



Title	A Study on State Estimation for Cyber Physical Systems [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	足立, 亮介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13525号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74286
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryosuke_Adachi_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 (情報科学)

氏名 足立 亮介

審査担当者 主 査 教 授 山下 裕

副 査 教 授 金子 俊一

副 査 教 授 近野 敦

副 査 准教授 小林 孝一

学位論文題名

A Study on State Estimation for Cyber Physical Systems

(サイバーフィジカルシステムのための状態推定理論に関する研究)

本論文では、サイバーフィジカルシステムの状態推定問題を考えている。Society 5.0, Industry 4.0, Industry Internet of Things のような IoT 技術を基盤とした次世代社会構想がこれまで提案されているが、これらの構想の中で求められる「スマート」とは、各要素技術を統合することでより高度な「自動化」を実現することであると考えられる。その為には、サイバーフィジカルシステムに対する制御理論の確立が必要であると考えられる。サイバーフィジカルシステムは、IoT の考え方を取り入れた制御システムである。本論文では、サイバーシステムのための制御理論に関わる研究の中でも、室内環境におけるクアドロータ UAV の状態推定問題と、センサネットワーク上での分散状態推定問題を考えている。

サイバーフィジカルシステムの 1 つの例として、互いのエージェントが通信をしながら意思決定を行うマルチエージェントがある。3 次元空間を移動、ホバリングできるクアドロータ UAV は、柔軟で汎用的なエージェントとして捉えることができる。屋外では GPS を用いる事で UAV の 3 次元位置を計測できるが、屋内の位置計測には安価なセンサが十分なセンシング性能を持たない為、高価な高精度センサが必要になる。例えば、デスプセンサは安価に入手できるようになったが、観測遅延を持った推定精度の低い観測値しか得られない。よって、本論文では、遅れ補償最尤推定法を用いたエージェントの位置推定手法を提案している。このオブザーバは拡張カルマンフィルタを用いた状態推定器とモデルベースの予測器の二つから状態を推定している。また、得られた推定値が数学的に最尤推定量になる事は、確率密度関数の時間発展を解析的に解く事で証明されている。実際の有効性は UAV の実機を用いた実験で示されている。

ワイヤレスセンサネットワークは、サイバーフィジカルシステムにおける観測システムの役割を果たす。よって、センサネットワーク上の分散推定問題はサイバーフィジカルシステムの為の状態推定問題の基本的な設定である。センサネットワーク上の分散状態推定器は通信システムと制御システムの両側面を持つことから、両システムの仕様要求を満たす必要がある。具体的には、通信システムからは通信容量の削減が、制御システムからは通信遅延による性能劣化の防止が求められる。これに対し、本論文ではデータアグリゲーションと遅れ補償を用いることで、双方の仕様を満たした分散推定手法を提案している。まず、データアグリゲーションを採用することで、センサネットワーク上の各ノードでは他のノードの情報をスケーラブルな通信を用いて共有できる。このノード間で発生する通信に対して、隣接ノード間の遅れ補償をする事で送信情報を、遅れを含まない状態で表現で

きる。その結果、入力情報が共有できる場合には有限極配置で、それ以外には線形行列不等式 (LMI) を用いて分散オブザーバが設計可能である事が示されている。

本論文の各章の構成は以下の通りである。

第一章では、本研究の背景と目的を述べている。また、第二章では本論文で必要となる数学的な記法をまとめている。第三章では、非 GPS 環境下での低性能センサを用いた位置推定問題の定式化・解法の提示・証明までが示されている。まず、非 GPS 環境下で低性能センサが必要になるのかが明らかにされている。その上で、解くべき状態推定問題が定式化され、その問題設定に対して、モデルベースの状態推定器と予測器からなる状態推定器が提案されている。最後に、提案したオブザーバから最尤推定量が得られる事が証明されており、これがこの章の主定理となる。また、実機を用いた実験結果により、提案手法の有効性が示されている。第四章では、データアグリゲーションに基づく遅れ補償分散推定手法の問題設定・解法の提示・証明までが示されている。まず、センサネットワークにおいてデータアグリゲーションと遅れ補償付きの分散オブザーバが必要になる事が明らかにされている。それに基づき、遅延センサネットワークを持つ状態空間表現の導入と分散状態推定の定式化がなされている。定式化した問題に対する答えとして、遅延センサネットワークを含む状態空間表現上でのデータアグリゲーション・遅れ補償・分散オブザーバが提案されている。最後に提案手法がネットワークのスケーラビリティを確保し、オブザーバの設計問題が有限極配置問題に帰着される事が示されている。第五章では、未知入力の分散状態推定問題に対して、仮想入力を用いた状態と入力を推定する分散オブザーバが提案されている。まず、分散状態推定において、未知入力を考える必要性が述べられている。次に、分散システムに対する仮想入力を用いた分散オブザーバ設計問題が定式化されている。その問題に対して、凸計画問題によりオブザーバ設計が可能である事が示されている。また、これをリアプノフ・クラフノスキ汎関数解析により LMI を導出する事で示している。第六章では結言として、各章の結果の要点をまとめ、得られた結論を述べている。

これを要するに、著者は、IoT 環境における通信遅れを有する環境において動的システムの状態観測を行う一般的な手法を提案しており、情報科学・システム科学・システム制御理論に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。