

～ ロボットの力制御：要件の整理 ～

講演者：広島大学 先進理工系科学研究科 機械力学研究室 菊植 亮

まとめ：佐藤知正（東大名誉教授）

概要

ロボットが対象物や環境と力をやりとりしながら作業を行うためには、ロボットの力制御技術が不可欠である。しかし力制御は本質的に不安定化との戦いであり、その実現には制御理論のみならず、機構・電装・ソフトウェアにまたがる体系的な技術設計が求められる。本講演では、広島大学菊植研究室の成果をもとに、まず「力制御」と「力指令」の概念整理をする。次に、インピーダンス制御・アドミッタンス制御の原理とその問題点を述べ、トルク制限付き位置制御（PSMC）・アドミッタンス制御・ノイズフィルタ・摩擦補償の各成果を紹介し、さらに力制御ロボットの実現に必要なハードウェア要件を整理する。最後に、人間は本質的に力指令の生き物であるという観点から、力指令ベースの動作生成という新たな研究方向を話題提起する。質疑応答では、力制御を見据えたロボットハードウェアの国内開発の重要性、および MIT プロトコル対応インテリジェントモータの有望性が論じられたので、それにもふれる。

第 1 章 緒論

ロボットが物体を操作したり、人と協調して実作業をする場面では、ロボットが対象物、環境や人体に対して適切な力をおよぼすことが求められる。この「力制御」は、単にロボットを動かすだけでなく、接触時の安全性・作業の精度・柔軟な適応性を担保するうえで中核的な技術である。ところが力制御には根本的な困難が潜んでいる。すなわち、力制御とは本質的に不安定化との戦いなのである。

現在、産業用ロボットの大半は位置指令型の制御系を採用しており、モータと位置制御器が一体としてパッケージ化されて提供されている。ユーザーは目標位置を指令すれば、それが忠実に実現される。この仕組みは作業の繰り返し精度という観点では非常に優れているが、外力に柔軟に応じる「力制御」を実現しようとすると、途端に困難が生じる。

指令した力がそのまま接触力として伝わらない理由として、ギアボックスの摩擦、リンクの慣性、モータとセンサ間の物理的距離（非コロケーション）に起因する位相遅れなどが挙げられる。これらの要因が重なると、カフイードバックループは容易に不安定化してしまう。

本講演は、こうした課題に対して講演者が長年取り組んできた研究の成果を整理し、力制御の本質と今後の方向性を論じたものである。この研究の特徴は、非平滑システムの数学的枠組みである微分包含式をベースとして、トルク制限・摩擦・不安定化といった制御上の難問を数学的にエレガントに扱う点にある。

その一方で、ヒューマノイドは、多関節・多自由度の人間型肢体を持つため、産業用ロボットのような高剛性機構の確保が難しく、本質的に「柔らかい

マニピュレータ」を持つことになる。このような柔らかい機構では、摩擦・弾性・慣性が複雑に絡み合い、位置精度を実現することが困難になる。本講演でとりあげる力制御の本質と今後の方向性は、今後のヒューマノイド制御にも、資すると考える。

本原稿では以下の構成で記述する。第 1 章に続く第 2 章では、「力制御」と「力指令」という基本概念を定義し、アドミッタンス制御・インピーダンス制御の原理とその問題点を概説する。第 3 章では、講演者が開発した主要な研究成果（成果物 A～D）を詳述し、不安定化に対する具体的な解決策を示す。第 4 章では、力制御ロボットの実現に必要なハードウェア要件を、機構・電装・制御・指令生成の各観点から整理する。第 5 章では、力指令ベースの動作生成という新たな研究方向を提起する。最後の第 6 章は結論であり、本講演の要点をまとめ、将来課題を述べる。

第 2 章 力制御の基本概念と主要手法

2-1 力制御と力指令の概念整理

本稿では、現場でしばしば混同される「力制御」と「力指令」という二つの概念を明確に区別する。「力制御」とは、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であり、その指令が必ずしも力であるとは限らない。一方「力指令」とは、制御器からモータへ直接、力（トルク）を指令することを意味する。この区別は実用上きわめて重要で、産業界においてもこの概念が混同されることで設計上の問題が生じることが多い。

図 1 に、力制御・力指令の概念と、位置指令・位置制御との対比を整理して示す。力制御が必要となるのは、接触力と指令力が一致しない場合である。

モータ発生力はギアボックスの摩擦やリンク慣性を介して対象物に加わるため、多くのロボットは力学的に透明ではなく（指令した力がそのまま接触力として伝わらない）、何らかの制御が必要となる。

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）

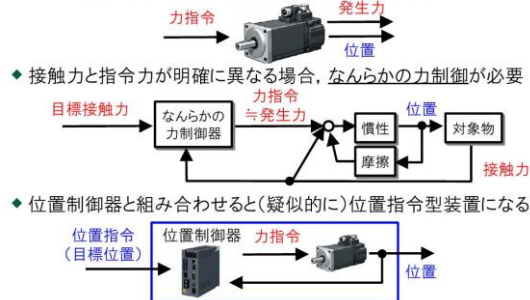


図1 力制御と力指令の概念整理

また、一般的な産業用ロボットはモータと位置制御器が一体化した「位置指令型」装置として提供されており、この構造をそのまま維持したままでは力制御が困難であることも示されている。

2-2 力指令と位置指令を介した力制御：インピーダンス制御とアドミッタンス制御

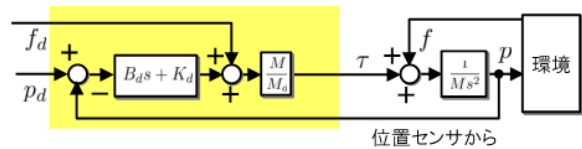
力制御の主要手法として、インピーダンス制御とアドミッタンス制御がある。インピーダンス制御は、位置・速度偏差から必要な力を算出し、バネ・ダンパ的な挙動を実現する手法である（図2）。実装が比較的容易で不安定化の危険は少ないが、機構の慣性や摩擦の影響を強く受けるため動作が鈍くなる傾向がある。

一方アドミッタンス制御は、力センサからの入力をもとに仮想物体（proxy）の動作をシミュレートし、その位置をロボットへの指令値として与える二重フィードバック構造を持つ（図3）。この手法では内側の位置制御器が機構の動特性を抑え込むため、高摩擦・高慣性のロボットにも適用可能という利点がある。実際、産業用ロボットに力制御を実装しようとする、アドミッタンス制御が現実的な選択肢となることが多い。

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

図2 インピーダンス制御

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

図3 アドミッタンス制御

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

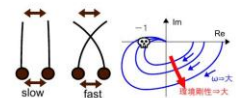


図4 アドミッタンス制御の課題

しかしアドミッタンス制御には重大な問題点もある（図4）。第一の問題は、剛性の高い環境に接触した際の不安定化である。これはモータの効果とセンサ信号の間の位相遅れ（制御器内の時間遅れ、モータ・センサ間の弾性等に起因）によって生じる。第二の問題は、力センサ外での外力に反応しないことである。力センサの検出範囲外で物体や人に接触しても位置制御器が位置を保持し続けるため、破損や事故の可能性がある。さらに、トルク制限をかけると仮想物体とロボットの乖離によりスナップバックが発生するという問題も指摘されている。

第3章 講演者の研究成果

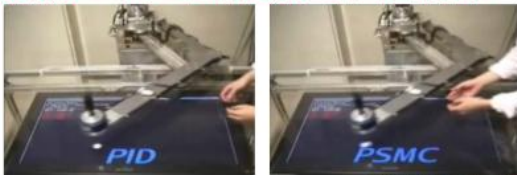
3-1 成果物 A : トルク制限付き位置制御 (PSMC)

講演者の研究の数学的基盤は、微分包含式（集合値関数を含む微分方程式）をベースとした制御則の構築にある。この枠組みは、トルク制限・速度制限・クーロン摩擦・片側拘束といった不連続現象を数学的にエレガントに扱うことができる。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離散化・代数的に解くことで、実装可能な制御アルゴリズムを導出する点が特徴である。

最初の成果物はプロキシベースト・スライディングモード制御 (PSMC : Proxy-based Sliding Mode Control) である (図5)。これは2010年にIEEE-TROで発表され、現在も多く研究者に引用・活用されている。PSMCの本質は「安全弁付きPID制御」と表現できる。通常時はPID制御と同等の正確な追従性を発揮しながら、トルクが制限に達した場合には滑らかな一次遅れの復元挙動（オーバーシュートなし）に切り替わる。

従来のPID制御にトルク制限をかけると、目標位置と現在位置がずれた際に急激な復元力が働き危険であったが、PSMCでは制限トルク内の挙動と制限到達後の挙動を別々に設計することで、この問題を根本的に解消した。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という点で、産業用ロボットへの適用上きわめて有用な制御則となっている。

成果物A: トルク制限付き位置制御



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

- ◆ プロキシベースト・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

図5 成果物 A : トルク制限付き位置制御 (PSMC)

3-2 成果物 B : トルク制限付きアドミッタンス制御

成果物 B は PSMC をアドミッタンス制御へ拡張したトルク制限付きアドミッタンス制御である (図6)。

成果物B: トルク制限付きアドミッタンス制御



- ◆ 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、パ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

図6 成果物 B : 成果物 B : トルク制限付きアドミッタンス制御

トルクが制限内にある時は通常のアドミッタンス制御と等価に動作し、制限に達した際には仮想物体がロボットに追従するよう主従関係が逆転する。これにより、カセンサ外で接触しても安全であり、トルク飽和時にも仮想物体とロボットが乖離せず、スナップバックが発生しないという特性が得られた。

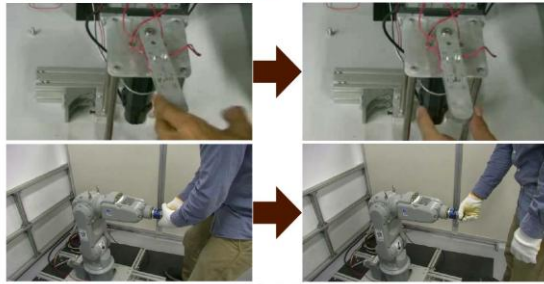
また、不安定化が生じてもトルクが制限されているため振動が発散せず、安心感のある制御が可能になった。これにより研究室での実験における安全性が大きく向上した。

3-3 成果物 C : 遅れの少ないノイズフィルタ (PSMF)

アドミッタンス制御の不安定化を抑制するには、センサ信号の遅れを最小化しつつノイズを除去することが重要である。しかし一般的な線形ローパスフィルタはノイズ除去と位相遅れがトレードオフの関係にある。講演者が開発した放物線型スライディングモードフィルタ (PSMF) は、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大幅に少ないという特性を持つ。

このフィルタをカセンサ信号の微分量フィードバックに組み合わせることで、力順送型バイラテラル制御系を安定化し、15倍以上の力増幅を実現した実験結果が示された (図7)。これは「ノイズ抑制」と「遅れ抑制」のトレードオフを巧みに回避した手法であり、力制御の安定限界を押し上げる実用的な成果である。

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]

図7 成果物C: 遅れの少ないノイズフィルタ

3-4 成果物D: 摩擦補償

アドミッタンス制御の不安定化のもう一つの原因は、モータの摩擦が位置追従に遅れを生じさせ、それが力制御ループを不安定化することである。成果物Dは、摩擦を微分包含式の形でモデル化し、モータトルクによって摩擦力をキャンセルする摩擦補償手法である。これにより外力で軽く動かせる特性が実現されるとともに、アドミッタンス制御の安定性も向上することが確認された。静止摩擦と動摩擦の遷移部分の調整は依然として難しいが、実用的な成果が得られている。

第4章 力制御ロボット実現のための要件

4-1 力制御の基本要件: 力指令に徹せばベスト

力制御ロボットを実現するうえでの要件の基本は、図8の上の部分に示すように、力指令（単ループ、開ループ）に徹することができるなら、つまり、力制御（二重ループ）を避けられるなら、それがベストである点にある。すなわち、低摩擦・低慣性のモータ（QDDモータ等）を使用して力指令がそのまま接触力として伝わる系が構築できれば、複雑な力フィードバックループを設ける必要がなく、不安定化のリスクも回避できる。ただしどの程度の摩擦・慣性が許容されるかは用途によって異なり、一般的なガイドラインを示すのは難しい。

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
 - カセンサとモータはできるだけ近づける
 - ▶ カ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

図8 力制御の基本要件と実際上の要件

4-2 アドミッタンス制御を採用する場合の要件

力指令に徹することが難しい場合は、図8の下半分に示すように、アドミッタンス制御を使わざるを得ない。その場合の重要なハードウェア要件として、以下が挙げられる。

まず機構・機構面では、機構は低摩擦・低慣性に設計すること（QDDモータ等の採用）、カセンサとモータをできるだけ近く・固く配置すること、エンコーダは出力軸側も含めて高分解能であることが求められる。電装面では、1kHz以上のトルク指令が可能な通信プロトコルの採用が不可欠である。EtherCATは適切だが、CANは通信帯域の観点で不安がある。また、センサに組み込まれたノイズフィルタは最小限にとどめることが望ましい。

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O. 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

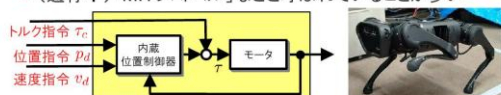
【制御について】

- ◆ 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)

図9 力制御ロボット成立の要件（制御屋目線）

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

図10 力制御ロボット成立の要件（パーツ）

制御面では、ローレベル位置制御は高ゲインに設定すること、摩擦・慣性補償を実装すること、位相進みの実装（微分量の重ね合わせ）、位相遅れの少ないノイズフィルタの採用、適切な手法でのトルク制限が重要である。指令生成面では、力・トルク・インピーダンスを意識した指令生成が求められる。

この辺りの制御視点からの要点とパーツ視点からの要件を整理して示したのが、図9と図10である。

第5章 力指令ベースの動作生成

5-1 人間は力指令の生き物か？

本章は講演者による話題提起であり、「力指令ベースの動作生成」という新たな研究方向を論じた章である。

人間の作業実施法を、運動制御に注目すると、図11のように観察される。人間の位置センサ（筋紡錘）は精度が低く、視覚なしでは位置がずれる。また、力は感じるものというよりも自分で出すものであり、いわば人間「力指令の生き物」ではないか？

人間はなんとなく腕・指で力を出して対象にアプローチし、接触を検知したらそれなりに力の出し方を適応させると考えられる。接触・非接触での劇的な制御器の切り替えはおそらくなく、接触作業では力指令ベースで考えた方がよいのかもしれない。この視点は、ロボットの動作生成においても示唆に富む。

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。視覚なしだとズレる。⇒ 位置制御はしていない
 - 力は、どちらかという、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、それなりに力の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**

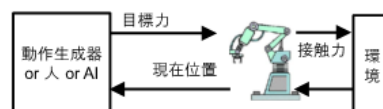
図11 人間は、力指令の生き物？

5-2 力指令ベースの動作生成の実装と事例

力指令ベースの動作生成の実装形態として、二つのアーキテクチャが考えられる（図12）。一つは「外側から力指令、内側も力指令」という構成で、低摩擦・低慣性のロボットが必要となる。もう一つは「外側から力指令、内側は位置指令」という構成で、アドミッタンス制御をベースとするものであり、安定性確保が必須である。現在の産業用ロボットの大半は後者の構成に当てはまる。

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

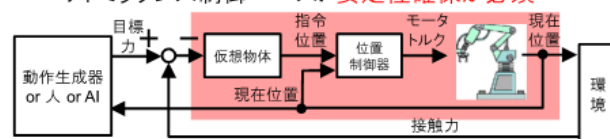


図12 力指令型の動作生成ロボットのアーキテクチャ

具体的な実装事例として、力順送型バイラテラル制御がある（図13）。これは操作者がロボットに力を指令し、位置を知覚するという形態であり、（株）人機一体が実用化した架線メンテナンス用高所作業ロボットや橋梁桁下への鋼製ブラケット取り付け作業ロボットで実際に採用されている。

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]



図 13 力指令ベースの作業形態？（力順送型バイラテラル制御）

これに対し、筑波大学の境野翔先生のアプローチは力制御を利用した接触制御と AI による力技能データ抽出を組み合わせたもので、AI が力指令を生成してロボットへ送るアーキテクチャとなっている(図 14)ここでは、力指令ベースで設計されているために位置が多少ずれても許容されるという特性がある。これは力指令ベースの動作生成の有望な方向性の一つである。

HIROSHIMA UNIVERSITY2026/06/1633

力指令を意識した動作生成の例

- ◆ おそらく、境野翔先生(筑波大学)のアプローチ
 - 「Language and Robotics研究会」(2023年)での境野先生のご講演
 - <https://www.youtube.com/watch?v=qBNu5z0KGcY>

- JST「新技術説明会」(2025年)での境野先生のご講演
- https://www.youtube.com/watch?v=VJL_bCvalPM

バイラテラル制御で力技能データ抽出

AIが推定

図 14 力指令ベースの作業形態の例（バイラテラル制御）

第6章 結論

本講演では、ロボットの力制御に関して「力制御とは何か」という概念整理から始まり、講演者の研究成果、力制御ロボットに必要なハードウェア要件、そして力指令ベースの動作生成という新しい方向性まで、体系的に論じた。

これを項目としてまとめると、図 15 のようになる。

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

図 15 本講演のまとめ（主要項目）

以下に内容の要点を整理する。

「力制御」とは所望の接触力を実現するためにモータへ指令を送ることであり、その指令は必ずしも力でなくてよい。本講演では、「力指令」とは制御器がモータへ直接トルクを指令することと定義している。この区別は設計上きわめて重要であり、両者を混同することで生じる問題が産業界で多く見られる。力制御が必要となるのは、接触力と指令力が明確に異なる場合であり、その原因はモータ・ギア・リンクの摩擦と慣性にある。力制御の主要手法としてインピーダンス制御とアドミッタンス制御があるが、いずれも不安定化との戦いを伴う。とくにアドミッタンス制御は産業用ロボットへの適用が現実的な一方で、剛性の高い環境での不安定化、力センサ外での接触への無反応、トルク制限時のスナッチバックといった問題を抱える。

この課題の解決を目指した講演者のこれまでの研究の核心は、微分包含式という数学的枠組みを用いて、トルク制限を制御則に組み込んだ点にある。成果物 A である PSMC は、PID 制御と同等の追従精度を保ちながらトルク制限時の滑やかな復元を実現した。成果物 B は PSMC をアドミッタンス制御へ拡張し、トルク制限に達しても安全に動作する制御器を実現した。成果物 C である放物線型スライディングモードフィルタ (PSMF) という位相遅れの少ないノイズ除去を適用し、カバイラテラル制御での 15 倍以上の力増幅を可能にした。成果物 D は摩擦の微分包含式モデリングに基づく摩擦補償手法であり、アドミッタンス制御の安定性向上にも貢献している。これらに共通するのは「逆位置制御器」の概念であり、上位の指令に対してトルクが所定範囲に収まるように位置指令を修正するという構造が、A と B の両方に暗黙に含まれていることが示されている。

本講演の後半は、講演者のこれまでの知見を踏まえて、“力制御ロボット実現には、何が必要か”に関する話題提起/提言となっている。具体的には、ハードウェアとしては、最優先は力指令に徹せられる低摩擦・低慣性のロボット (QDD モータ等) の採用が要件となること。それが難しい場合はアドミッタンス制御が選択肢となるが、その際には 1kHz 以上のトルク指令が可能な通信プロトコル (EtherCAT 推

奨)、力センサとモータの近接・固定配置、高分解能エンコーダ、センサ内蔵ノイズフィルタの最小化が求められること。制御面ではローレベル位置制御の高ゲイン化、摩擦・慣性補償、位相進みの実装が重要であること。とくに「サブミリ秒の応答特性を軽視しないでほしい」と、述べている。これらの制御研究者からのメッセージは、ロボットを設計・製造するエンジニアとの相互理解を深めるうえで重要な指摘である。有望なパーツとして、MIT プロトコル対応インテリジェントモータが挙げられたが、現状はほぼ中国製品に限られており、日本国内での代替開発の必要性も質疑応答では強調された。

本公演では最後に、講演者の“人間の運動制御が本質的に力指令ベースではないか？”という観察を踏まえた話題が提供された。つまり、ロボットの接触作業においても力指令ベースの動作生成が有望ではないかという話題提起がなされた。力順送型バイラテラル制御による遠隔操作や、AI が力指令を生成するアーキテクチャ（筑波大・境野先生のアプローチ）がその具体例として示された。

将来課題としては、以下が挙げられた。第一に、力制御の安定性理論のさらなる深化が求められる。アドミッタンス制御の不安定化を定量的に予測・回避するための理論基盤は、依然として不完全であり、より精緻なモデル化と制御設計手法の確立が必要である。第二に、MIT プロトコル等に代表される高機能インテリジェントモータの国内開発・調達体制の整備が急務である。安全保障の観点からも、力制御を見据えたロボット要素部品のサプライチェーン確立が求められる。第三に、生成 AI・強化学習等を活用した力指令ベースの動作生成アルゴリズムの研究が、より実用的な力制御ロボットの実現に向けた重要な方向性である。第四に、ヒューマノイドロボットへのトルク制限付き位置制御の適用が進行中である。トルクフィードフォワードを重ねるアーキテクチャが実用化に向けて検討されている。第五に、専門領域（情報屋・メカ屋・電装屋・制御屋）間の相互理解を深め、力制御ロボットの設計思想を共有する場と仕組みの構築が、産業界全体での力制御実現を加速するうえで不可欠な課題である。