



# ロボットの力制御：要件の整理

広島大学 先進理工系科学研究科  
機械力学研究室

菊植 亮

Ryo Kikuuwe

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/kikuuwe/>

<https://www.youtube.com/kikuuwe/>

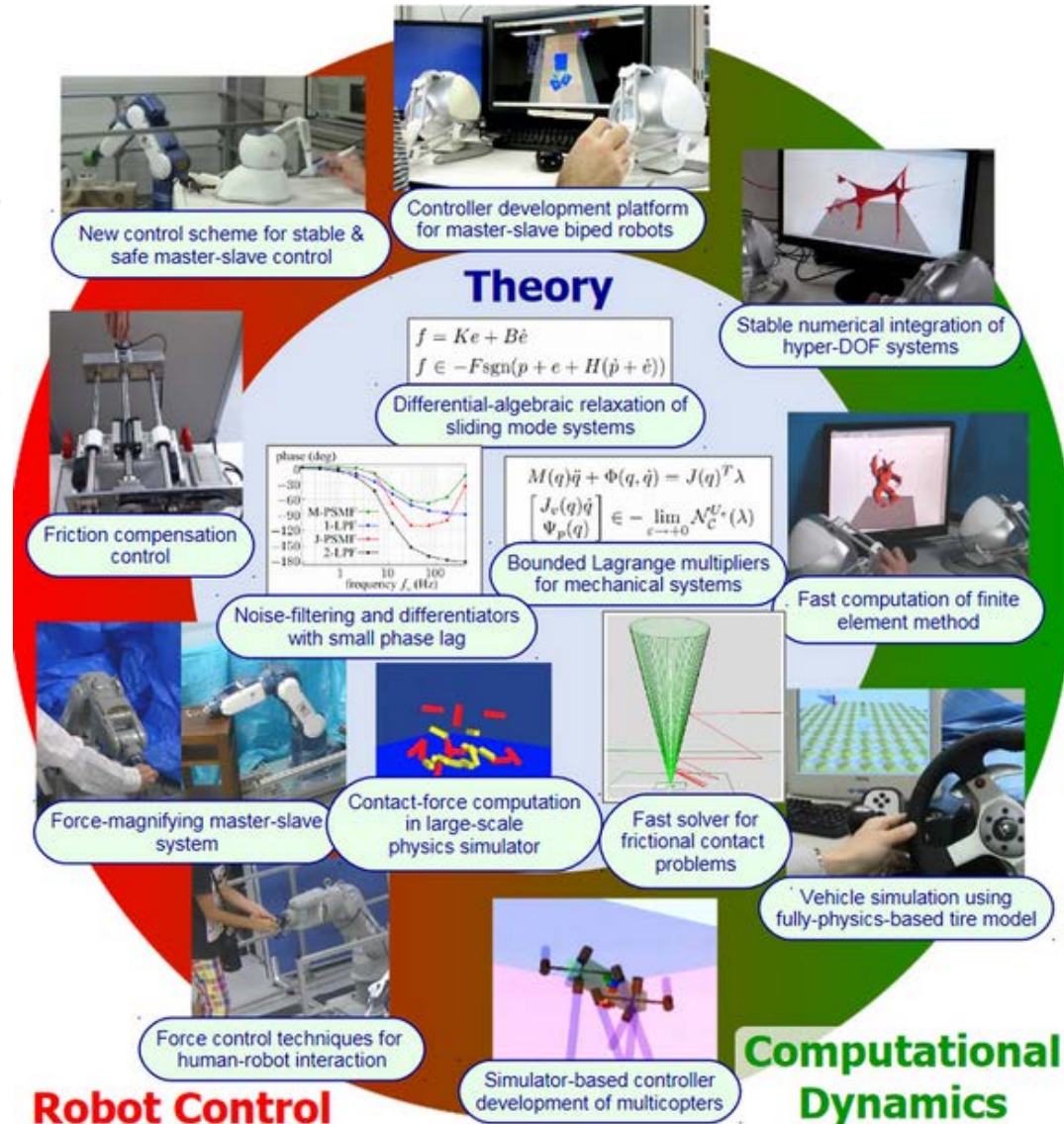
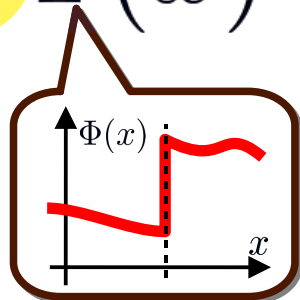
<https://speakerdeck.com/kikuuwe/>

2026/06/16

# 研究テーマ

- ◆ 機械システムに関する「制御」と「計算」
- ◆ 上記に共通する数学的基盤についても研究
- ◆ 多くのテーマが「非平滑システム」に関連
  - クーロン摩擦
  - 片側拘束
  - スライディングモード
  - 油圧システム

$$\dot{x} \in \Phi(x)$$



# 本日の内容

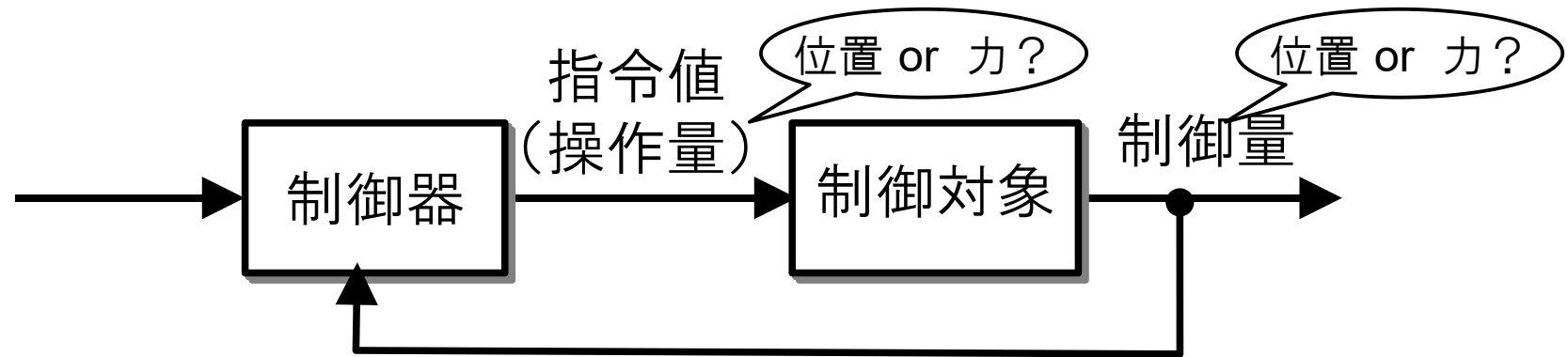
- ◆ [1] 力制御／力指令とは？
- ◆ [2] 菊植の研究について
- ◆ [3] 力制御ロボットには何が必要か
- ◆ [4] 力指令ベースの動作生成  
(話題提起のみ)



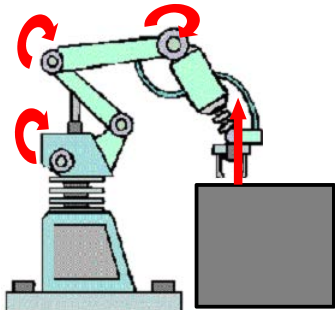
# [1] 力制御／力指令とは？

# 用語の整理：力制御／力指令とは？

- ◆ 私は、「力制御」と「力指令」を区別しています
- ◆ 「力制御」：所望の接触力を実現するために、モータへ何らかの指令を送ること
- ◆ 「力指令」：制御器からモータへ力を指令すること



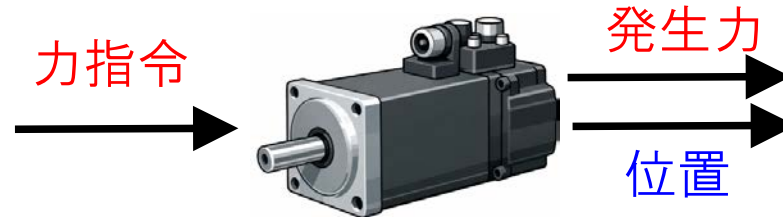
- ◆ 「力制御」が必要なのは、接触力  $\neq$  指令力であるとき



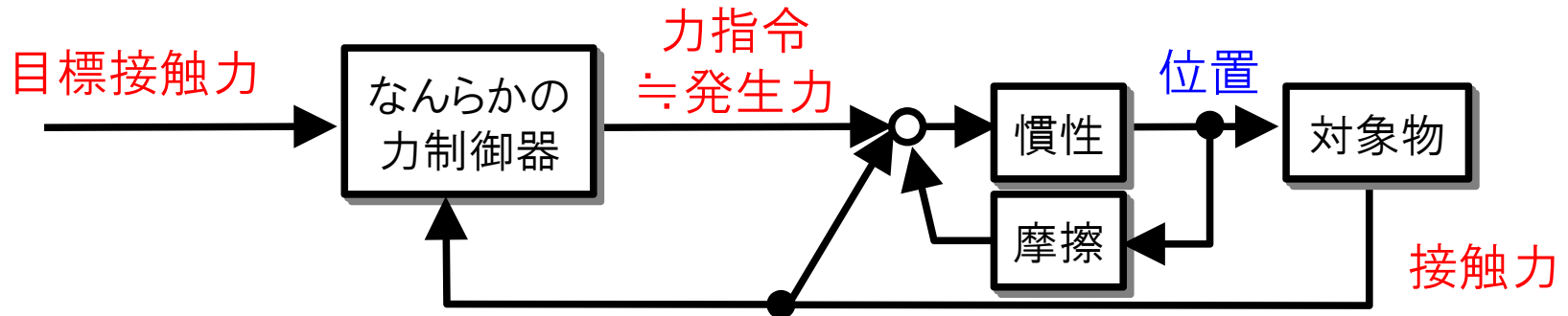
- ◆ たとえば、モータ発生力は、ギアボックス摩擦、リンク慣性などを介して、対象物に加わる  
⇒ 多くのロボットは、**力学的に透明**ではない  
(指令力がそのまま接触力として伝わらない)

# 位置指令・位置制御・力指令・力制御

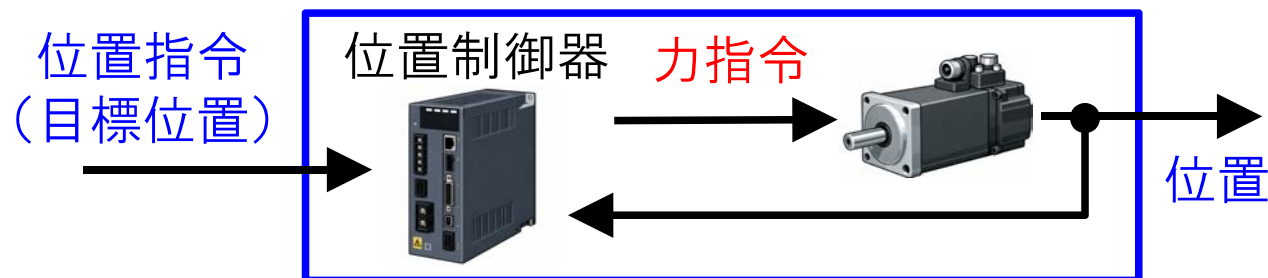
- ◆ モータは本来、力指令を受け付ける装置（電流に応じて力を発生. アンプの電流制御はひとまずブラックボックスと見なす）



- ◆ 接触力と指令力が明確に異なる場合、なんらかの力制御が必要



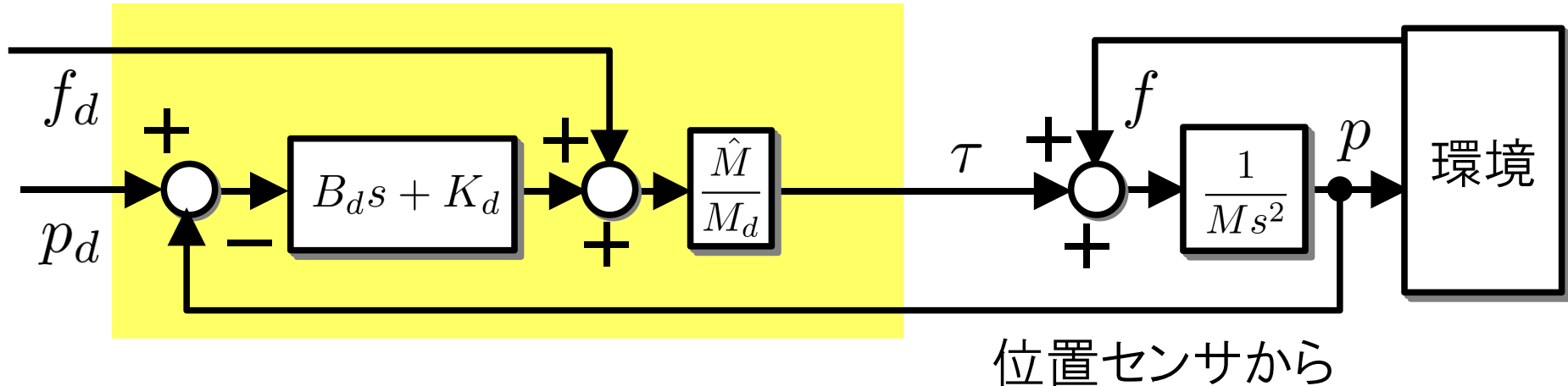
- ◆ 位置制御器と組み合わせると(疑似的に)位置指令型装置になる



# 力指令を介した力制御

## ◆ インピーダンス制御

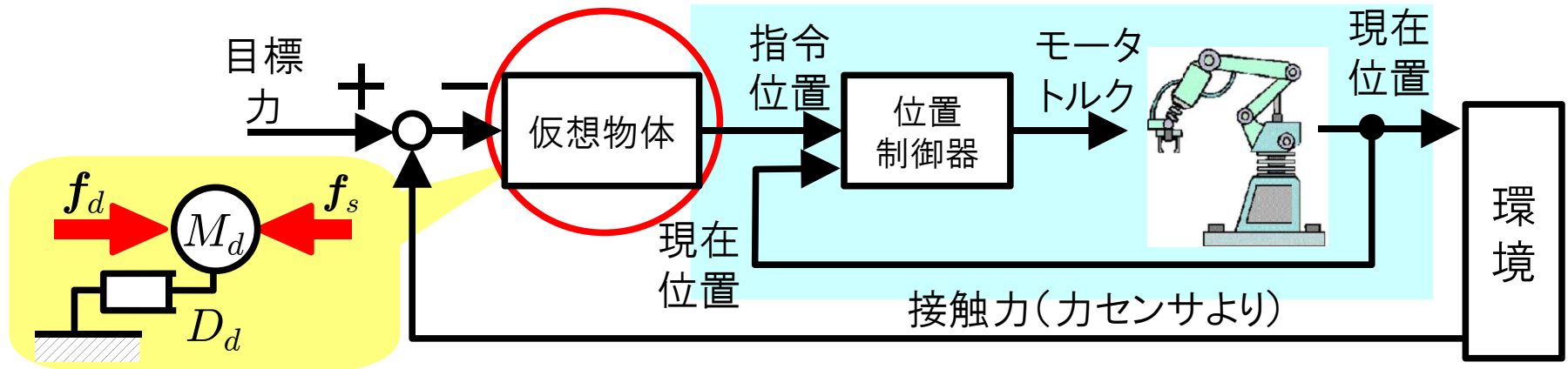
- 基本的には、位置・速度偏差から必要な力を算出し、バネ・ダンパ的な挙動を実現



- ◆ 緩い位置制御とみなせなくもない
- ◆ 機構の慣性や摩擦の影響を強く受ける
  - 動作が鈍くなる. ただし, 不安定化の危険は少ない
- ◆ 見かけの慣性を調整するのは難しい

# 位置指令を介した力制御

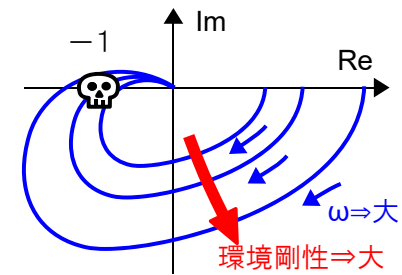
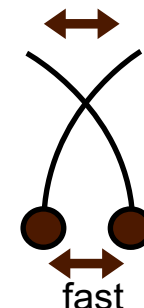
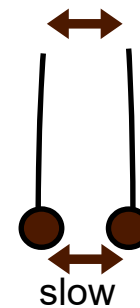
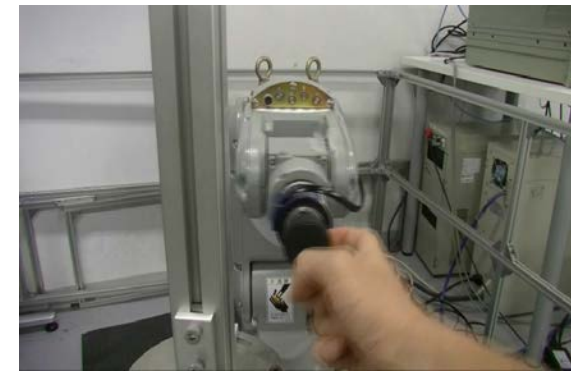
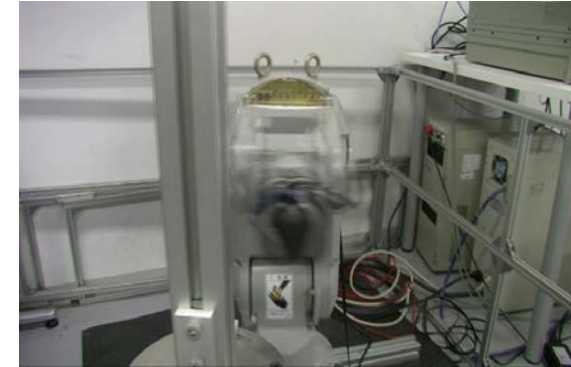
## ◆ アドミッタンス制御：位置と力の二重FB構造



- ◆ 目標動特性にしたがって動く「仮想物体」(proxy)を考える
- ◆ 仮想物体に追従するようにロボットを位置制御
  - 位置制御が正確ならば、仮想物体とロボットは同じ動特性になる
- ◆ 仮想物体には、環境からの外力と目標接触力が加わる
  - ⇒ 外力と目標接触力が釣り合う所で平衡状態になる
- ◆ 高摩擦・高慣性のロボットにも適用可能
  - 位置制御器が、ハードウェアの動特性を抑え込む

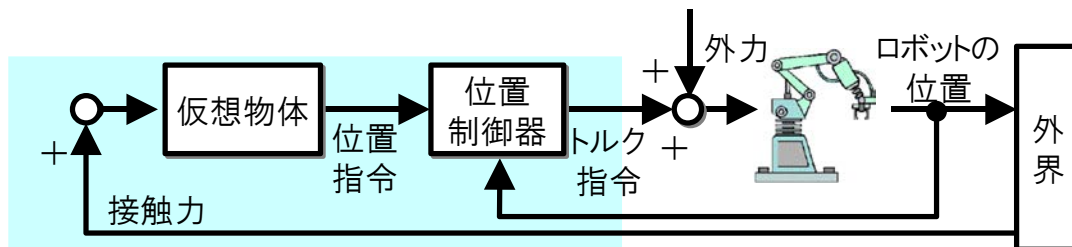
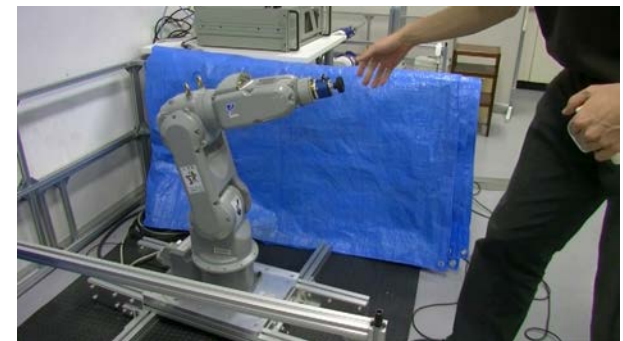
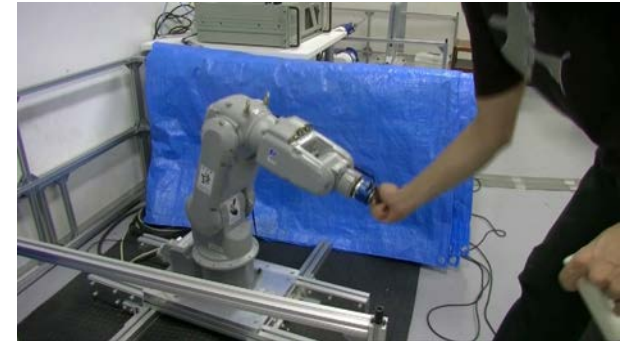
# アドミッタンス制御の問題点: その1

- ◆ 剛性の高い環境に接触すると不安定化
  - モータの効果とセンサ信号の間の遅れ(位相遅れ)が原因
  - 遅れの原因は, 制御器内の時間遅れ, モータ・センサ間の弾性, など
  - モータとセンサが物理的に離れていると(ノンコロケーションだと)特に危険
- ◆ 指定インピーダンス(粘性・慣性)を大きくして動きを鈍重にすると, 不安定化は抑制できる
- ◆ 内側ループの「位置指令」(位置制御)を信用しすぎるのは危険



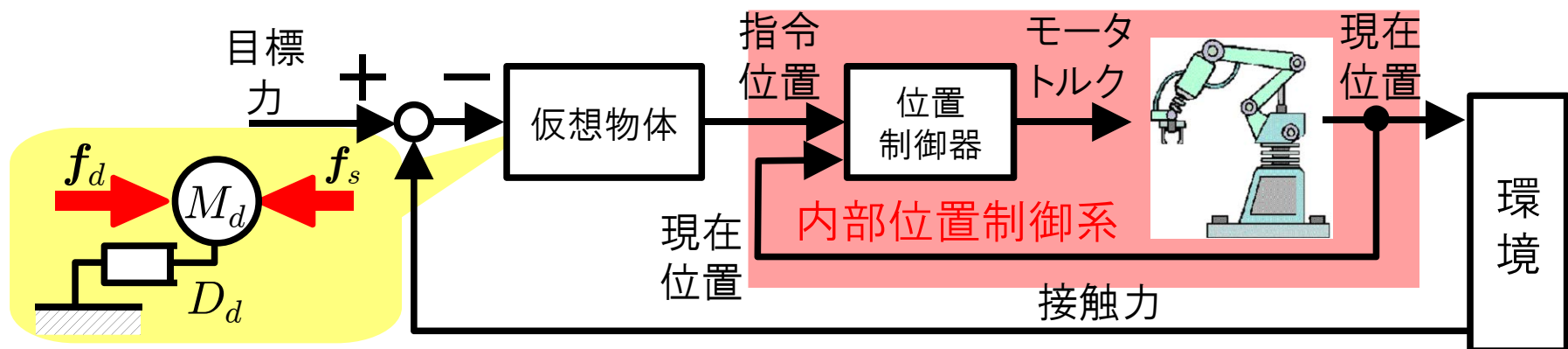
# アドミッタンス制御の問題点: その2

- ◆ カセンサ外での外力に反応しない。(位置制御器が位置を保持)
- ◆ カセンサ外で物体や人に接触すると、破損や事故の可能性
- ◆ **トルク制限**をかけると、指令位置と現在位置が乖離して、急激なスナップバックを生じる



# アドミッタンス制御の不安定化の抑制策

- ◆ 仮想物体の粘性・慣性を大きく設定する
  - ただし、動作が鈍重になる
- ◆ カセンサをモータの近くに配置
  - ただし、外力に鈍感になる
- ◆ 内部位置制御系の位相遅れを減らす
  - 摩擦・慣性補償, 微分量のフィードフォワードなど
  - ただし、センサのノイズが増幅されることもある
    - ▶ ノイズ抑制しようとするすると遅れが増大
    - ⇒ 「ノイズ抑制」 vs 「遅れ抑制」のトレードオフ

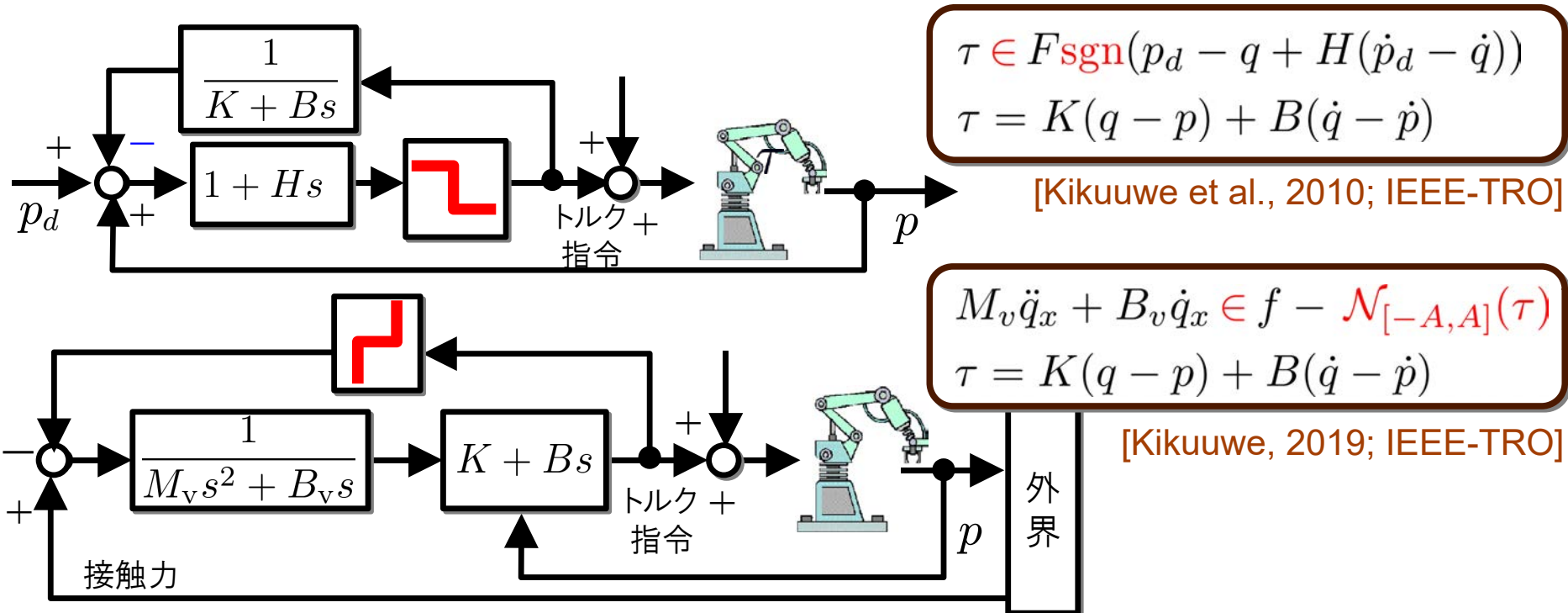




# [2] 菊植の研究について

# 菊植のコア技術

- ◆ **微分包含式**をベースとした制御則の構築
  - **集合値関数**を含む式で表される
- ◆ 制御則を**微分代数包含式**の形で構築し，後退オイラー法によって制御アルゴリズムを導出



# 成果物A: トルク制限付き位置制御



[Kikuuwe et al., 2010; IEEE-TRO]

- ◆ プロクシベース・スライディングモード制御 (**PSMC**) と命名
- ◆ PID制御と同等の正確さと、穏やかな応答特性を実現
  - 局所的には素早く応答（動特性を押さえ込む）
  - 広域的にはゆっくりと応答（安全）
  - いわば、安全併付きPID制御
- ◆ アクチュエータを「位置指令型」として扱いながら、**トルク制限**を設けることができる



# 成果物B: トルク制限付きアドミッタンス制御



[Kikuuwe, 2019; IEEE-TRO]

- ◆ トルクが制限内のときは通常のアドミッタンス制御と等価
- ◆ トルクが制限に達したときにも安全
  - カセンサ外で接触しても安全
  - トルク飽和時にも、仮想物体とロボットが乖離せず、バネのような復元力が発生しない
- ◆ トルクが制限されているので、不安定化しても(振動しても)危険は小さい

# AとBに共通する構造：「逆位置制御器」

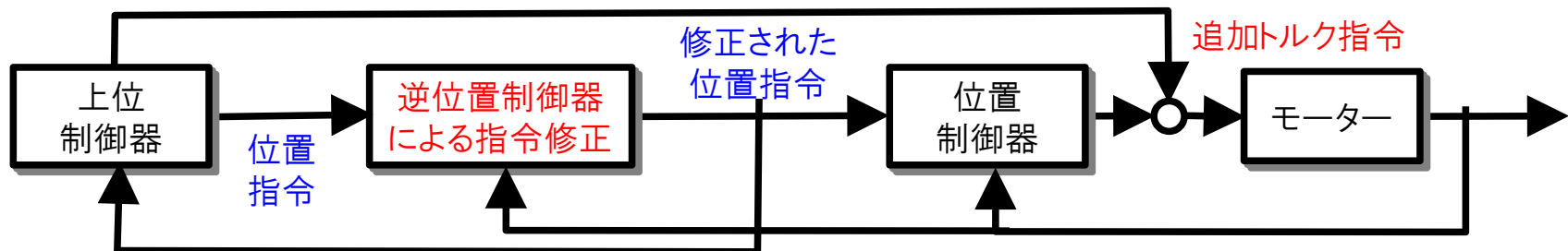
- ◆ 通常的位置制御器：目標位置に応じてトルクを発生

$$\tau = K(p_d - p) + B \left( \frac{p_d - p_{d,prv}}{T} - v \right)$$

- ◆ 逆位置制御器：指定トルクを発生する目標位置を算出

$$p_d = \frac{Kp + Bv + \tau + Bp_{d,prv}/T}{K + B/T}$$

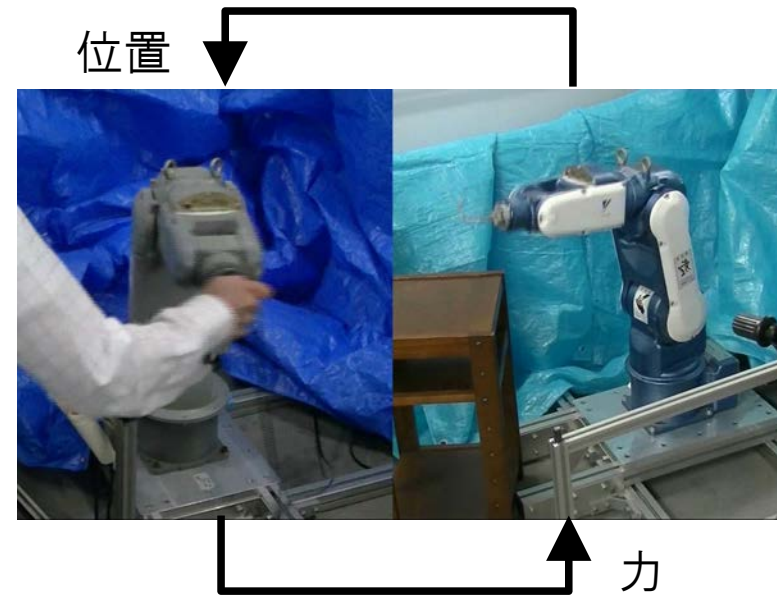
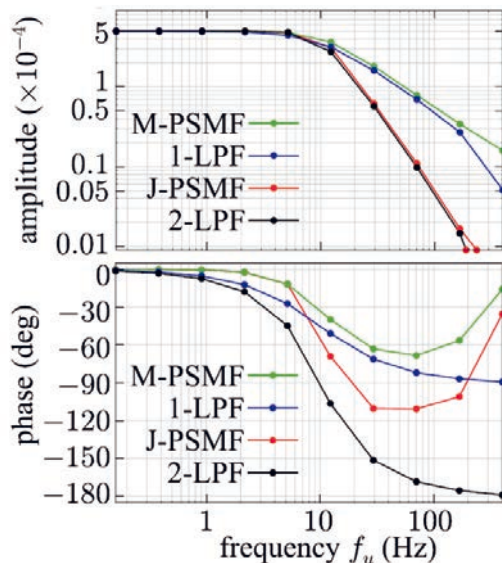
- ◆ 逆位置制御器によって、トルクが所定範囲内に収まるように位置指令を修正  
⇒ 制限トルク内の挙動と制限到達後の挙動を別々に設計



(上図はかなり大雑把な解釈です)

# 成果物C: 遅れの少ないノイズフィルタ

- ◆ 放物線型スライディングモードフィルタ (PSMF)
  - 同程度のノイズ除去効果を持つ線形ローパスフィルタと比較して、位相遅れが少ない
- ◆ 力信号に微分量のフィードフォワードを上乗せして力順送型バイラテラル制御系を安定化
  - 微分によるノイズを、遅れが少ないPSMFで低減

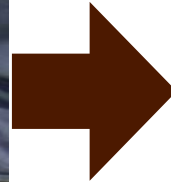
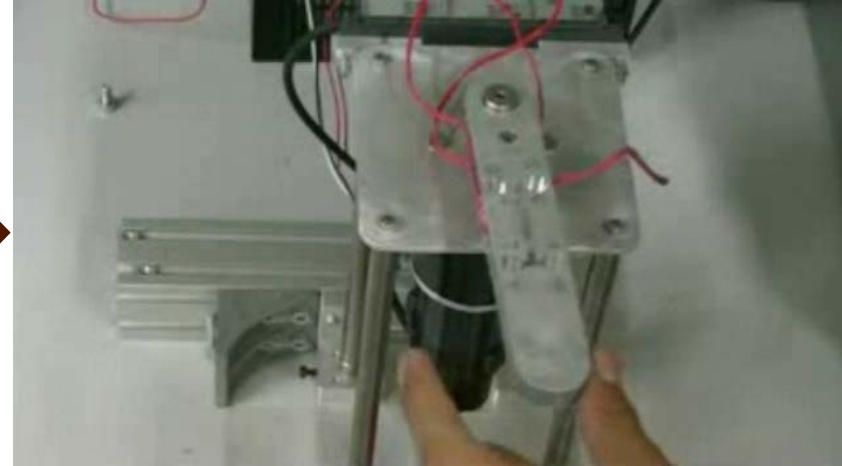
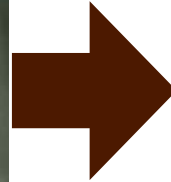
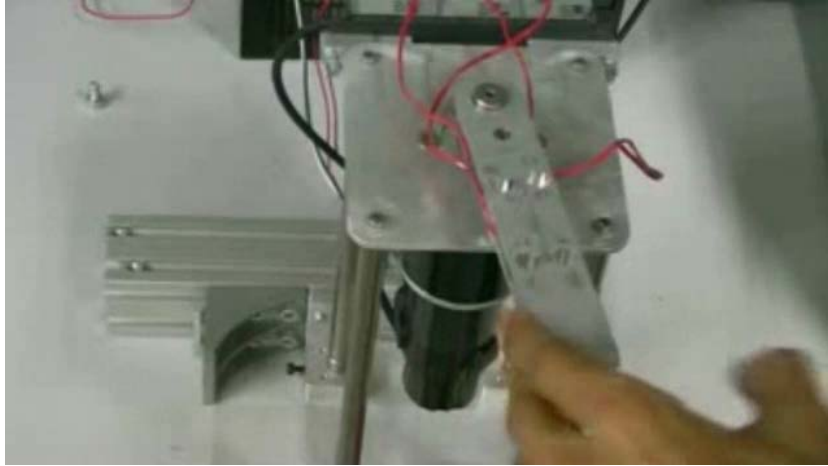


[Kikuuwe et al., 2015; IEEE-TCST]

◆ 15倍以上の力増幅を実現

# 成果物D: 摩擦補償

[Aung et al., 2015; ASME-DSMC]  
[Iwatani & Kikuuwe, 2017; SICE-JCMSI]



- ◆ モータートルクによって摩擦力をキャンセル
  - 摩擦補償によってアドミッタンス制御の安定性も向上

[Aung & Kikuuwe, 2017; Mechatronics]

# 最近の研究

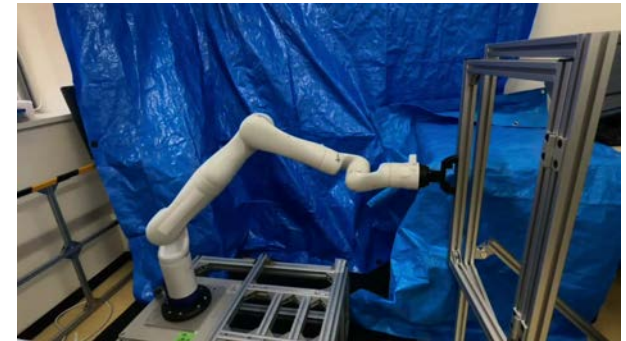
- ◆ トルク制限付きアドミッタンス制御の拡張
  - トルクセンサ・作業空間・冗長マニピュレータに拡張

[Kikuuwe, 2025; IEEE-TRO]

[三好, 菊植, SICE-SI2025]

- ◆ トルク制限付きのバランス維持制御

[論文執筆中]



- ◆ 最下位ループにトルク制限付きの位置制御を入れて、力制御に近い動き(?)を実現



# [3] 力制御ロボットには何が必要か

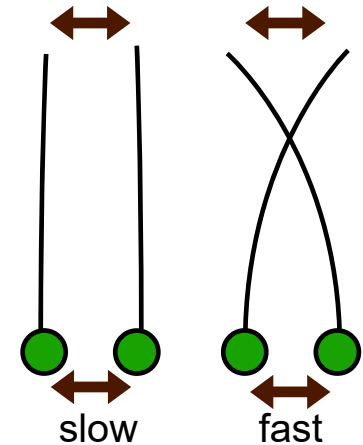
# 力制御の要件

## 力制御は不安定化との戦い

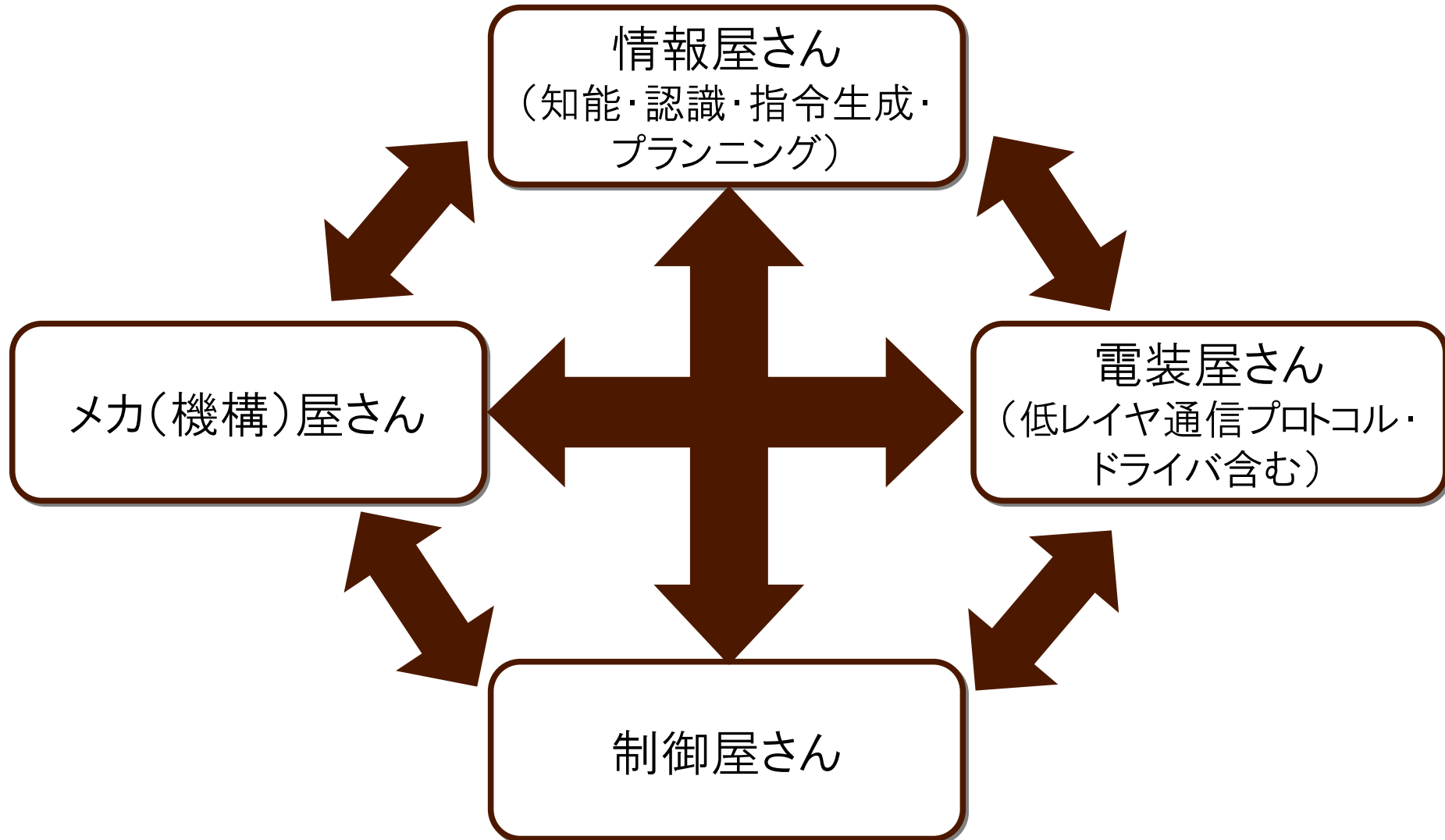
- ◆ 力指令(単ループ or 開ループ)に徹することが可能なら  
(力制御(二重ループ)が避けられるなら), それが一番ベスト
  - 低摩擦・低慣性のモータ(QDDなど)を用いる
  - どの程度の摩擦・慣性が許容されるかは用途による
- ◆ 力制御(アドミッタンス制御)を使わざるをえない場合
  - **1kHz以上のトルク指令が望ましい**
  - 力センサとモータはできるだけ近づける
    - ▶ 力センサとモータの間の機構はできるだけ固く
  - エンコーダの分解能はできるだけ高く
    - ▶ 出力軸側エンコーダは分解能が低くなりがち
  - 内部位置制御はできるだけ高ゲインに

# 制御屋からのお願い

- ◆ 機構・モーター・サーボ系のサブミリ秒の応答特性を軽視しないでください！
  - 速度・位置(角度)指令モーターを過信しないでほしい
- ◆ 慣性と摩擦の影響除去には、サブミリ秒周期のトルク指令が必要
  - 位置・速度のフィードバックでは、かならず遅れが生じる
  - 高周波の動作性能 ⇒ 力制御の安定性に直結（不十分だと、機構弾性・制御器内の遅れの影響が増幅される）
  - 低速動作性能 ⇒ 不十分だと、摩擦によるスティックスリップが発生
  - （加速度センサがあればなお良い？）



# 専門(分担)間の歩み寄りが必須



# 力制御ロボット成立の要件(制御屋目線)

## 【メカ・機構について】

- ◆ 機構は低摩擦・低慣性に
  - QDDモータなど
- ◆ カセンサとモータの間はできるだけ近く・固く
- ◆ エンコーダは高分解能に
  - 出力軸側も高分解能に

## 【電装系について】

- ◆ 1kHz以上でトルク指令できる通信プロトコルの採用
  - ethercatだと○. CANだと不安
- ◆ センサの組込ノイズフィルタは最小限に
- ◆ 配線の取り回しに注意？
  - 無限回転したときに断線の危険

## 【指令生成について】

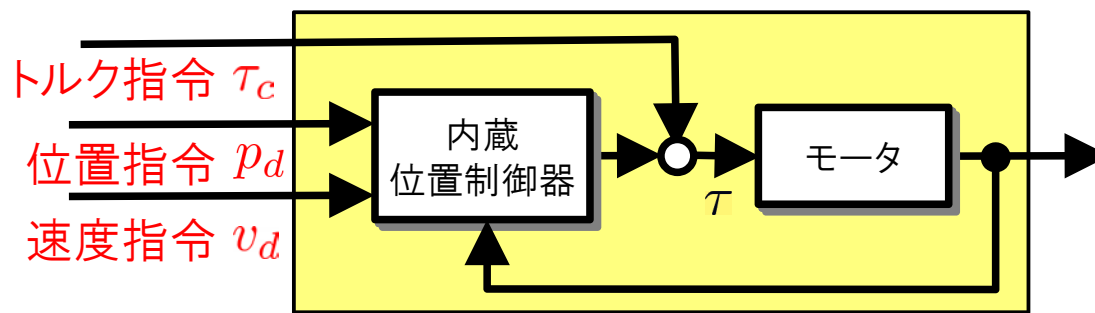
- ◆ カ・トルク・インピーダンス(剛性・など)を意識した指令生成

## 【制御について】

- ◆ ローレベル位置制御は高ゲインに
- ◆ 摩擦・慣性補償の実装
- ◆ 位相進みの実装
  - 微分量の重ね合わせ
- ◆ ノイズフィルタは位相遅れの少ないものを採用
- ◆ 適切な手法でのトルク制限
- ◆ (機構弾性等のモデル化と補償)

# 有望だと思われるパーツ（私見）

- ◆ 位置，速度，トルク，比例ゲイン・微分ゲインの指令を1kHzで受け付けるインテリジェントモータ
  - （通称？）「MITプロトコル」などと呼ばれていることが多い



$$\tau = \tau_c + K_p(p_d - p) + K_d(v_d - \dot{p})$$

- ◆ おそらく内部位置制御器は1kHz以上の周期  
⇒ 外側ループで位置制御するよりも高ゲインが可能
- ◆ 適切な摩擦・慣性補償のトルクを重ね合わせて，速応性を高めることも可能
- ◆ 内部位置制御器が既知なので，「逆位置制御器」を構成可能 ⇒ トルク制限をかけることも可能

# 有望だと思われるパーツ（私見）

## ◆ 鈦虎機器人 (Ti5 Robot)

- <https://www.ti5robot.com/h-col-121.html>
- 探したところ, CANだけです

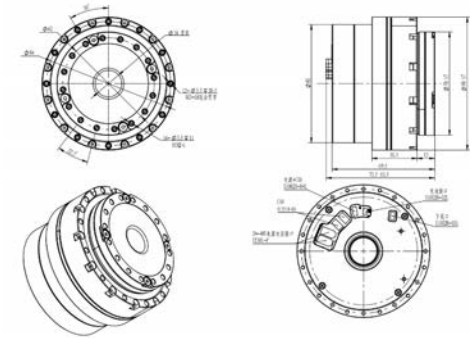
## ◆ DaMiao (达妙科技有限公司)

- <https://www.damiaokeji.com/>
- CAN, CAN FD のみ？

## ◆ MyActuator (苏州脉塔智能科技)

- <https://www.myactuator.cn/>
- <https://www.myactuator.com/>
- Ethercat対応のものもあるようです。
- MITプロトコル対応

CRA-RI70-90-PRO-2-XXX

产品介绍  
Product Introduce

全新一代  
行星模组V4系列

- 机器人专用系列
- EtherCAT+CAN BUS
- 双编码器

正式上线



5

PVT (MIT 模式 / MIT Mode)

位置-速度-力矩混合控制

/ Position-

Velocity-Torque hybrid control



[4]  
「力指令」ベースの動作生成  
(話題提起)

# 人間は位置指令？ 力指令？

- ◆ おそらく人間は，力指令の生き物
  - 人間の位置センサ(筋紡錘)は精度が悪い．視覚なしだとズれる．  
⇒ 位置制御はしていない
  - 力は，どちらかというと，感じるものというよりは自分で出すもの．  
⇒ 力制御もしていない

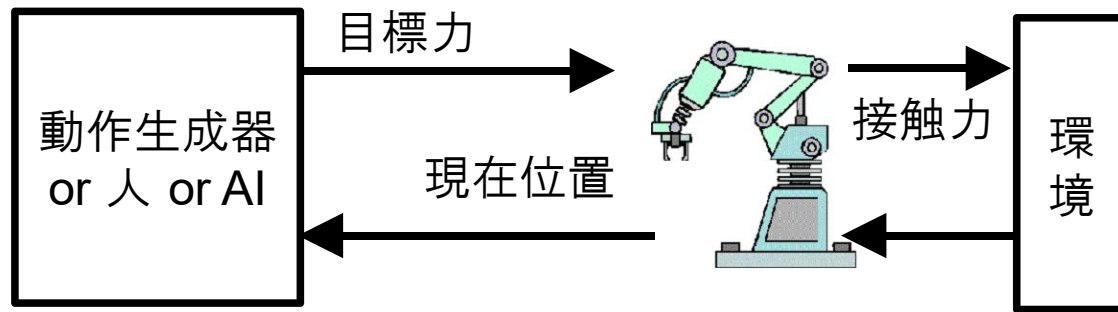


\* ChatGPT  
で生成

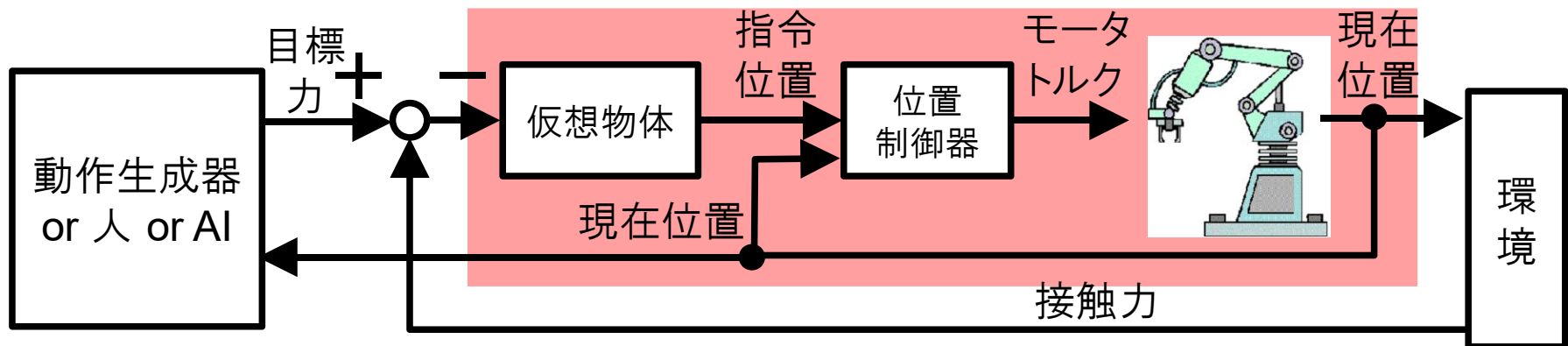
- ◆ なんとなく腕・指で力を出して対象にアプローチして，接触を検知したら，それなりに力を出し方を適応させる
- ◆ 接触／非接触で劇的な制御器の切り替えはおそらくない
- ◆ **接触作業では力指令ベースで考えたほうが良いのかも**

# 力指令型の動作生成の実装

- ◆ 外側から力指令, 内側も力指令
  - 低摩擦・低慣性のロボットが必要



- ◆ 外側から力指令, 内側は位置指令
  - アドミッタンス制御ベース. **安定性確保が必須**

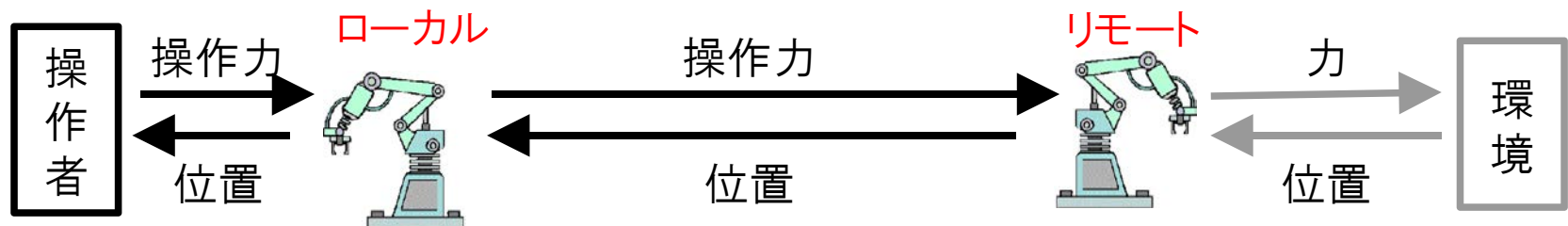


# 力指令ベースの作業形態の例？

- ◆ 力順送型バイラテラル制御
  - 操作者がロボットに力を指令し，位置を知覚



[Kikuuwe et al., 2015; IEEE-TCST]





# まとめ

# まとめ

- ◆ [1] 力制御とは
  - 力制御と力指令
  - 位置指令にもとづく力制御: アドミッタンス制御
- ◆ [2] 菊植の研究
  - トルク制限付き位置制御とアドミッタンス制御
  - 位相遅れの少ないノイズフィルタ, 摩擦補償
- ◆ [3] 力制御には何が必要か
  - 力指令に近い状況がベスト
  - それが無理なら, ハードウェアの要件に注意が必要
  - 情報 / メカ / 電装 / 制御の歩み寄りが必要
  - 位置制御内蔵のトルク指令QDDが有望
- ◆ [4] 力指令ベースの動作生成(話題提供)
  - 未知環境での作業は力指令ベースのほうがよい?
  - 力指令を生成するアルゴリズム(エージェント?)と力指令を受け取る制御則を組み合わせるのがよいのかも