

第 1 部門の研究活動に関する報告

(平成 21 年度)

研究課題名：画像情報による非因果的フィードフォワード制御法の開発

十河拓也*, 吉田靖夫

Keywords：フィードフォワード制御、クレーン制御、画像処理、サンプル値制御

1. 研究目的

画像情報に基づく制御は、人間の生活空間内での使用を目指して研究されているロボットの重要な要素技術の一つと考えられる。これは、人間と同じように画像（視覚）情報に基づいて動作するほうがセンシングのために生活空間側に大きな改変を加える必要がないからである。しかしながら、画像情報は一般に情報量が極めて多いため、その処理の負荷は大きい。とくに画像ベース制御では実時間処理が求められるため、そのような要求を満たす高速・高精度かつ小型の画像処理システムを構築することは困難を伴う。これまでに、この困難を専用並列デバイスの開発によって乗り越えサンプルレート 1kHz の高速な画像ベース運動制御も可能にできたこと等も報告されている。一方、我々人間は視覚の識別性能がサンプルレートでわずか 30Hz 程度であるとされるにもかかわらず、スポーツ等において比較的高速な動作を器用に行うことができる。この事実は、人間の動作がフィードバック制御だけで行われていない可能性を示唆しており、実際、神経科学の研究により小脳に構築された逆モデルによるフィードフォワード制御が重要な役割を果たしていることが示されている。ところが、この逆モデルによるフィードフォワード制御には、画像ベース制御の基礎をなすサンプル値制御理論の既存の枠組みではスムーズに扱えない問題（不安定零点の問題）が残されている。研究代表者は、これまでの研究でこの問題を非因果的な手法により解決する方法を提案し良好な結果を得ている。そこで、その成果を画像情報によるフィードフォワード制御の要素技術として応用することを考えた。また、数値シミュレーションでは実現しようとしている軌道の周波数成分に比べてサンプルレートはあまり高くないにもかかわらず良好な出力が得られる例が多く見られたことから、冒頭に述べたように人間の目の識別能力のサンプルレート（約 30Hz）程度の画像情報でも非因果的逆系によるフィードフォワード制御を用いれば人間と同程度の高速な運動制御を可能にできるのではないかと予想した。この研究計画では、これらのことをビデオレート（30Hz～60Hz）程度の画像情報システムを用いた機械系制御実験を行って検証し、画像ベース制御の一つの要素技術を確立することを目指す。

2. 研究計画

* 研究代表者

非因果的なフィードフォワード制御の画像ベース制御への応用問題として、クレーン荷役作業制御を取り上げる。港湾荷役等で用いられているガントリークレーンの実験模型を製作し、その吊り荷の位置制御について停止から移動開始またはその逆の過渡的な運動制御に非因果的なフィードフォワード制御を適用しその効果を検証する。吊り荷の3次元位置計測には、カラービデオカメラによる動画像をパソコン上の(3次元)リアルタイムビデオトラッカーシステムによって処理することで計測する。平成21年度に導入したビデオトラッカーシステムにカラービデオカメラの追加とソフトウェアのアップグレードを行ったシステムを用いる。

研究分担者(吉田)はこれまでにクレーン荷役作業の画像ベースフィードバック制御の研究を行っている。研究代表者(十河)は、本研究課題をスムーズに進めことができるよう画像計測・処理実験のノウハウの教授を受ける。移動ロボットのよりよい制御には、本研究の中心課題の非因果的なフィードフォワード制御と、従来のフィードバック制御を組み合わせた2自由度制御系を構成する必要が生じると考える。その際には、画像ベースフィードバック制御に明るい研究分担者とフィードフォワード制御理論に詳しい研究代表者が協力して実験に取り組んでいく。

本研究の成果はビデオ用途として普及した画像処理デバイス(フレームレート 30Hz~60Hz)をそのまま利用できる高速で精度の高い機械の運動制御技法となることから、搬送ロボットやクレーンロボットなどの連携研究に発展する可能性があると考えている。

3. 研究成果

走行クレーン吊り荷を短時間で搬送し、目標位置に振れなしで位置決めできる制御法として、バンバン制御がある。しかしながらこの最短時間制御はフィードフォワード制御であり、実際の現場でのロープ長誤差、重心位置誤差、剛体振子挙動などによる不正確な振れ周期が使用される場合は制御の前提をくずし高速な制御操作を困難とする。これに対しては、フィードバック制御との組み合わせ制御が考えられるが、今年度は最短時間制御で搬送中の周期計測と振れ制御の方法を検討し、これらをもとにした最短時間制御修正による走行クレーン操作方法を求め、計測自動制御学会にて講演発表を行った。

ビデオカメラからの画像情報による制御系は、計測は一定周期ごとに行われるため本質的にサンプル値制御系となる。サンプル値系の伝達関数は、もとの連続時間系の零点とは対応しない離散化零点と呼ばれる零点を持ち、それは不安定零点であることが多い。さらに、その離散化零点は一般に閉じた式で表すことができない。このことが、逆系に基づいたフィードフォワード制御をサンプル値系に適用する場合の問題となっていた。その一方、近年の研究で離散化零点はサンプル周期を小さくするにつれて Euler-Frobenius 多項式の零点に近づくという規則的な性質があることが示された。本研究では、この事実に基づき、近年性能が飛躍的に向上した数式処理ソフトウェアを援用して離散化零点のサンプル周期についての展開式を導いた。さらに、その展開式を利用して不安定または安定限界付近の離散化零点を再配置し、フィードフォワード制御特性を改善する一手法を提案する。また、相対次数2の場合の連続時間系についてサンプル値系の離散化零点の展開式の計算例をいくつか示し、その結果から一般に単純な法則が予想することができた。その成果は計測自動制御学会の学術論文として発表した。

4. 研究発表

(学術雑誌：計2件)

- 1) Takuya Sogo: "On the equivalence between stable inversion for nonminimum phase systems and reciprocal transfer functions defined by the two-sided Laplace transform",

Automatica, Vol.46, No.1, pp 122-126, 2010 (Impact Factor: 3.178)

- 2) 十河拓也：“サンプル零点の展開式と配置法，計測自動制御学会論文集”，Vol.46, No.2, 2010年（掲載予定）

（口頭発表：計3件）

- 1) 吉田靖夫，加藤慎吾：荷振れ情報と最短時間制御を用いた天井クレーン操作法，計測自動制御学会第10回システムインテグレーション部門講演会論文集，pp.645-648，芝浦工大，2009.
- 2) 十河拓也：サンプル零点の再配置とその外乱抑圧制御への応用，計測自動制御学会 適応学習制御シンポジウム，琉球大学，2010年1月
- 3) 十河拓也：サンプル零点の再配置とそのフィードフォワード制御への応用，計測自動制御学会 第10回制御部門大会，熊本大学，2010年3月（発表予定）

（その他：計1件）

- 1) 吉田靖夫，十河拓也：クレーンのリアルタイムバンバン制御、総合工学 第22巻 2010年3月.