

研究室紹介：稲葉研究室における近年の研究紹介

稲葉 毅^{* 1}

Introductory Article: Recent Research in Inaba Laboratory

by

Takeshi Inaba

(received & accepted)

Abstract

This report introduces some of the recent research results of the Inaba Laboratory. First, research on improving operability of human-operated robots through stability compensation is presented. Next, research on motion systems, including CMG-based drone attitude control, is presented. Finally, other topics and future prospects will be discussed.

Keywords: collaborative robot, hand guiding, motion control

1. はじめに

東海大学情報理工学部コンピュータ応用工学科稲葉研究室では、制御工学を理論的なベースとして、人協働ロボットの操作性を高める制御手法、ドローンといったモーションシステムへの制御理論応用などを研究している。本稿では、人間とロボットの物理的相互作用（Physical Human Robot Interaction (pHRI)）が存在する人協働ロボットに関する検討を中心に、本研究室での近年の研究成果を紹介する。

2. 人協働ロボットに関する研究

2.1 人とロボットの物理的相互作用を含むシステムとその課題

少子高齢化により生産年齢人口が減少する中、次世代ロボットの一つとして人協働ロボットが有望視されている。これは人間と協調して作業する形態のロボットである。このような人協働ロボットにおいて、人間とロボットが直接触れて作業を行うハンドガイドと呼ばれる形態がある（図1）。これはロボットに取り付けられた力覚センサで操作者の操作力を測定し、それに応じてロボットを制御するものであり、この図のような重量物の運搬・組み付け作業の補助（パワーアシスト）や、ロボットに位置や経路を教示するダイレクトティーチングにも応用される。

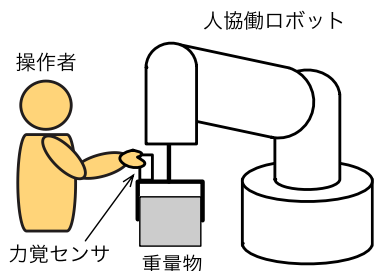


図1 ハンドガイドによるロボット操作の例

このように人間とロボットが物理的に一体となって働くシステムは、制御されたロボットの機械力学的な特性と人間の手先インピーダンスの両方を含んだ閉ループ系となり、ロボットが適切に制御されていないと操作性が悪いだけでなく、安定性も損なわれて危険である。本研究室ではこれまで人間機械系の観点から作業中の人の動特性を解析し、その適応的性質を明らかにしてパワーアシストシステムの自動調整に利用することなどを検討してきた。その検討の過程で、図2のようにロボットの構造に剛性不足があるとシステムが不安定になりやすく、慣性や粘性パラメータを大きく設定せざるを得ず、操作性向上に限界があることがわかった。特に、人協働ロボットでは安全性を確保するため柔構造である場合が多く、安定性への影響は大きいため重要課題である。

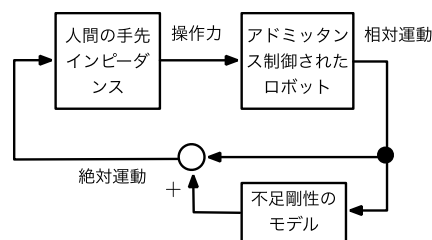


図2 剛性不足を含む人間機械系

2.2 加速度フィードバックによる安定性補償

剛性不足による安定性の問題は、ロボットの運動制御が関節角エンコーダによる相対運動に基づくものであるのに対し、人間との物理的相互作用は不足剛性の影響を受けたロボットアーム先端の絶対運動に基づくことに起因する。このような問題に対し本研究室では図3のような、簡便に絶対運動を計測できる加速度センサを利用したフィードバック補償とロボットのアドミタンス制御を組み合わせた新たな制御手法を提案している[1]。図4は人の手先インピーダンスの弾性パラメータ K_h の大きさに対し、システムの安定性を保ったまま、ロボットのアドミッタ

* 1 情報理工学部 コンピュータ応用工学科

ンス特性の慣性パラメータ M をどこまで小さくできるかの境界を示している。補償なし（赤色）の場合に比べ、センサなしのフィードフォワード補償（黄色）、加速度フィードバック補償（青色）の順に安定領域が拡大している。その結果、粘性パラメータの可変範囲も大きくとれ、操作性を大きく向上できることを確認した[2]。

2.3 ダイレクトティーチングの操作性向上

人協働ロボットのハンドガイドのもう一つの応用例であるダイレクトティーチングは、ロボットの軌道をプログラミングなしで直接教示できるため、専門知識を持たない作業者が現場で利用しやすい。しかし、ロボットの動特性が適切に制御されていないと、思い通りに教示できない場合がある。本研究室ではロボットを適切にアドミッタンス制御した上で、取得したロボット軌道をその特徴を保ったままオフラインで平滑化する手法を検討している[3]

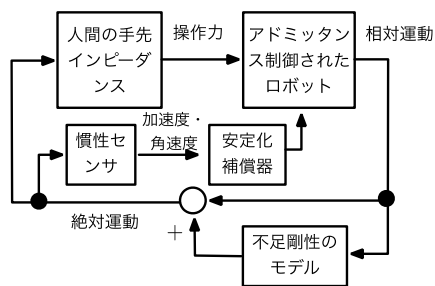


図3 慣性センサフィードバックによる安定性補償

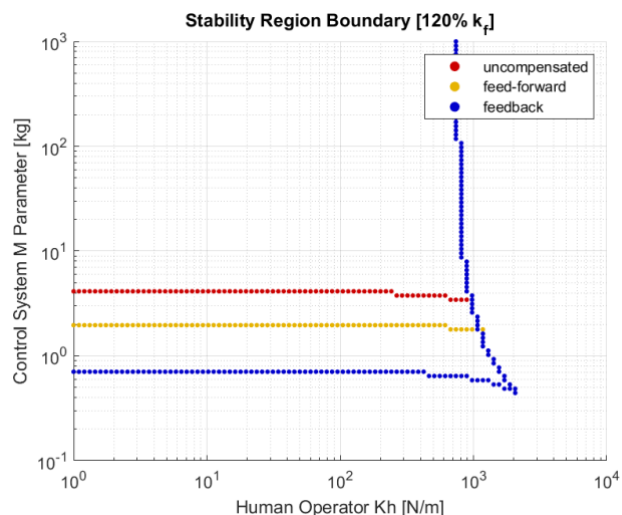


図4 フィードバック補償による安定領域の拡大[1]

3. モーションシステムへの制御理論応用

これまで主に人工衛星の姿勢制御に用いられてきたCMG（コントロールモーメントジャイロ）をドローンの姿勢制御に応用する検討を行っている[4, 5]。商用レベルの実機にツインCMGを搭載した実験を行い、風速換算22m/sに相当する瞬時外乱に対し、CMGを搭載しない場合のピッチ角変動は20度、ロール角変動は25度であったが、CMGを搭載した場合はそれぞれ12度、16度に抑制され、ツインCMGによる外乱抑制の効果を確認している。

これら以外にも、最近では回転型倒立振子を対象とした非線形

制御理論の応用研究を始めている。非線形システムを非線形フィードバックにより厳密に線形化し、線形制御理論をあてはめる手法があるが、回転型倒立振子は運動自由度に対して入力数が少ない劣駆動システムのため、完全には線形化できない。そこで非線形フィードバックによる線形化と線形近似を組み合わせた二段階線形化の手法を提案している。比較的簡単な手法であるが単純な線形近似と比較して動作範囲を大きく拡大できることが確認できている[6]。

4. おわりに

本稿では最近の稲葉研究室での研究内容を紹介した。人協働ロボットやモーションシステムに関する研究を主軸にしているが、その他にもMR（複合現実）における最適インタフェース配置の検討など、人と関係するシステム全般を扱っている。研究室のwebサイト (<https://www.inaba-lab.org>) でも紹介しているので参照して欲しい。

参考文献

- [1] N. SONGTHUMJITTI, T. INABA: Stability compensation of an admittance-controlled cartesian robot considering physical interaction with a human operator, *Intelligence ¥& Robotics*, 3(3):306-36 (2023)
- [2] N. SONGTHUMJITTI, T. INABA: Maneuverability Improvement by Feedback Compensation of a Physically Human - Interacting Robot with Variable Damping Control, *IEEE AMC2024*, AMC24 - 000027 (2024)
- [3] 石, 稲葉: 人協働ロボットのダイレクトティーチングにおける経路平滑化 - 曲率と速度に基づく特徴点の抽出と経路曲線の算出-, *SI2023*, 1A1-12 (2023)
- [4] 大内, 小谷ほか :並進系を考慮したシングル CMG によるドローンの姿勢制御, *日本機械学会論文集*, vol. 87, no. 895, pp.1-22 (2021)
- [5] 大内, 稲葉ほか :ツイン CMG によるドローンの姿勢制御, *日本機械学会論文集*, 88 巻 913 号 p.22-00067 (2022)
- [6] 劉, 稲葉 :二段階線形化に基づく回転型倒立振子の非線形制御による初期値応答の改善, 第 67 回自動制御連合講演会（発表予定）(2024)