



ロボットの力制御：論点と要件の整理

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/>

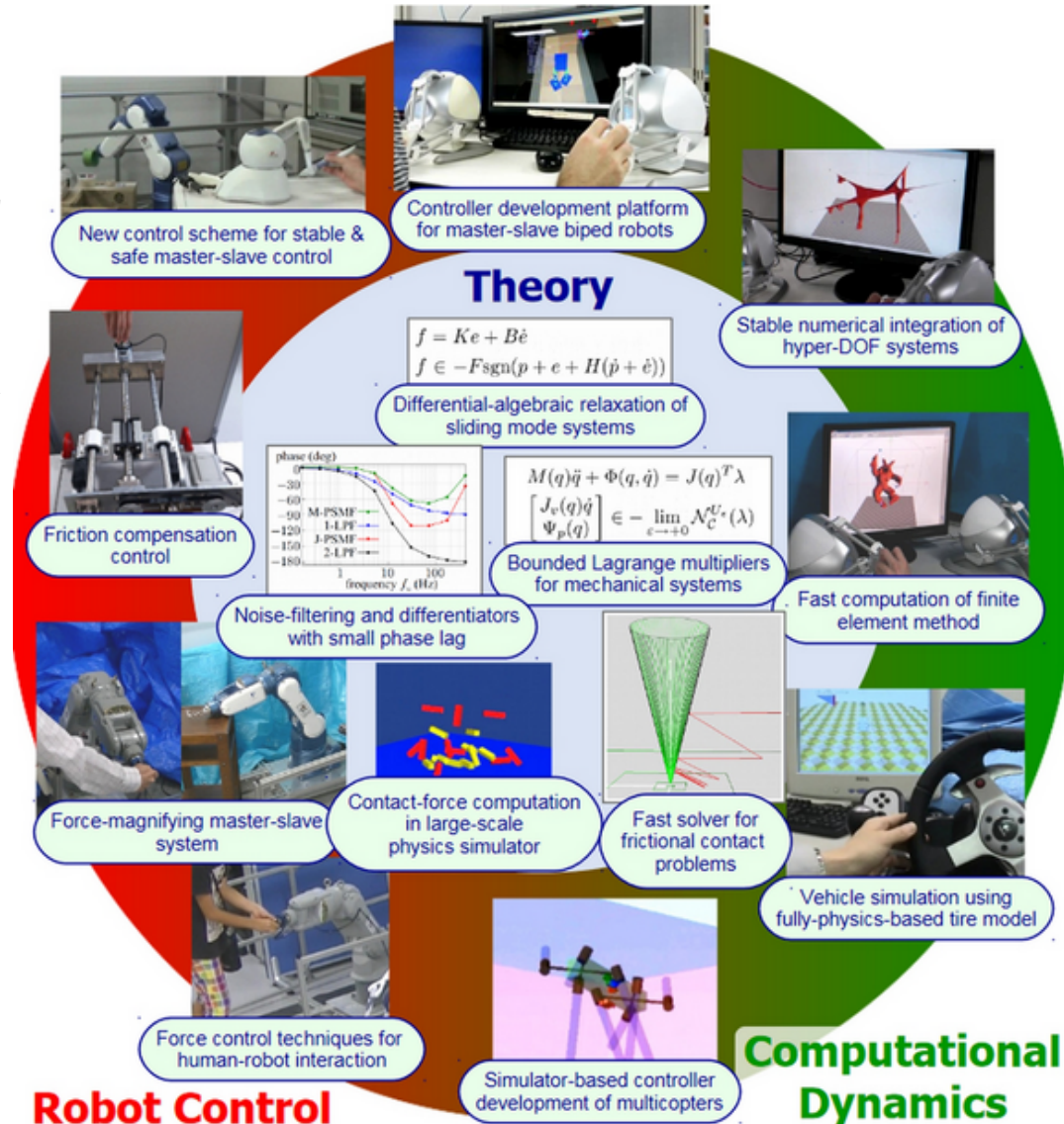
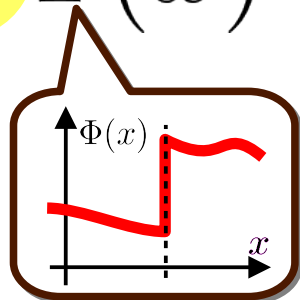
<https://speakerdeck.com/kikuuwe/>

2026/04/23

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

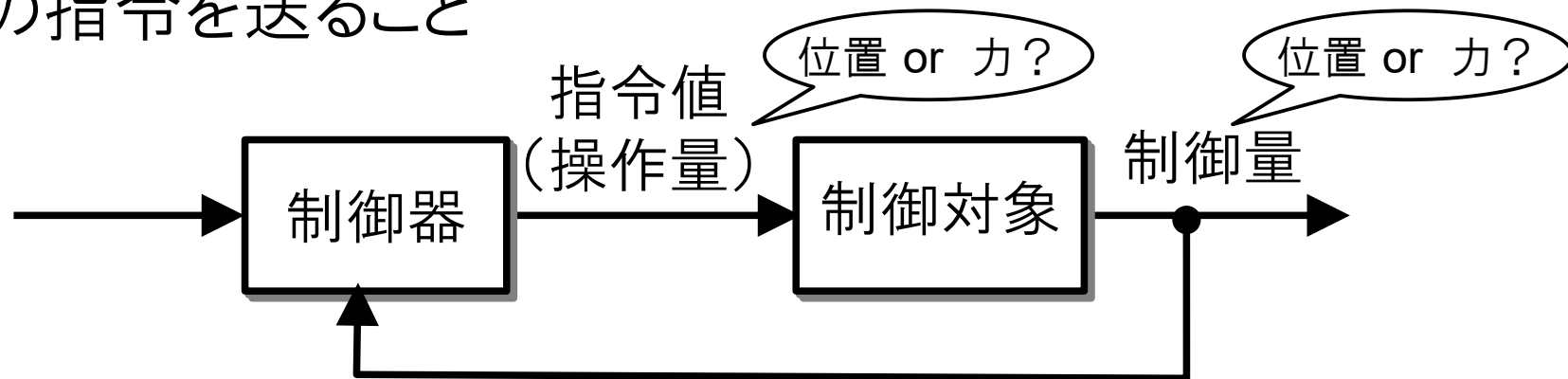
- ◆ [1] 力制御とは？
- ◆ [2] 菊植の研究について
- ◆ [3] 力制御には何が必要か



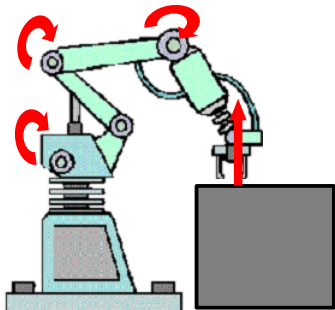
[1] 力制御とは？

用語の整理：力制御とは？

- ◆ 私は、「力指令」と「力制御」を区別しています
- ◆ 「力指令」: 制御器からモータへ力を指令すること
- ◆ 「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



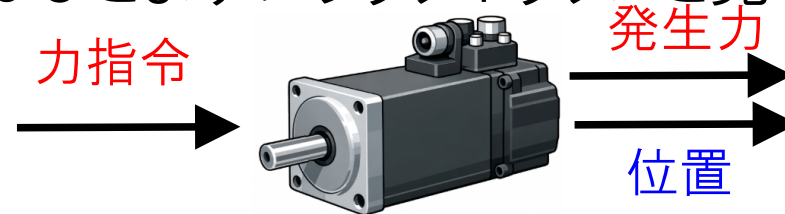
- ◆ 「力制御」が必要なのは、接触力 \neq 指令力であるとき



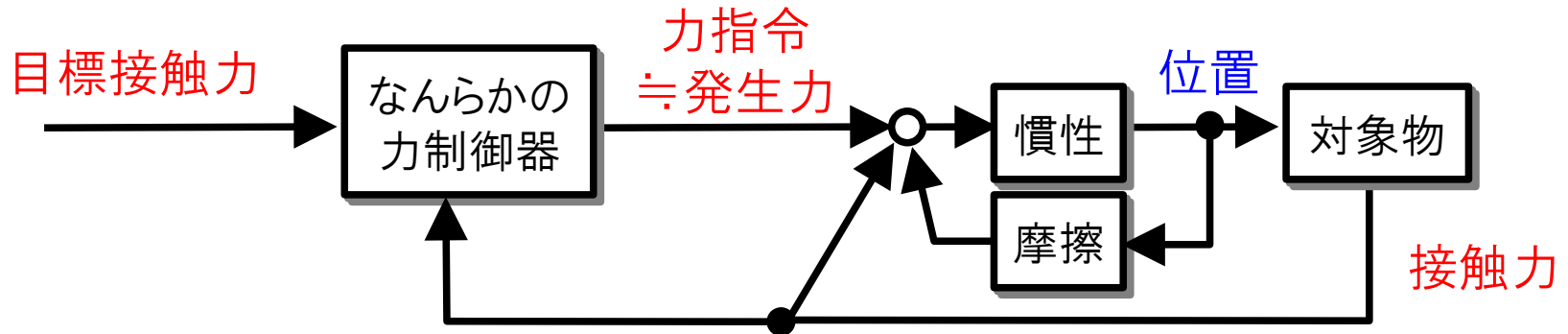
- ◆ たとえば、モータ発生力は、ギアボックス摩擦、リンク慣性などを介して、対象物に加わる
⇒ 多くのロボットは、**力学的に透明**ではない
(指令力がそのまま接触力として伝わらない)

位置指令・位置制御・力指令・力制御

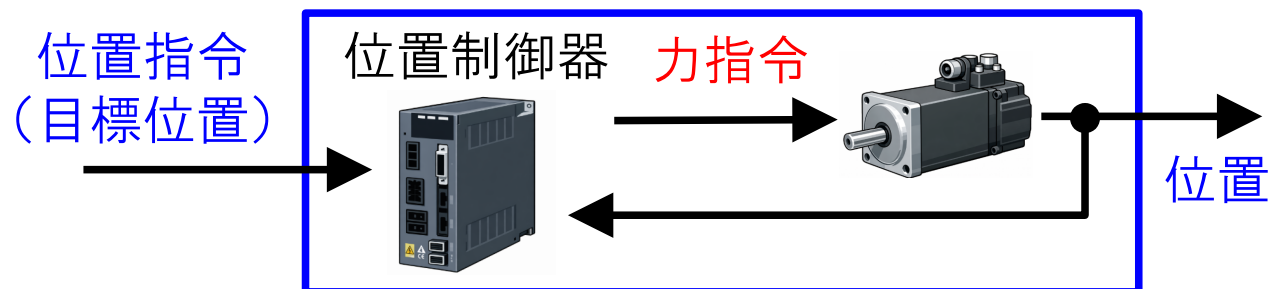
- ◆ モータは本来、力指令を受け付ける装置（電流に応じて力を発生. アンプの電流制御はひとまずブラックボックスと見なす）



- ◆ 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

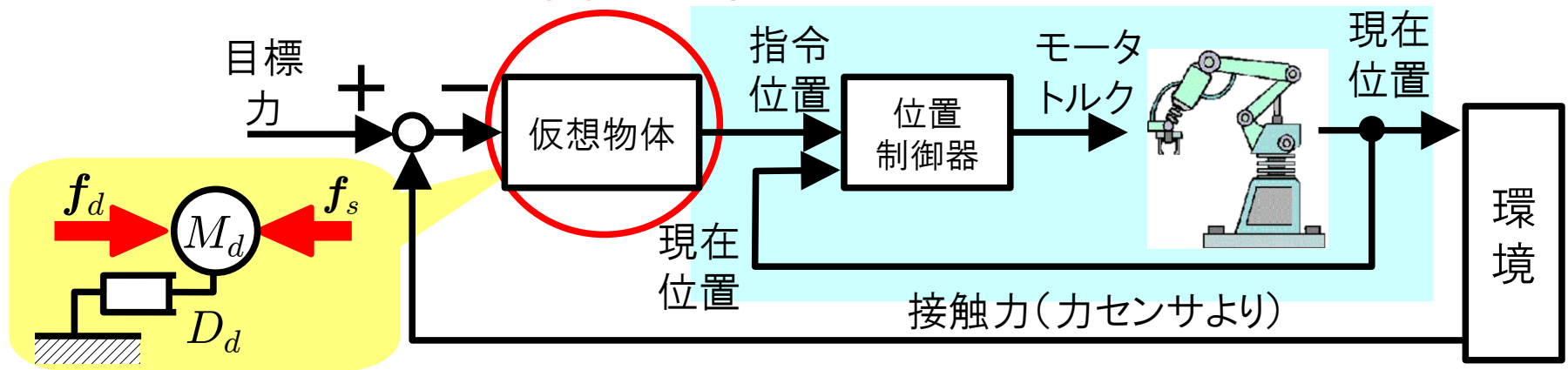


- ◆ モータは、位置制御器と組み合わせると、位置指令型装置に化ける



位置指令を介した力制御

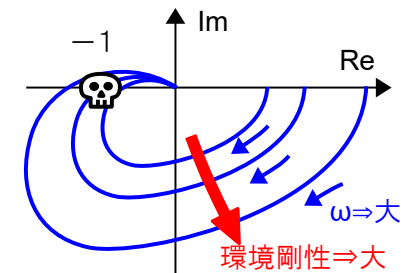
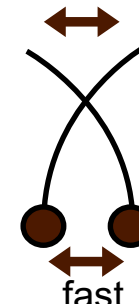
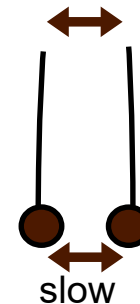
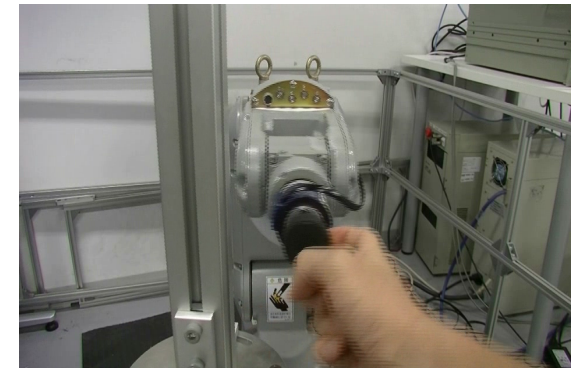
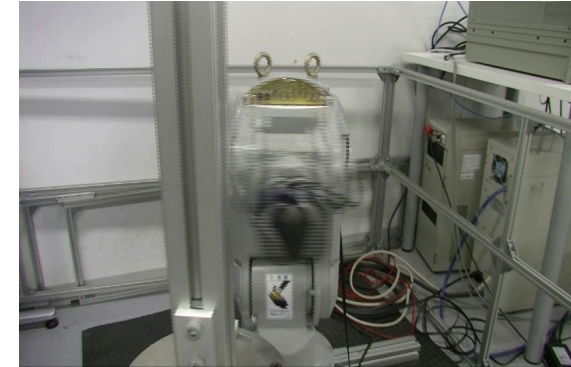
◆ アドミッタンス制御：位置と力の二重FB構造



- ◆ 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

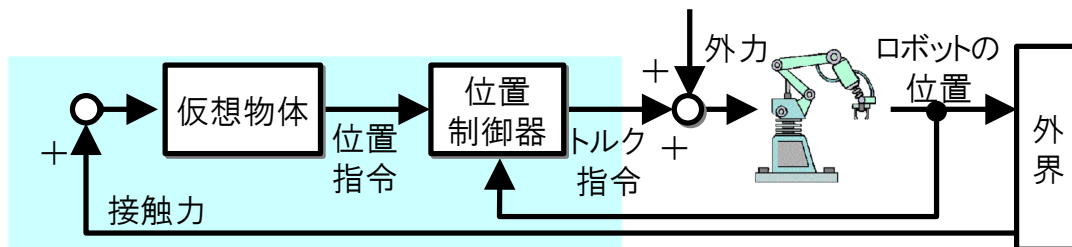
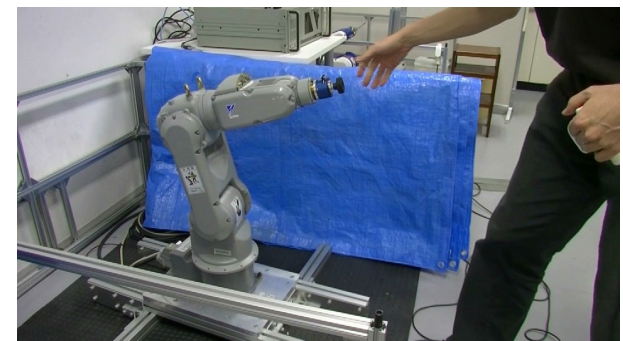
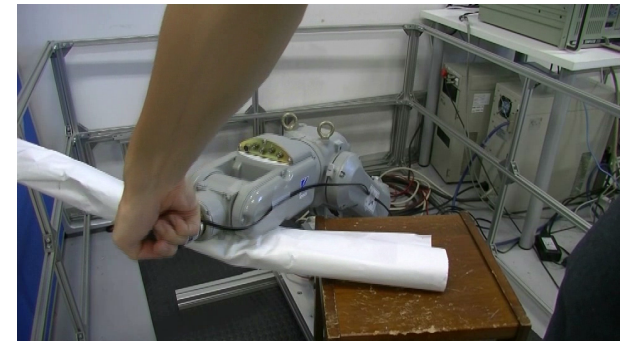
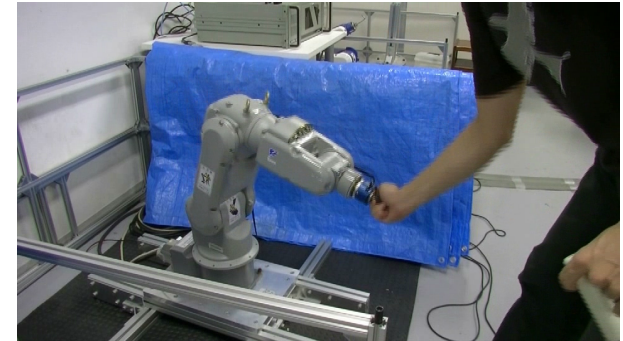
アドミッタンス制御の問題点: その1

- ◆ 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



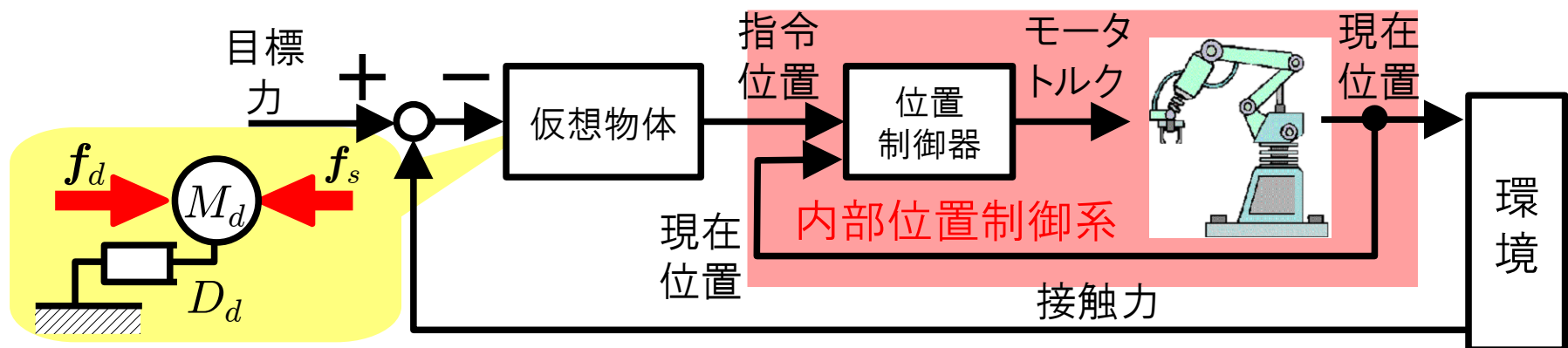
アドミッタンス制御の問題点: その2

- ◆ 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



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

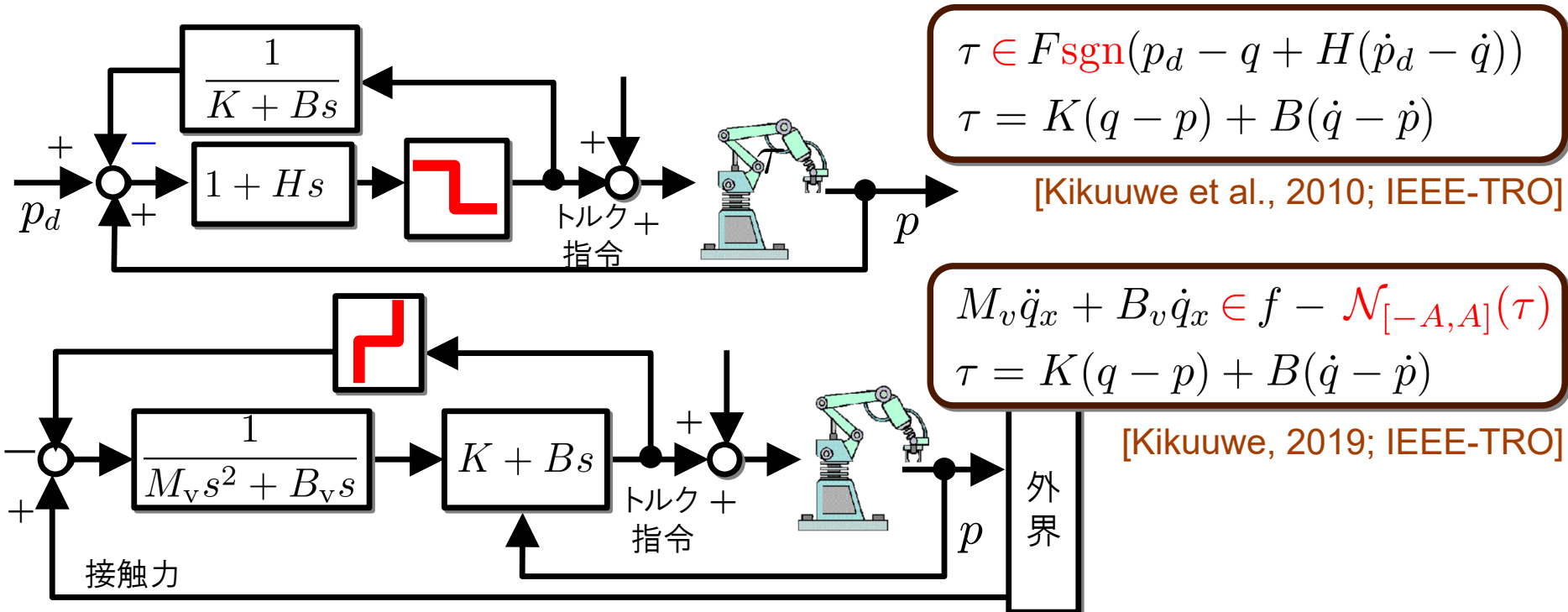




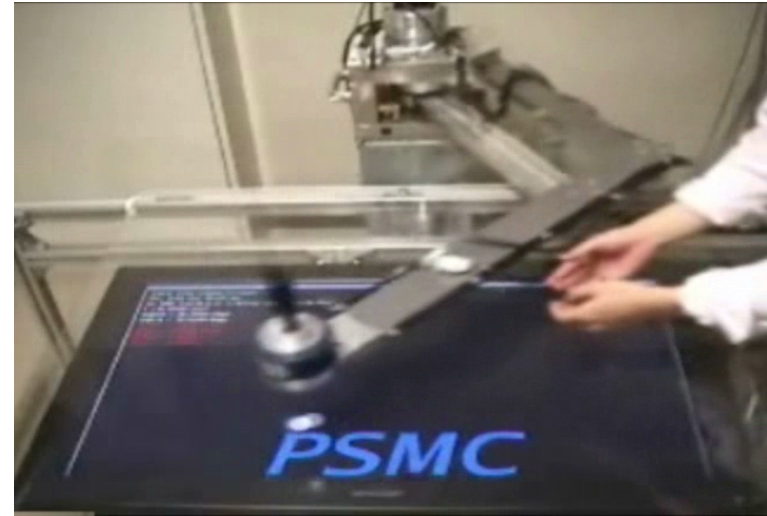
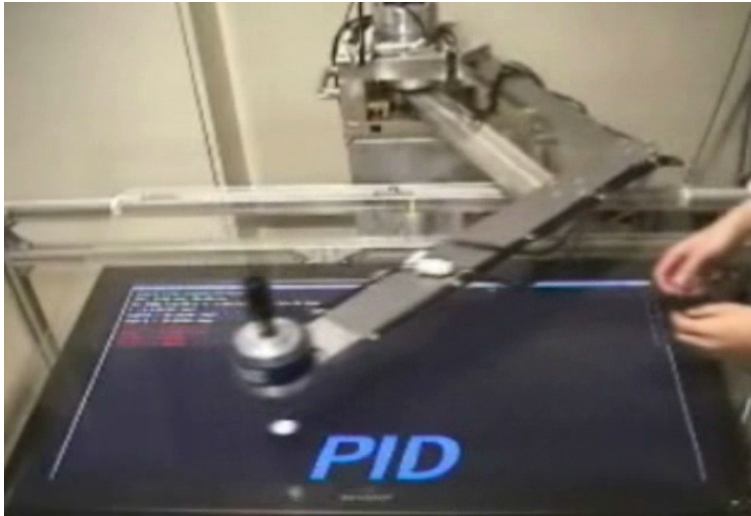
[2] 菊植の研究について

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
- ◆ 制御則を連立微分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

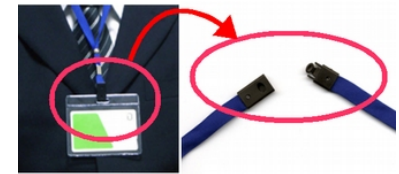


成果物A: トルク制限付き位置制御

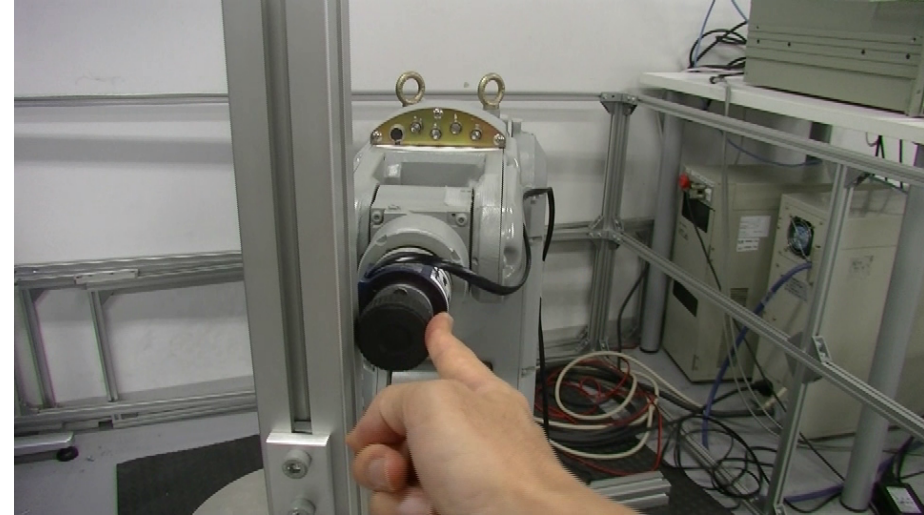


[Kikuuwe et al., 2010; IEEE-TRO]

- ◆ 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、安全弁付き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」

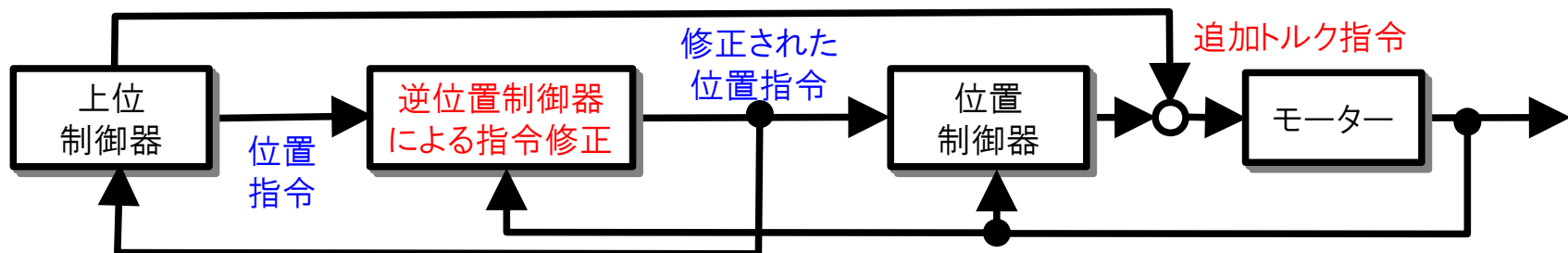
- ◆ 通常的位置制御器：目標位置に応じてトルクを発生

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

- ◆ 逆位置制御器：指定トルクを発生する目標位置を算出

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

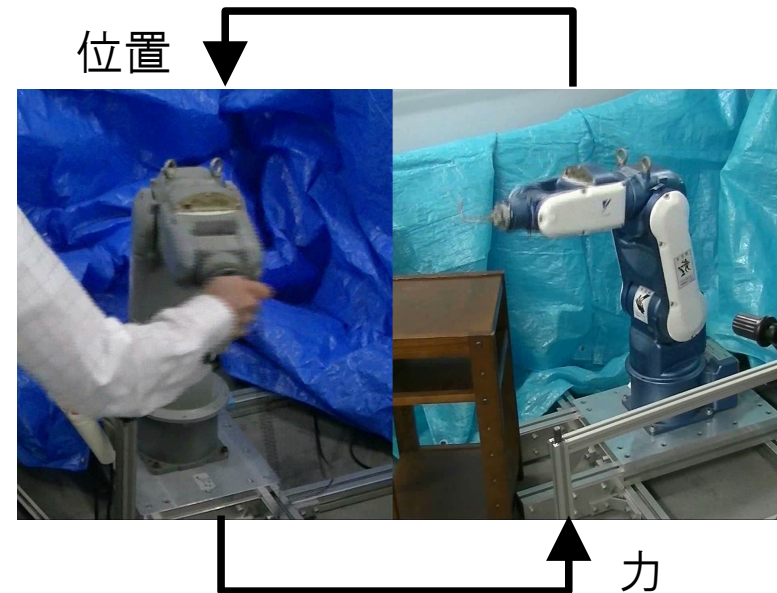
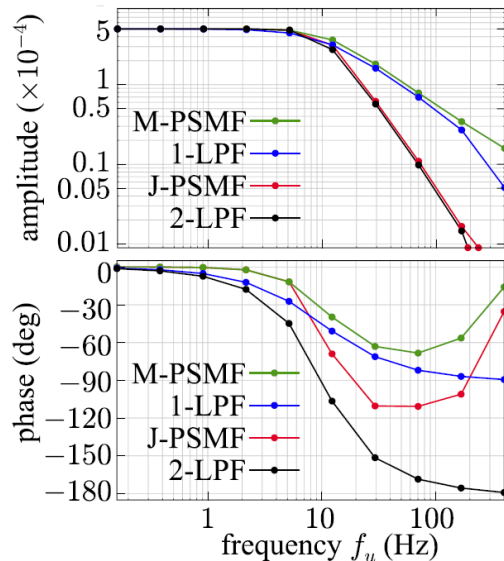
- ◆ 逆位置制御器によって、トルクが所定範囲内に収まるように位置指令を修正
⇒ 制限トルク内の挙動と制限到達後の挙動を別々に設計



(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

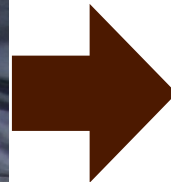
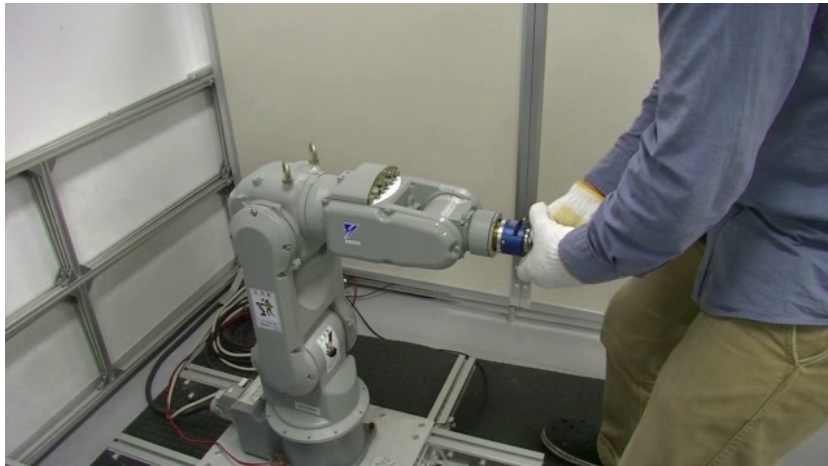
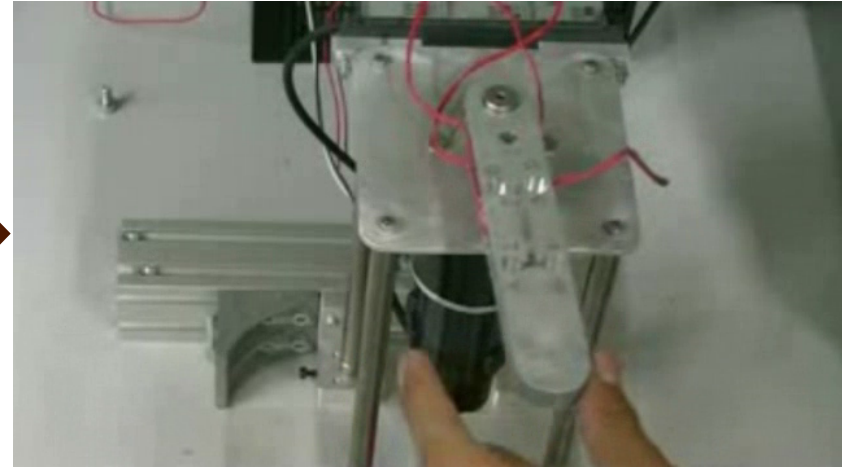
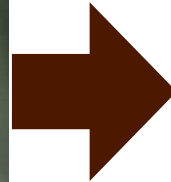
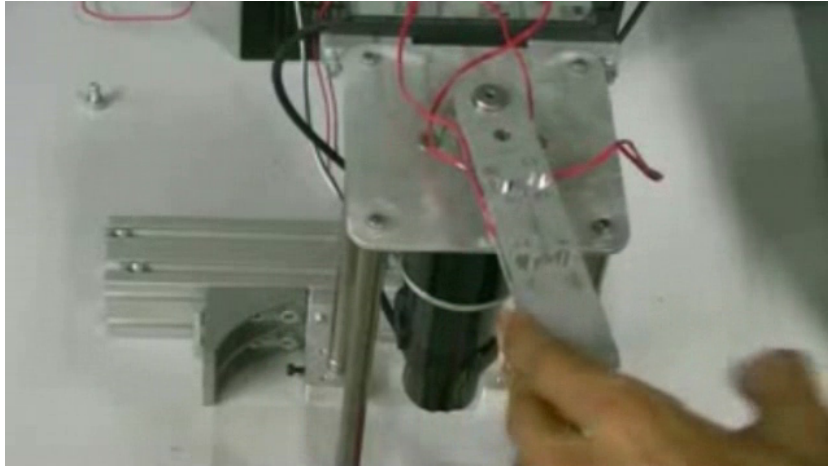


[Kikuuwe et al., 2017; IEEE-TCST]

◆ 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

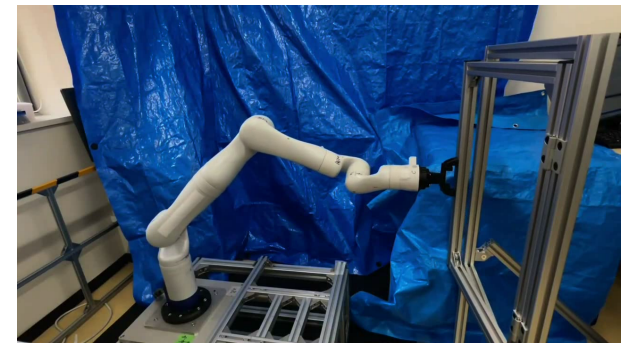
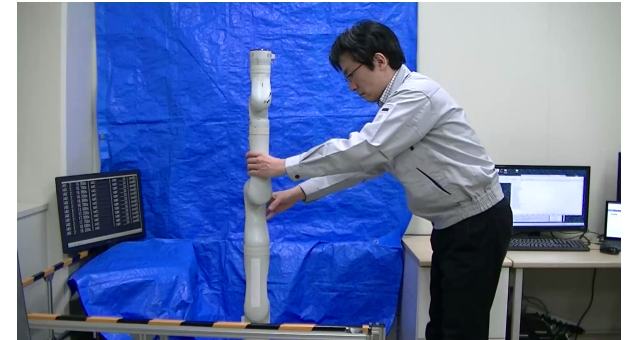
◆ トルク制限付きアドミッタンス制御の拡張

- 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]

◆ 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] 力制御には何が必要か

力制御に必要なハードウェア要件

力制御は不安定化との戦い

- ◆ 力指令(単ループ)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
 - 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)を使わざるを得ない場合
 - **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

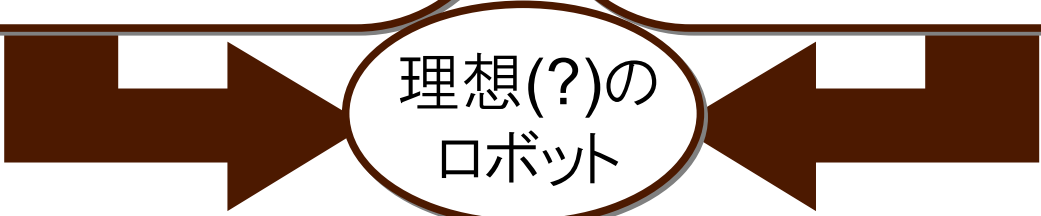
ハードウェアと制御の歩み寄りが必須

【ハードウェア】

- ◆ 低摩擦・低慣性
 - QDDモータなど
- ◆ 1kHz以上のトルク指令
 - CANだとおそらく不十分
- ◆ カセンサとモータの間はできるだけ近く・固く
- ◆ 高分解能エンコーダ
 - 出力軸側も
- ◆ センサの組み込みノイズフィルタは最小限に

【制御】

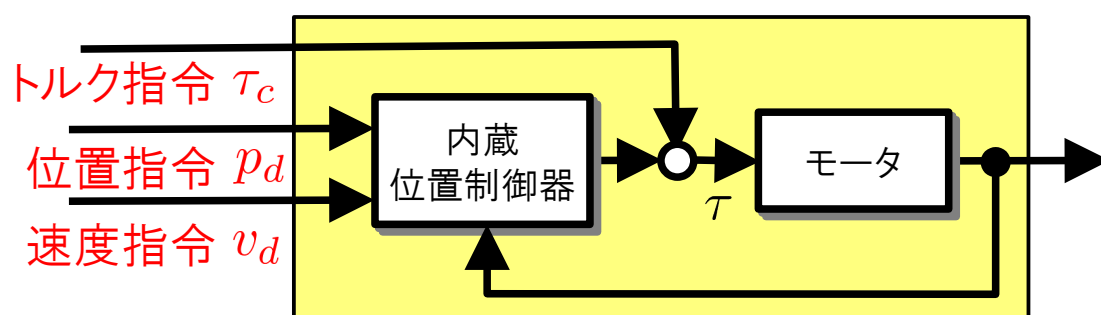
- ◆ 高ゲイン位置制御
- ◆ 摩擦・慣性補償
- ◆ 位相進み
 - 微分量の重ね合わせ
- ◆ 位相遅れの少ないノイズフィルタ
- ◆ 適切な手法でのトルク制限
- ◆ 機構弾性等のモデル化と補償



理想(?)の
ロボット

有望だと思われる技術（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QDD



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

- ◆ 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



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
- ハードウェアと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