

## 精度と安定性の両立を目的とした力制御

藤木, 拓人

<https://hdl.handle.net/2324/6787599>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :



氏 名 : 藤木 拓人

論 文 名 : 精度と安定性の両立を目的とした力制御

区 分 : 甲

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、工場の自動化が進んでおり、これまで人が行っていた単純作業や繰り返し作業などをロボットに置き換える場面が増加している。一方で、例えば細かなケーブル配線やコネクタ接続など、現在のロボット技術では困難な作業については、いまだ人が行っているのが現状である。すなわち、人とロボットは分業が明確化されており、どちらの労働力も必要である。産業分野で用いられるロボットは、高重量かつ高速で動くものが多く、かつ環境との接触を前提としていないため、人や物との不用意な接触を防ぐために安全柵を設けて隔離された状態で作業を行っている。一方で、人とロボットが互いにより近くで作業することが実現できれば、スペースや人件費の削減のみならず、人とロボットの実時間協働が可能となり、作業効率が向上することが見込めるため、人の近くで作業可能なロボットとして人協働ロボットが開発されている。これにより、全体的な作業効率が向上するだけでなく、作業中のロボットの異変や不良品の発見など、品質保証に関して大きなメリットがある。しかし、現状の人協働ロボットは、安全対策から常にその動きを監視し、速度や出力の制限が可能である機構を持っていること、接触時には即座に強制的に速度をゼロにできることなど、様々な制約条件を満たさなければならない。人の安全の確保のためであるが、一方で接触が発生する度に強制停止してラインが止まり、結果として生産効率が落ちることや、カメラなどを用いた動作のオンライン監視は大きなコストがかかる。

以上を踏まえ、本研究では「強制停止」ではなく「安全に動く」ことを目的とした制御手法を提案する。安全に動く方法として、ロボットが人や物と突発的に接触した場合に、それを受け流すような柔らかい動きを実現できれば、強制停止することなく生産効率をあげることができる。柔らかい動きの実現のために、接触力を調整することで問題を解決できると考え、力制御による柔らかい動きの実現に注目した。ロボットによる柔らかさの実現には、ハードウェア的に柔らかい素材で作る方法と、ソフトウェア的に柔らかい動きをさせる方法が考えられるが、ハードウェアの柔らかさは高分子材料を使ったソフトロボットや、人工筋肉や空気圧アクチュエータなどのソフトアクチュエータを用いることである程度実現できる。一方で柔らかさと正確性(位置や速度、力の追従精度)はトレードオフの関係にあるため、素材が柔らかい場合にはその柔らかさ自体が外乱になりかねない。ソフトウェアとしての柔らかさは、「制御によって擬似的に柔らかい動きを実現する」ことであり、その場合は力制御を用いた手法が考えられる。力制御には様々な種類があり、直接FB型力制御、速度と力の関係を用いたインピーダンス制御およびアドミッタンス制御などがあげられる。これらの制御則は制御対象が環境との接触を伴う場合、それぞれ異なる特徴を持っている。直接FB型力制御はセンサのダイナミクスやノイズの影響を受けやすく、ゲイン調整が繊細で不安定な挙動に陥りやすい。インピーダンス制御は入力を速度、出力を力とした方法であり、アドミッタンス制御はその逆である。インピーダンス制御は最終的に力を出力するため、モータのトルク制御が前提であり、アドミッタンス制御は速度制御モータにより実装される場合が多い。環境との接触を

伴うタスクにおいて、その環境が柔らかい場合、アドミッタンス制御は高精度の軌道追従性を持ち、インピーダンス制御は摩擦等の影響で精度が劣化する可能性がある。一方で、環境が硬い場合、インピーダンス制御は大きな外力に対して安定的に順応しやすいが、アドミッタンス制御はパラメータ次第では振動的になり不安定化する可能性がある。接触環境が既知の場合は硬い環境にインピーダンス制御、柔らかい環境にアドミッタンス制御を選択的に用いることで全体的に高い制御性能を実現することができるが、接触環境が未知の場合は選択的に利用することが難しいため、精度の劣化および不安定化のリスクを拭うことができない。この問題の解決手段として本研究では、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続したアドミッタンス・インピーダンス制御を提案した。2種類の異なる力制御手法を直列接続するメリットとして、アドミッタンス制御の振動をインピーダンス制御で吸収し安定化させることや、インピーダンス制御の摩擦などによる影響をアドミッタンス制御の軌道更新機能によって解決できることがあげられる。本論文第二章では、具体的なアドミッタンス・インピーダンス制御の構造を説明するとともに、一自由度系のシミュレーションおよび実験により、提案手法で位置精度と安定性を両立できることを示す。さらに、一自由度系のインパルス応答およびナイキスト線図による周波数解析により、提案手法の定性的な安定性を示すとともに、機械特性の設計指針を示す。第三章では、提案手法におけるアドミッタンス制御部分、インピーダンス制御部分のそれぞれの機械特性を個別に設定可能な利点を用いて、設定するアドミッタンスとインピーダンスにそれぞれ異なる方向性を持たせ、環境に対して硬くしたい方向と柔らかくしたい方向を個別に設定可能な方法を提案し、二次元モデルを用いた環境のなぞりタスクについて、シミュレーションによりその有効性を示す。最後に、第四章で本論文の結論と今後の展望について述べる。