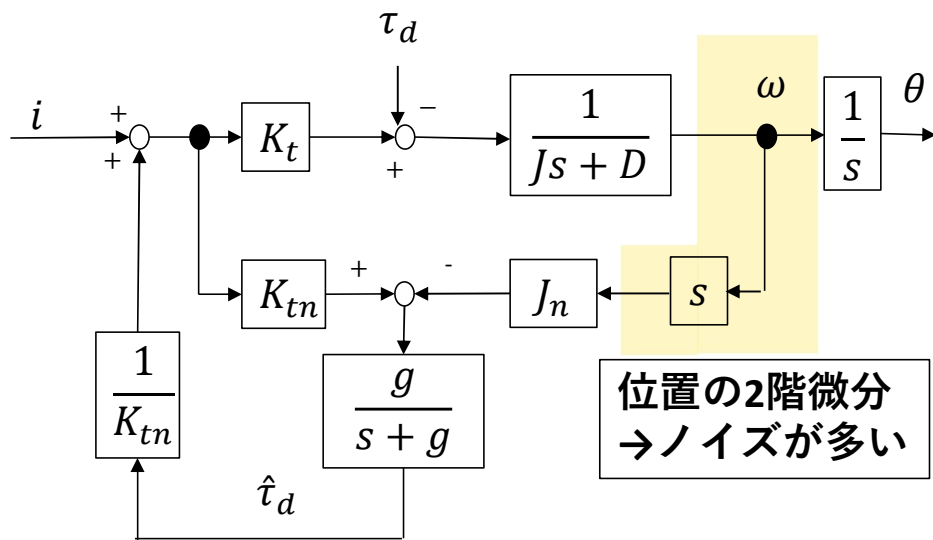
$d = \text{定数}$

モータの図とラプラス変換後のモーター

- 一言で言うと...
  - 摩擦、重力の外乱を推定してその影響をなくしてしまいたい
  - ロボットの軸間の影響を非干渉にしたい

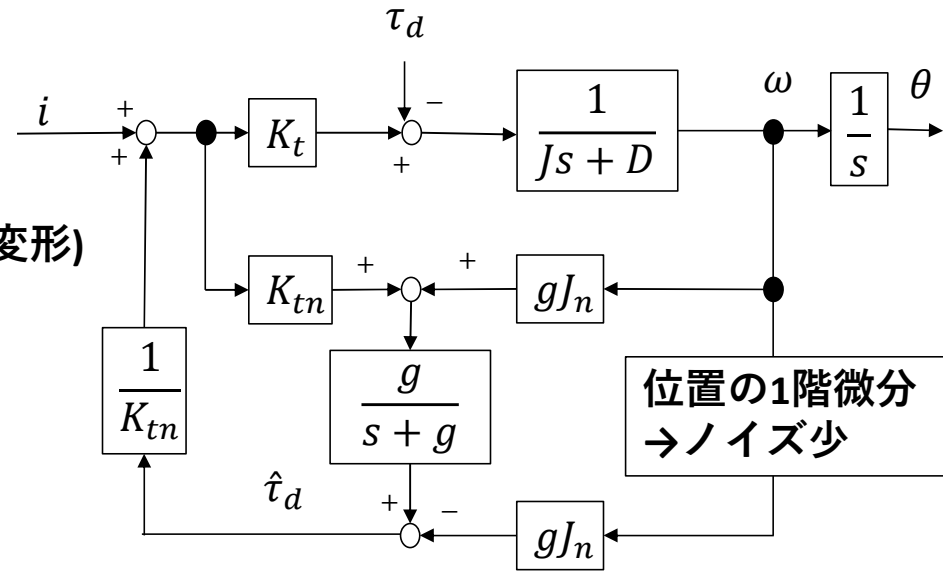


# 外乱オブザーバとは -概要-



位置の2階微分  
→ノイズが多い

工夫(頑張って変形)  
→



位置の1階微分  
→ノイズ少

Fig.外乱オブザーバのブロック線図

Fig.修正した外乱オブザーバのブロック線図

$$\hat{\tau}_d = \frac{g}{s + g} (K_t i - J_n s \omega)$$

(入力したトルク[Nm]) - (実際の加速度と慣性の積[Nm])

{ = 0(外乱なし)  
≠ 0(外乱あり)

## 外乱オブザーバとは -特性-

### ✓外乱抑圧

→ブロック線図を紐解くと外乱を抑圧することがわかる

ブロック線図から  
解析可能なので頑  
張ってください

### ✓トレードオフ

→外乱抑圧と観測ノイズなど(エンコーダの分解能が低い、バックラッシュがある、などで帯域が広げられない

### ✓ノミナルモデルへ近づく

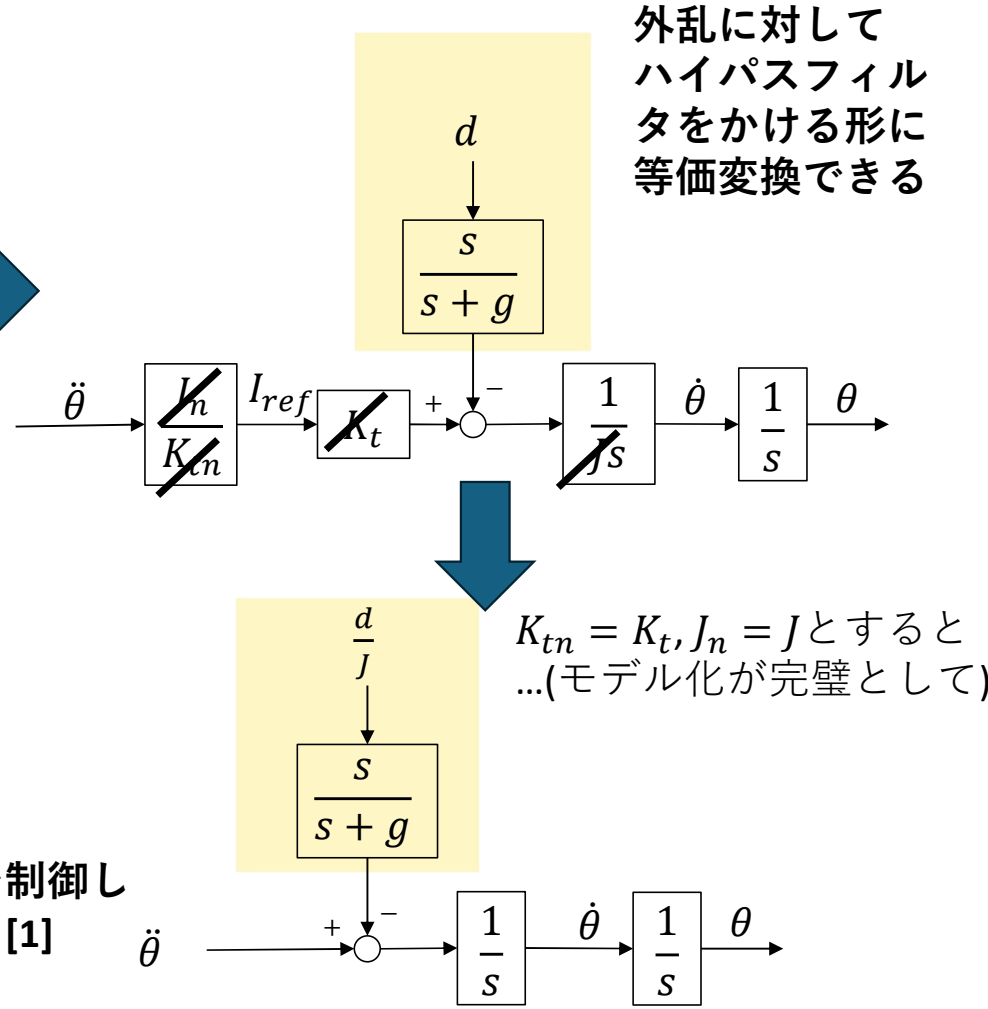
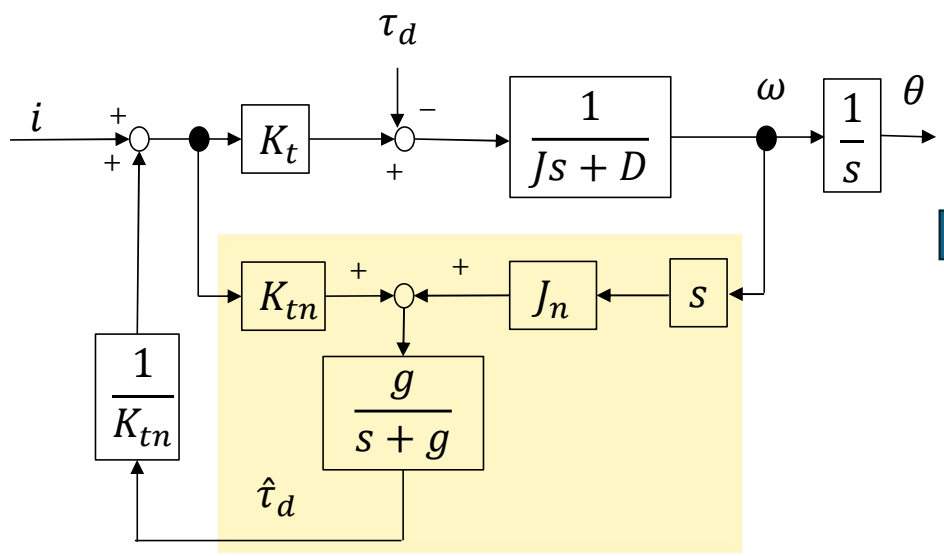
→自身が設定した逆モデルに特性が近づく

$$y = P_n u + (I - Q)d$$





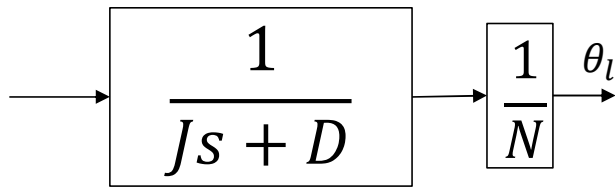
# 外乱オブザーバとは -加速度制御-



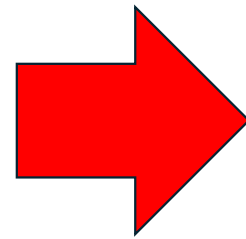
# じゃあ外乱オブザーバ最強では？

減速機をパワー増幅器だともっていないか...?? [2]

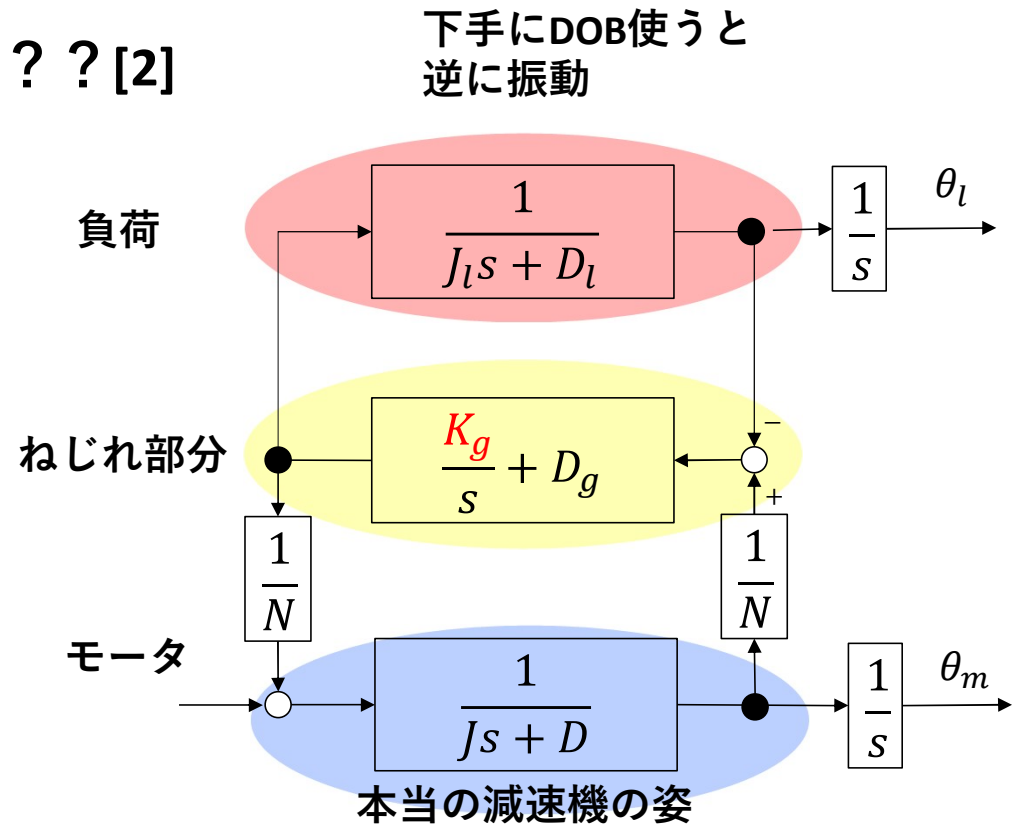
モータ部分



みんなが思ってる減速機



実際には...



実際には減速機がねじれたり、静止摩擦が発生したり、バックラッシュがあったりでうまい話はない、減速機の効率とか  
プラントに合わせて適切な制御器を設計する



# おまけ 外乱オブザーバとは -深い話-

外乱オブザーバってどうやってできたのか...??

Gopinathの方法 (最小次元オブザーバ) [3]

観測可能な状態量と不可能な状態量で分けて考える

$$J\ddot{\theta} = K_t i + D\dot{\theta} - d$$

$d = \text{定数(ステップ外乱)}$

いつもの外乱オブザーバは  
実はステップ外乱への対応  
を目指しているって話

拡張状態  
空間表現



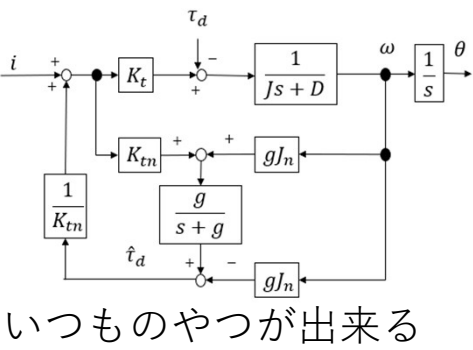
$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_t \\ 0 \end{bmatrix} i$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta \\ d \end{bmatrix}$$

最小次元へ...  $\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} u$



$\hat{d}$ について整理  
伝達関数形式に変換



$$\hat{A} = A_{22} - LA_{12}$$

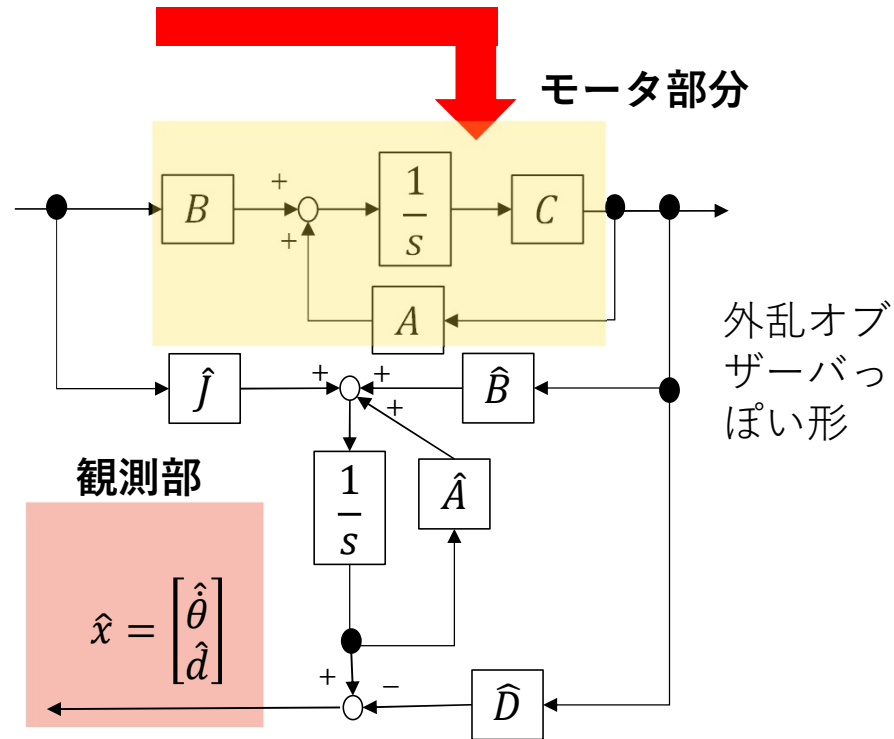
$$\hat{B} = \hat{A}L + A_{21} - LA_{11}$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{D} = \begin{bmatrix} 1 \\ L \end{bmatrix}$$

L ... オブザーバゲイン

モータ部分



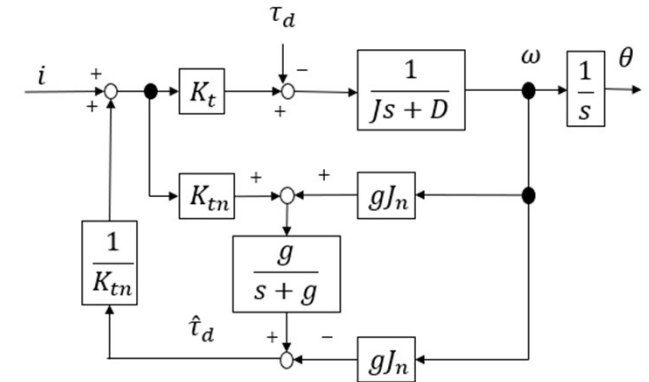
外乱オブザーバっぽい形

# 外乱オブザーバとは -アームでは??-

ロボットアームの運動方程式の構成

$$\tau = \underbrace{M(\theta)}_{\text{慣性}} \ddot{\theta} + \underbrace{h(\dot{\theta}, \theta) + g(\theta)}_{\text{遠心力、重力}}$$

アームの姿勢によって、慣性が変わり続けるので、モデル化誤差によるノイズが乗り続ける  
 →重力、遠心力などの、外乱を除去して慣性変動に対応すればいい応答が得られる...かもね



ALOHAでは動力学を解いて対応  
 (たいした感触の変化はなし...)

詳しく  
 見てみると...

対角項...自身の動作によって発生する慣性力  
 非対角項...他のリンクによって発生する慣性力

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{61} & \dots & M_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_5 \\ \ddot{\theta}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix}$$

# 外乱オブザーバとは - 動力学を計算 -

ALOHAでは動力学計算ライブラリを使用

ここでは6軸アームの動力学を解く方法を紹介[4]

→変動が大きいところだけの対応で十分(6軸分解こうとすると手計算では厳しい)

リンク1

$$\omega_1 = [0, 0, \dot{\theta}_1]^T$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \omega_1^T I_1 \omega_1$$

$$P_1 = T_1 l_{1com}$$

リンク2

$${}^1\omega_2 = [0, \dot{\theta}_2, 0]^T$$

$$\omega_2 = \omega_1 + R_1 {}^1\omega_2$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \omega_2^T I_2 \omega_2 + \frac{1}{2} M_2 r_{g2}^T r_{g2} \dot{g}_2$$

$$P_2 = T_1 T_2 l_{2com}$$

リンク3

$${}^1\omega_3 = [0, \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3, 0]^T$$

$$\omega_3 = \omega_1 + R_1 {}^1\omega_3$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \omega_3^T I_3 \omega_3 + \frac{1}{2} M_2 r_{g3}^T r_{g3} \dot{g}_3$$

$$P_3 = T_1 T_2 T_3 l_{3com}$$

$K_i$  ... 運動エネルギー

$P_i$  ... 位置エネルギー

$\omega_i$  ... 角速度ベクトル

$r_i$  ... 重心位置ベクトル

$I_i$  ... リンクイナーシャ

$l_{icom}$  ... リンク重心位置

$T_i$  ... 同次変換行列

$g$  ... 重力加速度

ラグランジュ関数

$$L = (K_1 + K_2 + K_3) - (P_1 + P_2 + P_3)$$

一般化座標:  $q_i = \theta_i$

$q_i$ に対応する一般化力:  $\tau_i$ (モータトルク)

ラグランジュの運動方程式より、
$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}$$

頑張れば  
手で解ける



# 外乱オブザーバとは -力制御との相性-

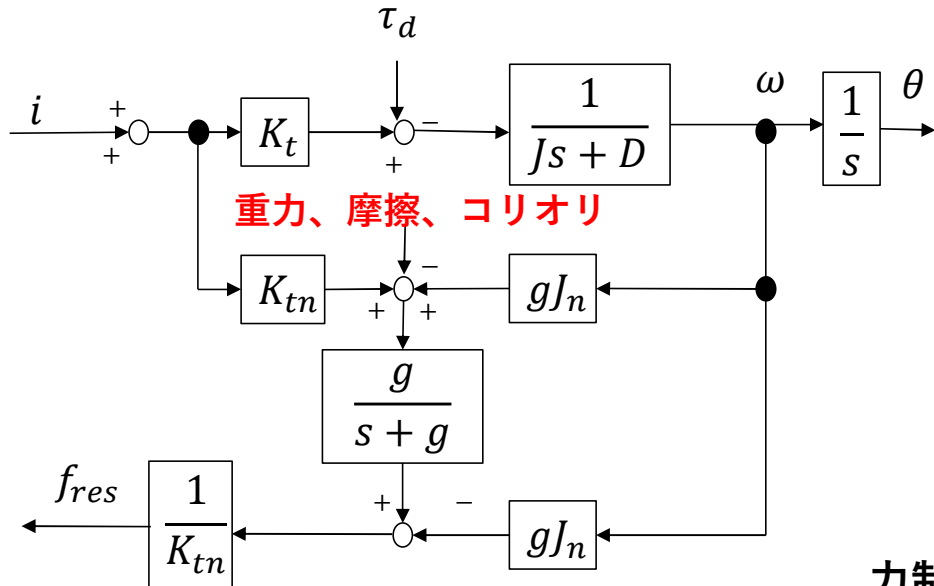


Fig.反力推定オブザーバのブロック線図

推定外乱から計算可能な外乱の除去により外力推定が可能

$$f_{res} = \tau_{ext} + \tau_{friction} + \tau_{gravity} + (J - J_n) + (K_t - K_{tn})$$

外乱オブザーバもとい反力推定オブザーバ

→ここで得られた外力を用いて力制御を可能にする

$$\tau_f = C_f (f_{ref} - f_{res})$$

力制御ってトルク制御と何が違うの...??

→言い方とやっていることは似ているが自分の解釈としてはトルク制御が所望のトルクを発生させること(オープンループ)に対し、力制御は所望の接触力を制御する(クローズドループ)。

細かすぎることはトルク制御もモータ的にはクローズドループ...  
 だけど定義的にそうじゃない?って話



# 外乱オブザーバとは -力制御との相性-

接触を伴う力制御は常に外乱を受け続けている...!!  
 だから外乱オブザーバと相性はいいよねって話

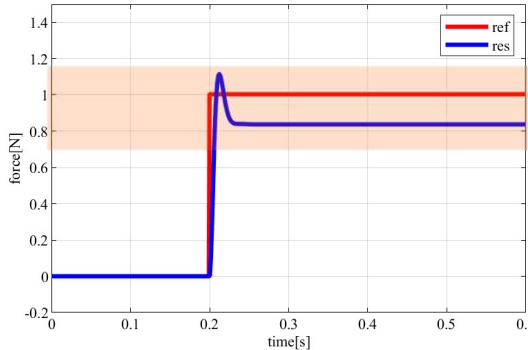
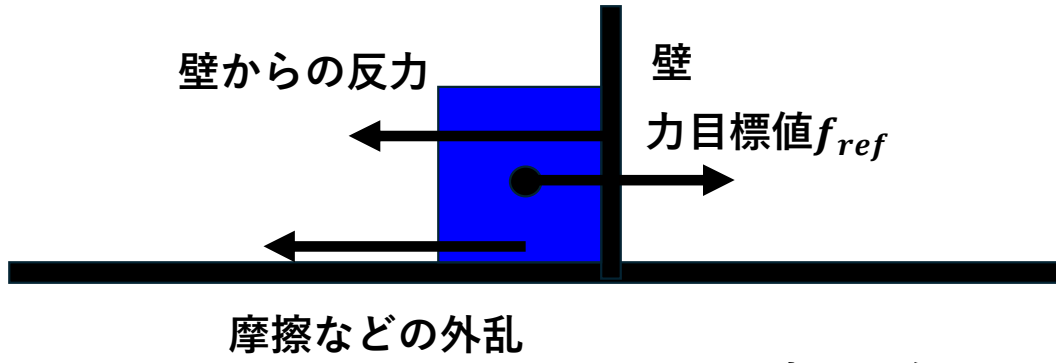


Fig. sim 力制御(DOB無)

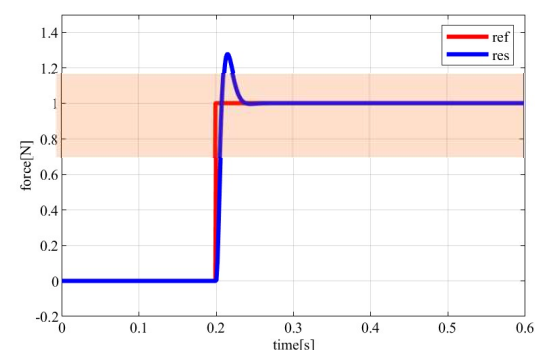


Fig. sim 力制御(DOB有)

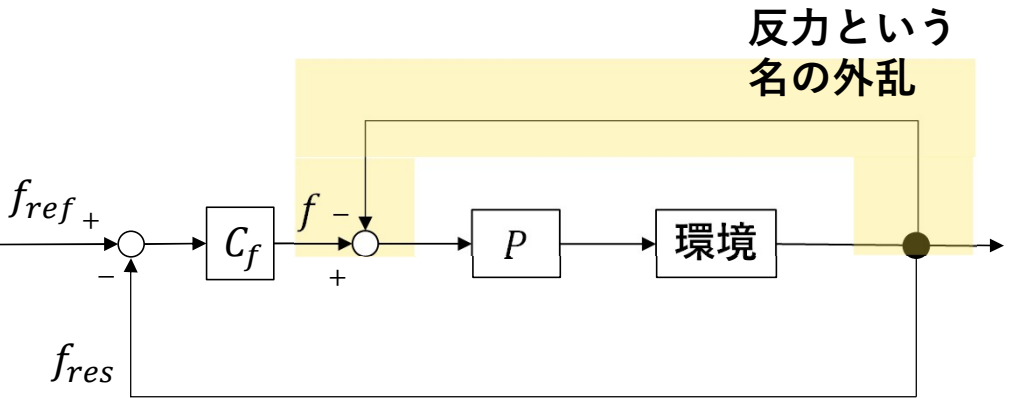


Fig.力制御(DOB無)

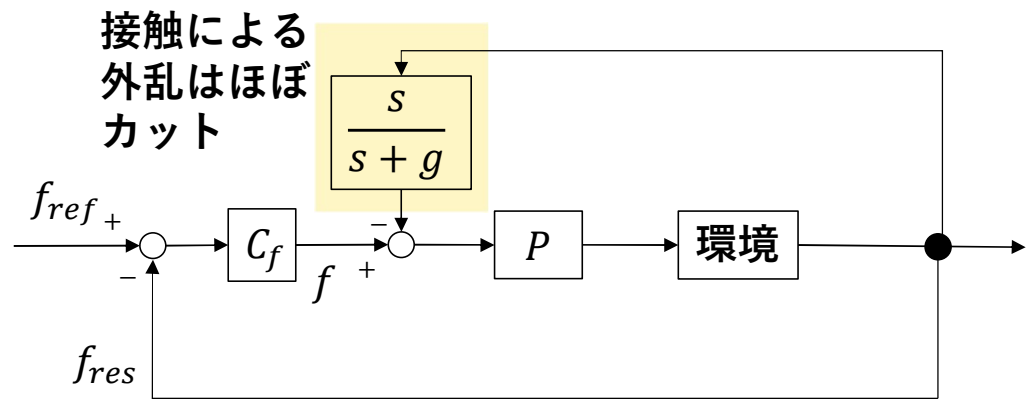
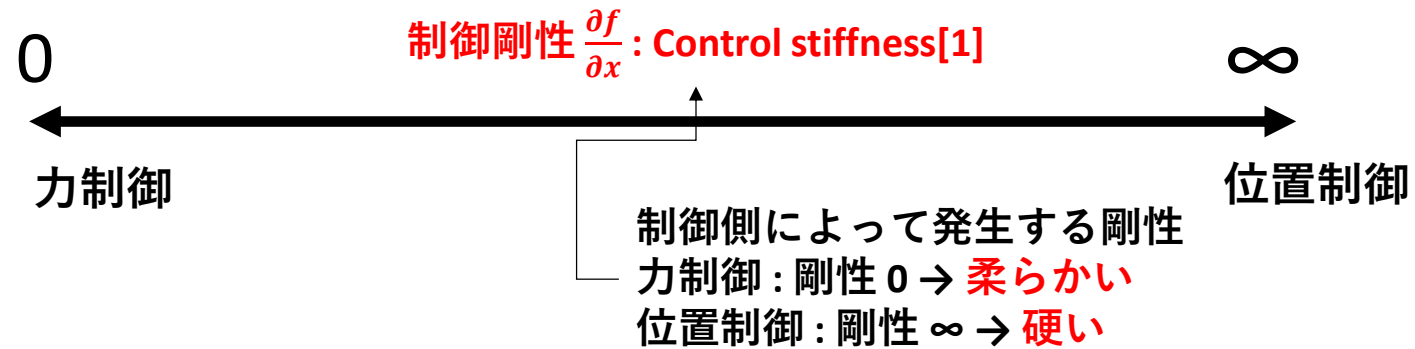
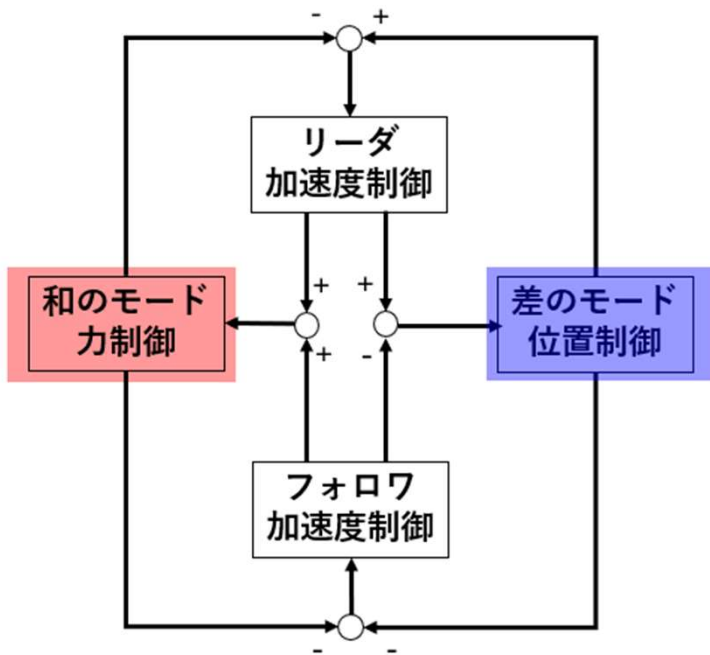


Fig.力制御(DOB有)

# 4chバイラテラル制御 -ブロック線図-

力制御と位置制御は対極の存在  
 →干渉するため本来同一方向における共存は不可能



モード空間という解釈による座標変換による共存

差のモード : 位置の差分を0にしたい  
 和のモード : 力の和分を0にしたい

モード空間の解釈の仕方は色々だが  
 ここでは一例を紹介[5]





# — なんやかんやこの形

✓ ALOHAで実装した4chバイラテラル制御

$$\tau_l = J_{ln} C_{lp} (x_f - x_l) - C_{lf} (f_l + f_f) + \hat{\tau}_{ldis}$$

$$\tau_f = J_{fn} C_{fp} (x_l - x_f) - C_{ff} (f_l + f_f) + \hat{\tau}_{fdis}$$

位置制御  
→再現性

力制御  
→操作性

推定外乱

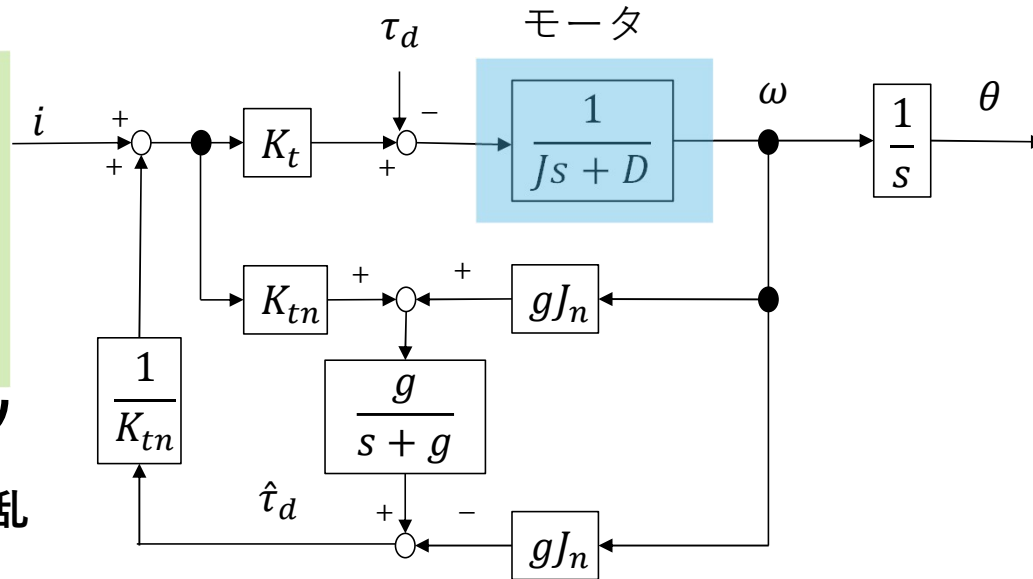


Fig.外乱オブザーバのブロック線図

動作周波数は500Hzほど(やや心もとない)

外乱オブザーバによる外乱除去と位置制御と力制御の複合により高い再現性と操作性を実現

$$C_{*p} = K_p + sK_d$$

$$C_{*f} = K_f$$

説明

- △動いているときに位置制御が働いて触ったときの感触が力制御で分かる
- ◎ものを触ったときの感触が位置制御、動かしているときの軽さが力制御

## — 今後どうなるのか

- 今は、力センサ、トルクセンサが安くなってる
- 姿勢で力制御もスケーリングしてもいいよね
- 手先だけで力制御をしてもいいかもしれないよね
- トルクセンサはねじれを見てるからモータ軸と出力軸にエンコーダがあってもいい
- モータメーカーも安く作ってくれるところが多いからカスタムすればいい
- PCの性能も上がっているし、通信も早くなる
- 接触センサと組み合わせればもっとリアルになるかも
- 機械学習を制御部分で活用してもいいかも
- トルクセンサをトルク制御のためだけに使うのもったいないよ??????

→いろんな形の実装があってもいいので、いろいろ試してみるのは今しかない

→今回の内容は一例にすぎず**目的に沿った最適な実装を目指すべき**



## 参考文献

[1] Motion control for advanced mechatronics

[2] 2 慣性共振系の負荷加速度制御

[3] 外乱オブザーバ : 島田明 著

[4] ロボット制御基礎論 : 吉川恒夫 著

[5] 加速度制御とバイラテラル制御: 沓澤京



- ・ 名古屋から東京で遠隔  
で動かして学習させてみる

~~遠隔通信なんもわからん~~

$e^{-Ls}$



敵

