



Title	低遅延な遠隔モーション制御を実現するアクセスエッジ技術に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	小屋迫, 優士
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16511号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95173
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yushi_Koyasako_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 小屋迫 優士

審査担当者 主 査 客員教授 吉田 智暁

 副 査 教 授 大鐘 武雄

 副 査 教 授 齊藤 晋聖

 副 査 教 授 土橋 宜典

学位論文題名

低遅延な遠隔モーション制御を実現するアクセスエッジ技術に関する研究

(A Study on Access Edge Computing Technology for Low-latency Remote Motion Control)

ドローンや産業用ロボットといった IoT(Internet of Things) 端末のモーション制御はセンサや映像データ伝送のための高速広帯域のデータ伝送だけでなく、低遅延かつ高信頼なリアルタイム通信が要求される。そのため、これまで一般に端末上のプロセッサや近傍のローカルリソースからの制御が行われてきた。近年、これらの IoT 端末を遠隔でモーション制御する需要が高まっている。特に、クラウド等を用いて AI(Artificial Intelligence) やビッグデータといった大規模計算リソースを必要とするアプリケーションと連携して制御することで、より高度な制御を実現するユースケースが広がっている。ネットワーク越しの制御はリソースのメンテナンスコストをサービス事業者任せにすることができ、ユーザの負担を減らせる利点がある一方で、制御対象とコントローラ間の距離が大きくなることで、遅延が発生し、制御性能に悪影響を及ぼす場合がある。

通信ネットワークは、ユーザと通信事業者ビルを結ぶアクセスネットワーク、通信事業者ビル間を結び、クラウド等が存在するコアネットワークに大別できる。アクセスネットワークはユーザと近距離にあるネットワークで、発生する遅延が、コアネットワークが 100 ms 以上であるのに対し、数 ms オーダである特徴がある。エッジコンピューティングは IoT 端末近傍のネットワークエッジに計算リソースを設置し、処理を行う技術であるが、これを光アクセスネットワーク上で行うことで、低遅延・高信頼性を担保しながら、高度な制御が実現できる可能性がある。

光アクセスネットワーク上でのエッジコンピューティングにより、モーション制御を実現際の課題は、アクセス区間で生じる遅延やジッタが、クラウドに比べて十分小さいながらも、制御性能を劣化させることである。この問題に対し、本研究では光アクセスネットワークとモーション制御を連携させることで、ネットワークの状態がモーション制御に適切になるように、ネットワーク情報の収集・分析・制御を行い、モーション制御に特化した低遅延・低ジッタなアクセスネットワークを構築する。また、ネットワークの状態をモーション制御に受け渡すことで、ネットワークを考慮した制御を実現する。4つのアプローチからネットワークとモーション制御の連携を行うとともに、提案技術を工場を対象としたユースケースで実現し、光アクセスネットワーク上でのエッジコンピューティングによる End-to-End でのリアルタイムモーション制御を実現するアクセスエッジコンセプトの実証を目指す。

第 1 章では、本研究の背景として我が国における IoT 領域の状況と、ネットワークとエッジコンピューティング技術の概要について述べる。また、本研究の目的であるアクセスエッジコンセプトの

概要と効果, 課題について述べる.

第 2 章では, アクセスエッジコンセプトを実現するために重要な要素技術である光アクセスネットワーク技術と遅延要因について述べる. 続いて, ネットワークを介した IoT 端末のフィードバック制御の詳細と遅延補償制御手法について述べる. また, ネットワークの柔軟化に貢献する SDN(Software Defined Network) 技術とそのアクセスネットワークへの適用について説明する. 最後に関連技術として, より遅延要件の厳しい産業用ネットワークと実現するプロトコル技術について述べる.

第 3 章では, 光アクセスネットワークの Point-to-Point 構成を対象に, 経路上の通信機器がすべて特定できることに着目して, 通信機器それぞれから処理時間を収集, 合算することで, ネットワーク全体の経路遅延を算出し, 遅延補償制御に用いる手法を提案する. モータとドローンを用いた実機実験系により有効性を検証する.

第 4 章では, Point-to-Multipoint 構成を対象に, 時変遅延の原因となる DBA(Dynamic Bandwidth Allocation) に対して, OLT(Optical Line Terminal) から現在の設定情報を読み取り, 新たに作成した遅延モデルによって, 遅延を算出, 遅延補償制御を行うことで, 帯域使用効率を維持しながら高度な制御が実現できる手法を提案する. モータを用いて実機実験系を構築し, 整定時間を評価指標とした従来手法との比較により有効性を検証する.

第 5 章では, 光アクセスネットワークの仮想化基盤である SEBA(Software-Defined Network Enabled Broadband Access) を用いて, モーション制御結果をネットワーク設定にフィードバックし動的に変更することで, ユーザに設定を意識させることなく, 制御に最適なネットワークを構築する手法を提案する. モータを用いた実機実験系を構築し, 制御結果のフィードバックにより DBA 周期を変更, 所定の整定時間内に制御が完了するか検証する.

第 6 章では, 次世代のネットワーク基盤であるオールフォトニクスネットワークを対象に, 通信機器間の区間遅延情報をリアルタイムに収集し, 最適なジッタバッファリングを行うことで, 所望の固定値で遅延補償制御を行う手法を提案する. FPGA を用いた 100 Gbps 検証システムを構築し, 制御に関連したデータのみミリ秒オーダーでジッタバッファを行い, 遅延が時変の場合でもモータ制御できることを確認する.

第 7 章では, これまで提案したアクセスエッジコンセプトをより要求の厳しい産業用ネットワーク上で実現し, End-to-End でのコンセプト実証を行うために, 既存の産業用プロトコル機能をソフトウェアで実装し, 汎用の計算リソースより制御する手法を提案する. モータを用いた実機実験により有効性を検証する.

以上を要するに, 本論文では, 光アクセスネットワークとモーション制御の連携により, 遅延の制御に及ぼす影響を低減させる手法を提案し, IoT 端末を対象にした制御性能の検証を行っている. また, アクセスエッジコンセプトにより, 低遅延・低ジッタなネットワークを構築し, より高度な制御が実現できることを示している. よって, 本論文の著者は, 北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格を有するものと認める.