

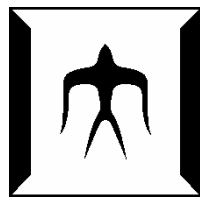
論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	エネルギーと制御性能のトレードオフ問題に着目したネットワーク化および階層化モデル予測制御方式に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	飯野穰
Author(English)	Yutaka Iino
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9767号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:藤田 政之,三平 満司,山北 昌毅,井村 順一,早川 朋久
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9767号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

博士論文

エネルギーと制御性能のトレードオフ問題に着目した ネットワーク化および階層化モデル予測制御方式 に関する研究

指導教員 藤 田 政 之 教授



東京工業大学 大学院理工学研究科

機械制御システム専攻 システム制御講座

飯 野 穰

2015年3月

要 旨

本論文は、「エネルギーと制御性能のトレードオフ問題に着目したネットワーク化および階層化モデル予測制御方式に関する研究」と題し、エネルギー最小化と各種制御指標のトレードオフ問題に着目した予測制御方式を提案する。まず、ネットワーク化モデル予測制御において無線センサのバッテリー消費低減のために通信レートと制御性能のトレードオフ最適化によるモデル予測制御方式を提案する。また通信レート制約下のネットワーク信頼性確保のために静的、動的トポロジー変化による確率的信頼性最大化手法を提案する。さらに、データ量と予測精度のトレードオフとして JIT モデル (Just In Time Model) と物理モデルのハイブリッド需要予測方式、エネルギーと品質、安定化のトレードオフとして、階層型モデル予測制御方式を提案し、ビルの需要予測や工業プロセス省エネ制御の事例で有効性を示す。

第1章「序論」では、本研究の背景についてまとめ、その動機と目的を述べる。制御システムの実応用における課題として、エネルギー最小化と各種制御指標のトレードオフ問題に着目し、第一にネットワーク化モデル予測制御において無線センサのバッテリー消費低減のために通信レートと制御性能のトレードオフ問題、第二に通信レート制約下のネットワーク信頼性の問題、第三に、エネルギー管理システムにおいて、センサデータ量と需要予測精度のトレードオフ問題、第四にエネルギー管理システムにおけるエネルギーと品質、安定化のトレードオフ問題を挙げる。これに対し、本研究では、ネットワーク化制御における通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御、制御システムの信頼性を考慮したネットワークトポロジーの最適化、需要予測のためのデータ型モデルと物理モデルのハイブリッド構成法、多目的最適化を目指した階層型モデル予測制御、を提案する。

第2章「通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御」では、設置・運用の利便性から産業界で注目されているセンサネットワーク無線伝送情報量の制約、無線端末の電源供給の制約 (バッテリー寿命) の課題を明確化する。その一つの対策として、無線端末間の通信レートを低くし、スリープモードにより通信タイミング間の消費電力を節約する通信方法に注目し、ネットワーク化制御として問題設定する。これに対し、第一にモデル予測制御をベースに、通信コストと制御性能のトレードオフ問題としての制御方式を導出する。そこでは、制御性能ペナルティと通信量ペナルティを併せた評価関数の最適化による、

制御系と通信サンプリング周期の同時最適化制御方式を **Receding Horizon** 型評価関数によるモデル予測制御方式として定式化する。第二に、「イベント予測型制御によるネットワーク化制御」では、**self-triggered control** 方式の一種である状態予測型イベントトリガ制御(**Event Predictive Control** 方式)を提案する。ここでは、制御ループに相当するネットワークの通信スリープ期間中の制御系の開ループ予測軌道が安定化回復可能な軌道許容集合から離脱する限界点を予測イベントと定義し、予測イベントに連動してネットワークの通信復帰を制御する方式を提案する。また、状態推定問題についても同様の通信コストとのトレードオフ問題として定式化を試みる。

第3章「信頼性を考慮したネットワーク化制御系」では、通信制約下でのセンサネットワークの信頼性最適化問題を定義する。センサネットワークのトポロジーに着目し、確率的な事前信頼性(事故の未然防止)と事後信頼性(回復可能性維持)を両立させたリスクボトルネックアルゴリズムを提案する。まず、静的な最適化問題として最適な通信トポロジーの設計法、次に動的にトポロジーを変化させる通信制御手法を定式化し、確率的にセンサネットワークの通信信頼性を最適化する手法を提案する。

第4章「ハイブリッドモデルに基づく需要予測手法」では、ビルのエネルギーマネジメントシステム (**BEMS**) において、無線センサの普及、センサリッチ化に伴う多量の計測データの利用と物理モデルの利用のトレードオフを考慮したデータベースモデル (**Just In Time Model**) と物理モデルのハイブリッドモデルに基づく需要予測手法を提案する。

第5章「階層型モデル予測制御によるエネルギー最適化制御」では、エネルギーマネジメントシステム (**EMS**) において、エネルギーと品質管理、安定化などの多目的な制御指標の優先順位を動的に考慮し柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式のコンセプトを提案し、工場向けのエネルギーマネジメントシステム **FEMS** (**Factory Energy Management System**) への応用技術として具体的に定式化する。適用事例として、エネルギー多消費型産業の代表であるセメント産業セメントキルンプロセスを対象とし、提案手法の有効性を示す。

第6章「結論」では、本論文の研究成果をまとめ、今後の研究の方向性について考察を述べる。

目 次

要 旨	1
目 次	3
第1章 序 論	4
1.1 研究の背景	4
1.2 センサネットワークとネットワーク化制御系の動向	4
1.3 エネルギーマネジメントと制御理論	6
1.4 本研究の目的	6
1.5 本研究の構成	9
第2章 通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御	11
2.1 ネットワーク化モデル予測制御の問題設定	11
2.2 通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御	11
2.3 イベント予測型制御によるネットワーク化制御	11
2.4 通信コストを考慮した状態推定問題	12
2.5 考察	12
第3章 信頼性を考慮したネットワーク化制御系	14
第4章 ハイブリッドモデルに基づく需要予測手法	15
第5章 階層型モデル予測によるエネルギー最適化制御	16
第6章 結 論	17
謝辞	20
本研究に関する発表論文	21

第1章 序 論

1.1 研究の背景

システム制御理論は、自動化による人的労力の低減、最適性維持によるロスの低減と品質の確保など、産業界、社会インフラ等のあらゆる局面で発展、貢献してきた。その中で、保存則として物理的制約条件である「エネルギー」は、常に制御システムとの関係を考慮すべきものである。

他方、近年の情報（IT）技術の進歩で、ユビキタスセンシング、ビッグデータなど新しい技術がシステム制御理論にも影響を及ぼし、新たな理論展開の可能性が議論されている。

そこで、本研究では、システム制御理論におけるIT活用としてのセンサネットワーク技術とその適用先としてのエネルギーマネジメントシステムとに着目し、計測制御システムのエネルギー消費と多様な制御目的や制約条件を持つエネルギーマネジメントシステムという2面的な視点での研究課題に取り組む。

タイトルとした、「エネルギーと制御性能のトレードオフ問題に着目したネットワーク化および階層化モデル予測制御方式」の狙いとして、計測制御システムのエネルギーと制御性能や信頼性のトレードオフ問題と、エネルギーマネジメントシステムにおける消費エネルギー最小化と品質や安定性などの他の制御指標とのトレードオフ問題とを研究対象とする。前者においては、センサリッチ化を促進する無線センサにおける消費エネルギー最適化問題、後者においては、モデル予測制御におけるエネルギーマネジメントとその他の指標とのトレードオフのハンドリング、さらにエネルギーマネジメントシステムで重要となる需要予測機能において、観測データ量と先見情報となる物理モデルとのトレードオフの視点をフォーカスする。

1.2 センサネットワークとネットワーク化制御系の動向

本研究のターゲットとして無線センサネットワークを活用したネットワーク化制御技術 [1]における通信コストと制御コストのトレードオフ問題、制御系としての信頼性確保の問題を定義し、本研究目的を明確にするために、センサネットワーク技術の動向を概説する。まず、付録に本研究のベースとなるセンサネットワークに関する研究動向をサーベイするとともに、その産業応用における諸課題として、センサリッチな環境の構築、その投資対効果の実現のために実装が容易なセンサネットワークへの期待、それを計測制御システムに応用する際の課題としてのバッテリー駆動型無線センサの長寿命化のための通信頻度の

最適化のニーズなどをまとめた。さらにそれらを含めた予測制御をベースとしたエネルギーマネジメントシステムで重要となる対象のモデル化，需要予測手法についてデータに基づく手法と物理モデルに基づく手法のそれぞれの長所，短所を考察の上で，その解決策としてのハイブリッド型予測モデルの方向性を示した。

センサネットワークは，理論面だけでなく，設置・運用の利便性から産業界，応用面でも注目されており，計装・制御システムの分野でも工場やビル設備などへの導入・普及が期待されている。前述の諸課題の中で，実用化の視点では，特に無線端末の電源供給の制約，バッテリー寿命が挙げられる。そこで，本研究では，上記問題を制御システムへの適用における無線伝送情報量の制約ととらえ，その一つの解決手法として，無線端末間の通信レートを低くし，スリープモードにより通信タイミング間の消費電力を節約する方法に注目し，ネットワーク化制御として問題設定する。結果として，制御性能と通信レートの制約とのトレードオフ問題として，制御性能ペナルティと通信量ペナルティを併せた評価関数の最適化による，制御系と通信サンプリング周期の同時最適化制御方式を提案する。さらにこの問題をセンサ側の無線通信に係わる問題とアクチュエータ側の無線通信に係わる問題に分解し，前者については，要求精度を満たす可変サンプリング状態推定問題，後者に対しては，**Receding Horizon** 型評価関数によるモデル予測制御と状態予測型イベントトリガ制御(**Event Predictive Control** 方式)を提案する。

モデル予測制御方式では，制御性能に関する評価関数(制御コスト)に加え通信コストを定義し，そのトレードオフ問題として複合評価関数による定式化を試みた。また，状態完全可観測の条件のもとで制御系の安定性の十分条件を導出した。

また，**Event Predictive Control** 方式においては，イベント予測制御としい概念を定義し，本問題に適用した。そこでは，制御ループに相当するネットワークの通信スリープ期間中の制御系の開ループ予測軌道が安定化回復可能な軌道許容集合から離脱する限界点を予測イベントと定義し，予測イベントに連動してネットワークの通信復帰を制御するものである。

さらに，状態推定問題における状態推定誤差と制御問題における制御誤差の双方の制約条件を勘案した通信レート最小化方式を提案する。

また，信頼性を考慮したセンサネットワーク化制御系として，ネットワークのトポロジーに着目し，確率的な事前信頼性(事故の未然防止)と事後信頼性(回復可能性維持)を両立させたリスクボトルネックアルゴリズムを提案する。まず，静的な最適化問題として最適なトポロジーの導出，次に動的にトポロジーを変化させる手法を定義し，確率的に信頼性を最大化することを試みた。

1.3 エネルギーマネジメントと制御理論

地球と人類の持続のために、エネルギー・環境問題は人類の主要課題である。また、東日本大震災を経て、わが国の電力不足対策は長期的課題となりつつある。わが国のエネルギー消費動向は、産業部門が第一次、第二次石油ショックを経て、徹底的な省エネ化を推進し、エネルギー消費量は安定している一方で、運輸部門と民生部門のエネルギー消費量は、直近30年のスパンで年々増加している。特に、オフィスビル、商業施設、住宅などの民生部門需要家の消費エネルギーは、省エネや節電の積極的な推進、エネルギー利用の合理化が課題となっている。エネルギー利用合理化の手段として、ビルに対してはBEMS: Building Energy Management Systemの普及、ビルのスマート化(ZEB: net Zero Energy Building)の実現などが検討されている。また、家庭に対してもHEMS: Home Energy Management Systemによるスマートハウスの普及が注目されている。一方、複数の需要家に対し、エネルギーを群管理することによる、デマンド管理(契約電力の維持)、ピークカット(年間最大電力需要の低減)、デマンドレスポンス(電力会社等の要請に応じた消費電力削減)、負荷制御(デマンドレスポンスのために需要家負荷を直接制御する方式)の実現で、地域全体の電力負荷調整量の拡大が期待される。

これらのエネルギーマネジメントシステム(EMS)の普及には、

- ・エネルギー計測のセンサシステムの普及
- ・エネルギーの合理的な利用を実現するエネルギー管理・制御システム
- ・各種の運用制御目的とエネルギー合理化のトレードオフ問題

が主要課題となる。

本研究では、エネルギーマネジメントシステムにおいて、第一に、センサのネットワーク化による多量のデータを生かしたエネルギーマネジメントシステムの応用技術として、データに基づく需要予測と物理モデルに基づく需要予測のハイブリッド方式とそのBEMS(Building Energy Management System)への応用、第二に、エネルギーと品質管理、安定化などの多目的な制御指標に柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式とそのFEMS(Factory Energy Management System)への応用、を課題として挙げ、それぞれに対する新しい手法を提案する。

1.4 本研究の目的

本論文では、センサネットワークを応用したネットワーク化制御、モデル予測制御に基づくエネルギーマネジメントシステムの組み合わせから派生する

種々の技術課題として、

- ・無線センサネットワークのバッテリー消費低減のための通信コストを考慮したネットワーク化制御方式（第2章）

- ・通信ネットワークで課題となる信頼性の課題への対応として信頼性を確保したネットワーク化制御方式（第3章）

- ・センサのネットワーク化による多量のデータを生かしたエネルギーマネジメントシステムの応用技術として、データに基づく需要予測と物理モデルに基づく需要予測のハイブリッド方式とそのBEMS (Building Energy Management System)への応用（第4章）

- ・エネルギーと品質管理、安定化などの多目的な制御指標に柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式とそのFEMS (Factory Energy Management System)への応用（第5章）

に着目し、それぞれの制御方式を提案する。

これらの各研究内容の関係を、カテゴリー、議論対象、評価関数、制約条件、最適化変数の視点で整理し、下図に示す。

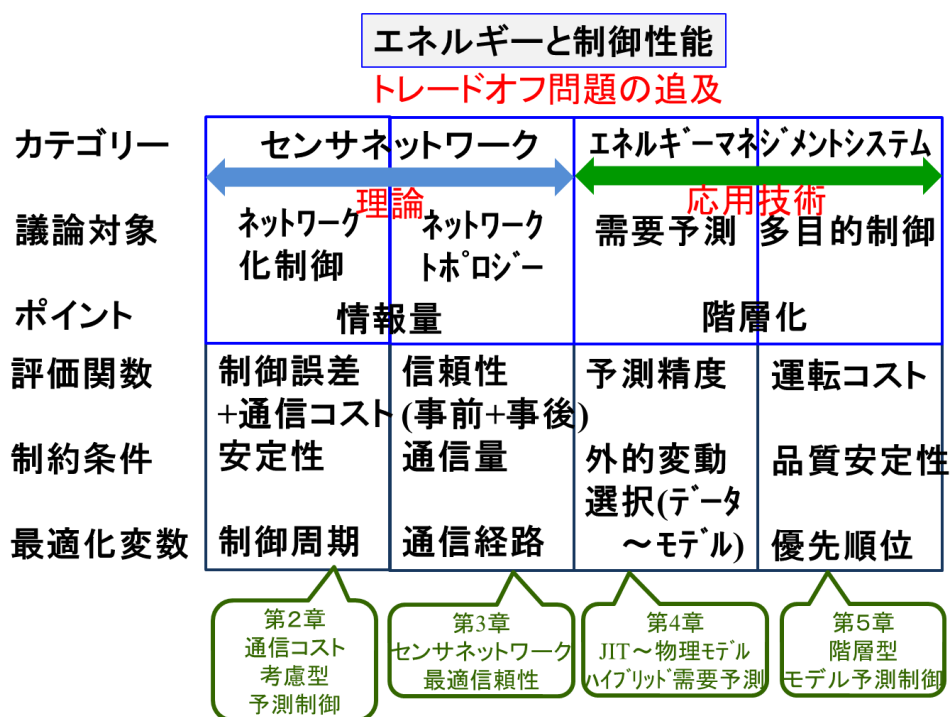


Fig. 1: rerationship between each proposed methods in this dessertation

センサネットワークを用いたネットワーク化制御システムに関する議論では、「情報量」の視点で、通信コスト、信頼性の2方向から問題を設定する。また、エネルギーマネジメントシステムにおいては、「階層化」の視点で、需要予測に

におけるデータモデルと物理モデルの階層化，エネルギー管理における目的別階層化制御の2方向から問題を設定する．

また，「エネルギー」という用語自体が制御理論における評価関数や物理的なエネルギーなど多義に亘るため，本研究での位置づけを明確にするために次の図に關係を示す．

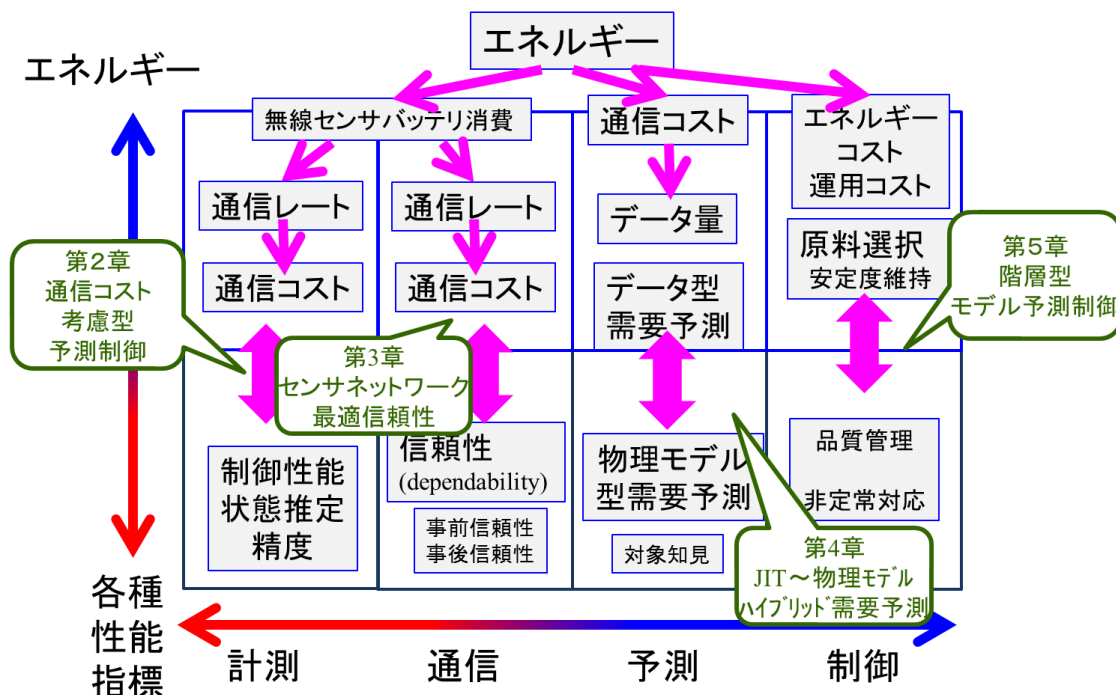


Fig. 2: Drill down of concept of “energy” in this dissertation

図に示すように，第2章，第3章におけるエネルギーの定義は，「無線センサのバッテリー消費電力」という問題に関連づけ，その低減のために「通信コスト」という指標として定式化した．また，第4章では，同じく通信コストに関連付けて，「データ量」をエネルギーに関連する指標とした．また，第5章では，本来の省エネを目的としたエネルギー管理システムにおいて，エネルギー消費量に関連するエネルギーコスト，原料投入コスト（原料によって必要とされるエネルギーコストが異なる）を指標とした．このように，各章の指標は異なるが，共通して広義の「エネルギー」の概念に結びつくものと位置付けている．

1.5 本研究の構成

本論文は以下の構成とする。

第1章「序論」では、本研究の背景についてまとめ、その動機と目的を述べる。制御システムの実応用における課題として、エネルギー最小化と各種制御指標のトレードオフ問題に着目し、第一にネットワーク化制御において無線センサのバッテリー消費低減のために通信レートと制御性能のトレードオフ問題、第二に通信レート制約下のネットワーク信頼性の問題、第三に、エネルギー管理システムにおいて、センサデータ量と需要予測精度のトレードオフ問題、第四にエネルギー管理システムにおけるエネルギーと品質、安定化のトレードオフ問題を挙げる。これに対し、本研究では、ネットワーク化制御における通信コストを考慮した予測制御方式、制御システムの信頼性を考慮したネットワークトポロジーの最適化、需要予測のためのデータ型モデルと物理モデルのハイブリッド構成法、多目的最適化を目指した階層型モデル予測制御、を提案する。

第2章「通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御」では、設置・運用の利便性から産業界で注目されているセンサネットワーク無線伝送情報量の制約、無線端末の電源供給の制約（バッテリー寿命）の課題を明確化する。その一つの対策として、無線端末間の通信レートを低くし、スリープモードにより通信タイミング間の消費電力を節約する通信方法に注目し、ネットワーク化制御として問題設定する。これに対し、第一に出力フィードバック形式のモデル予測制御の定式化をベースに、通信コストと制御性能のトレードオフ問題としての制御方式を導出する。そこでは、制御性能ペナルティと通信量ペナルティを併せた評価関数の最適化による、制御系と通信サンプリング周期の同時最適化制御方式を **Receding Horizon** 型評価関数によるモデル予測制御方式として定式化する。第二に、「イベント予測型制御によるネットワーク化制御」では、**self-triggered control** 方式の一種である状態予測型イベントトリガ制御(**Event Predictive Control** 方式)を提案する。ここでは、制御ループに相当するネットワークの通信スリープ期間中の制御系の開ループ予測軌道が安定化回復可能な軌道許容集合から離脱する限界点を予測イベントと定義し、予測イベントに連動してネットワークの通信復帰を制御する方式を提案する。また、状態推定問題についても同様の通信コストとのトレードオフ問題として定式化を試みる。

第3章「信頼性を考慮したネットワーク化制御系」では、通信制約下でのセンサネットワークの信頼性最適化問題を定義する。センサネットワークのトポ

ロジーに着目し、確率的な事前信頼性(事故の未然防止)と事後信頼性(回復可能性維持)を両立させたリスクボトルネックアルゴリズムを提案する。まず、静的な最適化問題として最適な通信トポロジーの設計法、次に動的にトポロジーを変化させる通信制御手法を定式化し、確率的にセンサネットワークの通信信頼性を最適化する手法として提案する。

第4章「ハイブリッドモデルに基づく需要予測手法」では、ビルのエネルギーマネジメントシステム (BEMS) において、無線センサの普及、センサリッチ化に伴う多量の計測データの利用と物理モデルの利用のトレードオフを考慮したデータベースモデル (Just In Time Model) と物理モデルのハイブリッドモデルに基づく需要予測手法を提案する。

第5章「階層型モデル予測制御によるエネルギー最適化制御」では、エネルギーマネジメントシステム (EMS) において、エネルギーと品質管理、安定化などの多目的な制御指標の優先順位を動的に考慮し柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式のコンセプトを提案し、工場向けのエネルギーマネジメントシステム FEMS (Factory Energy Management System) への応用技術として具体的な定式化を提案する。適用事例として、エネルギー多消費型産業の代表であるセメント産業セメントキルンプロセスを対象とし、提案手法の有効性を示す。

第6章「結論」では、本論文の研究成果をまとめ、今後の研究の方向性について考察を述べる。

第2章 通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御

2.1 ネットワーク化モデル予測制御の問題設定

本章では、設置・運用の利便性から産業界で注目されているセンサネットワークの、無線伝送情報量の制約、無線端末の電源供給の制約（バッテリー寿命）の課題を明確化する。その一つの解決手法として、無線端末間の通信レートを低くし、スリープモードにより通信タイミング間の消費電力を節約する方法に注目し、ネットワーク化制御として問題設定する。

2.2 通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御

本節では、前述の無線センサネットワーク制御システムの課題解決に向けた通信コストと制御性能のトレードオフ問題を、モデル予測制御のフレームワークで定式化する。

2.3 イベント予測型制御によるネットワーク化制御

本節では、制御対象の状態量ベクトルを可観測とした場合の、通信コストを考慮したネットワーク化制御問題として、状態予測に基づく予測イベントをトリガとした制御(Event Predictive Control 方式)を提案する。同方式においては、イベント予測制御の新しい概念を定義し、制御ループに相当するネットワークの通信スリープ期間中の制御系の開ループ予測軌道が安定化回復可能な軌道許容集合から離脱する限界点を予測イベントと定義し、予測イベントに連動してネットワークの通信復帰を制御する方式を提案する。

2.4 通信コストを考慮した状態推定問題

前節までの制御問題(第2節の代数表現のモデル予測制御による出力フィードバック制御, 第3節の予測イベントトリガー状態フィードバック制御)に対し, 理論展開を完全なものにするために, 他方の問題である状態推定問題に対する通信コストトレードオフ問題の定式化を試みる. さらに, この状態推定問題における状態推定誤差と, 前節までの各制御問題における制御誤差の双方の制約条件を勘案した通信コスト最小化方式を提案する.

2.5 考察

本章では, 通信コストを考慮した予測制御方式について種々の定式化と数値例による評価, 安定性に関する理論的考察を与えた.

特に, 2.2節に示した通信コストを考慮した (**Receding Horizon**型) モデル予測制御では, 制御性能に関する2次形式評価関数に通信コストの項を加え, その最小化問題として混合整数2次計画法による最適化問題を定式化した.

また, 2.3節に示したイベント予測型制御方式では, 状態空間で安定に留まる許容領域の集合を定義し, その中に維持可能な最大スリープ時間を予測するという制御方式を示した.

この2手法の長短を下表にまとめる.

Table : Comparison of two predictive control methods with communication cost

手法	方式・前提条件	利点	欠点
通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御	通信 on-off を[0-1]変数で表現, Bilinear-MIP 最適化問題として定式化. スリープ無しの制御系は安定とする.	2次評価関数に基づく現実的な制御応答が得られる. 制御の仕組みもシンプルで実装は容易.	Bilinear-MIP としての計算量が多い ヒューリスティック解法などの計算量低減は今後の研究課題
イベント予測型制御によるネットワーク化制御	状態空間で安定性回復条件継続限界を予測. 安定軌道内に留まる間は最大限にスリープモードを維持 状態は可観測, モデル誤差は無とする.	有界な最悪外乱を想定しており, ある程度の対外乱性を有する.	安定軌道 (許容集合) の計算が高次元の場合, 煩雑となる. 安定軌道内でハンチングするなど, 制御応答は feasible であるが実用上好ましくない場合もある.

第3章 信頼性を考慮したネットワーク化制御系

センサネットワークなどの無線通信ネットワークの最大の課題は信頼性の確保である。そこで、本節では、ネットワークのトポロジーに着目し、確率的な事前信頼性(事故の未然防止)と事後信頼性(回復可能性維持)を両立させたリスクボトルネックアルゴリズムを提案する。まず、静的な最適化問題として最適なトポロジーの導出、次に動的にトポロジーを変化させるダイナミックトポロジー手法を提案し、確率的に信頼性を最大化することを試みた。

第4章 ハイブリッドモデルに基づく需要予測 手法

本章では、次世代のエネルギー供給システムとして注目されるスマートグリッド、スマートコミュニティに向けたエネルギーマネジメントシステム（EMS）の高度化機能化を目的に、EMS機能で重要となる需要予測機能に着目し、突然の環境変化や外的要因、人為的要因にも対応できる手法として、ビルの物理モデルと計測データに基づくデータベースモデル（JITモデル）を組み合わせたハイブリッドモデルベース需要予測方式を提案する。

第 5 章 階層型モデル予測によるエネルギー最適化制御

地球と人類の持続のために、エネルギー・環境問題は人類の主要課題である。また、東日本大震災を経て、わが国の電力不足対策は長期的課題となりつつある。これらの背景から、より一層の省エネや節電の積極的な推進、エネルギー利用の合理化が社会的な課題となっている。エネルギー利用合理化の手段として、ビルに対してはBEMS : Building Energy Management System の普及、住宅に対してはHEMS : Home Energy Management System によるスマートハウスの普及、そして工場に対しては、FEMS : Factory Energy Management System のより一層の普及と高度化が望まれている。

本章では、各種エネルギーマネジメントシステム(EMS)において、システム制御の応用課題として、エネルギーと品質管理、安定化などの多目的な制御指標に柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式に着目し、その工場に向けたエネルギーマネジメントシステムFEMS (Factory Energy Management System) への応用技術の高度化を研究課題とする。ここでは、エネルギー多消費型産業の代表であるセメント産業のセメントキルンプロセスを適用対象例とし、新しい制御方式を提案した。

第6章 結論

本論文では、センサネットワークを応用したネットワーク化制御，モデル予測制御に基づくエネルギーマネジメントシステムの組み合わせから派生する種々の技術課題として，

- ・無線センサネットワークのバッテリー消費低減のための通信コストを考慮したネットワーク化制御方式

- ・通信ネットワークで課題となる信頼性の課題への対応として信頼性を確保したネットワーク化制御方式

- ・センサのネットワーク化による多量のデータを生かしたエネルギーマネジメントシステムの応用技術として，データに基づく需要予測と物理モデルに基づく需要予測のハイブリッド方式とそのBEMS (Building Energy Management System)への応用

- ・エネルギーと品質管理，安定化などの多目的な制御指標に柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式とそのFEMS (Factory Energy Management System)への応用

に着目した．

第一に，ビルや工場，住宅，産業界等のセンサリッチ化に重要な役割を担うセンサの無線化に関し，センサネットワークを応用した予測制御システム（ネットワーク化制御系）に関する研究成果を示した．ここでは，計測制御系におけるエネルギー問題として，特にバッテリー駆動型無線センサネットワークの宿命であるバッテリー寿命に起因する通信量最小化と制御性能のトレードオフ最適化問題を提案し，その解法を提案した．

第二に，これらのセンサネットワークベースのネットワーク化制御系における信頼性確保のためにディベンダビリティに関する指標を定義し，それを最適化する動的なトポロジー制御手法を提案した．

第三に，センサリッチ化した社会インフラで，それらのセンサデータを用いて，予測制御に基づくエネルギーマネジメントシステムを構成する場合に，必要となる実用的な需要予測手法として，センサデータを活用したデータベース型モデル (JIT:Just In Time Modeling) と物理モデルのハイブリッドモデリング手法に基づく需要予測手法を提案した．

第四に，エネルギーマネジメントを目的とした制御手法として，階層型モデル予測制御による，エネルギー，品質，安定化の多目的最適化制御システムの構成方法について一手法を提案した．

以下各項目別の結論を示す。

第1章「序論」では、まず本研究の全体像として、計測制御システムにおけるセンサネットワーク、そのエネルギー管理問題としての通信コストの考慮、制御性能と通信コストと信頼性のトレードオフ問題に注目した。また、裏返しの課題である計測制御システムを用いたエネルギーマネジメントとして、センサリッチ化による多量データからのデータマイニングと物理モデルによる需要予測、エネルギー、品質、安定化の多目的最適化制御システムの課題などを提案し、本研究の方向性を定義した。

また、各問題設定の背景として、まず、センサネットワークの産業応用における諸課題、センサリッチな環境の構築とその投資対効果の実現のために実装が容易なセンサネットワークへの期待、それを計測制御システムに応用する際の課題、そして、社会インフラへのエネルギーマネジメントのニーズと課題についてまとめた。

第2章「通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御」では、設置・運用の利便性から産業界で注目されているセンサネットワークの、無線伝送情報量の制約、無線端末の電源供給の制約（バッテリー寿命）の課題を明確化した。その一つの解決手法として、無線端末間の通信レートを低くし、スリープモードにより通信タイミング間の消費電力を節約する方法に注目し、ネットワーク化制御として問題設定した。

そこで「通信コストを考慮したネットワーク化モデル予測制御」として、出力フィードバック形式のモデル予測制御の定式化をベースに、通信コストと制御性能のトレードオフ問題を導出した。ここでは、制御性能ペナルティと通信量ペナルティを併せた評価関数の最適化による、制御系と通信サンプリング周期の同時最適化制御方式を **Receding Horizon** 型評価関数によるモデル予測制御として定式化した。

また、「イベント予測型制御によるネットワーク化制御」では、制御対象の状態量ベクトルを可観測とした場合の状態フィードバック制御問題において、別の定式化として、状態予測型イベントトリガ制御(**Event Predictive Control** 方式)を提案した。同方式においては、イベント予測制御の新しい概念を定義し、制御ループに相当するネットワークの通信スリープ期間中の制御系の開ループ予測軌道が安定化回復可能な軌道許容集合から離脱する限界点を予測イベントと定義し、予測イベントに連動してネットワークの通信復帰を制御する方式を提案した。

さらに、上記提案を補完する、状態推定問題についても同様の問題設定での定式化を試みた。さらに、状態推定問題における状態推定誤差と制御問題にお

ける制御誤差の双方の制約条件を勘案した通信レート最小化方式を提案した。

結論として、「通信コスト」指標を制御系の評価関数に組み込み、「通信レート」を制御変数に導入することで、

- ・通信 on-off(0-1 計画)によるMPC方式
- ・Self Triggered Control の一手法 “イベント予測型制御” 方式

という新しい制御方式のコンセプトが得られた。

第3章「信頼性を考慮したネットワーク化制御系」では、センサネットワークなどの無線通信ネットワークの最大の課題は信頼性の確保をテーマとし、ネットワークのトポロジーに着目し、確率的な事前信頼性(事故の未然防止)と事後信頼性(回復可能性維持)を両立させたリスクボトルネックアルゴリズムを提案した。まず、静的な最適化問題として最適なトポロジーの導出、次に動的にトポロジーを変化させる手法を定義し、確率的に信頼性を最大化することを試みた。

結論として、ネットワーク通信信頼性指標(事前=*reliability* と事後=*integrity*)のもとに、通信ネットワークの静的最適設計、動的トポロジー変化による信頼性最大化という問題設定に取り組み、動的変化(ランダムNW)の制御システムとしての高信頼化の可能性を示すことができた。

第4章「ハイブリッドモデルに基づく需要予測手法」では、ビルのエネルギーマネジメントシステム(BEMS)において、無線センサ普及によるセンサリッチ化に伴う多量の計測データを活用した実用的な需要予測手法をとしてデータベースと物理モデルのハイブリッドモデルに基づく需要予測手法を提案した。ビルエネルギー消費の実データによる精度検証を通じて、本有効性を検証した。

結論として、JITモデルと物理モデルの階層化によるハイブリッド需要予測方式で、データ量と予測精度のトレードオフに対する一つの戦略を示した。

第5章「階層型モデル予測制御によるエネルギー最適化制御」では、エネルギーマネジメントシステム(EMS)において、エネルギーと品質管理、安定化などの多目的な制御指標に柔軟に対応する階層型モデル予測制御方式とその工場に向けたエネルギーマネジメントシステムFEMS(Factory Energy Management System)への応用技術を研究対象とした。ここでは、エネルギー多消費型産業の代表であるセメント産業のセメントキルンプロセスを適用対象例とし、新しい制御方式を提案した。

結論として、階層型モデル予測制御方式による多目的階層化制御(エネルギー

一と品質、安定化のトレードオフ)による優先順位管理のコンセプトを提案した。

これらの研究は、エネルギーマネジメントシステムの社会普及に貢献すべく、まず無線センサによるネットワーク化制御のバッテリー長寿命化と信頼性の確保を持って、より導入しやすい技術確立を目指した。また、センサリッチとなった各種施設において、多量のエネルギーデータと物理モデルのそれぞれの長所を生かし、欠点を補い合う、実用的な需要予測手法により、エネルギーマネジメントシステムそのものの性能向上への貢献を目指した。

本研究成果がエネルギーマネジメントシステムの社会普及に役立つことを期待する。

以上

謝辞

本研究を進めるにあたり、博士後期課程社会人大学院プログラムへの入学を薦めていただき、また、在学・休学併せて8年間の長い期間に亘り、暖かい御指導を賜りました 藤田政之 教授に心より深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、大変多忙な中、審査と御指導をいただきました 東京工業大学 三平満司 教授、井村順一 教授、山北昌毅 准教授、早川朋久 准教授に心より感謝致します。

また、在学中に研究内容、研究の進め方など親身にご指導とご助言をいただきました、畑中健志 准教授に心より感謝致します。

さらに、株式会社東芝において、社会人大学院生としての活動に深い理解と応援をいただきました職場上司、同僚に心より感謝致します。

最後に、これまでの社会人としての研究活動の心の支えとして、暖かく見守っていただきました、(故)父、母、妻、そして2人の子供に心より感謝致します。

本研究に関する発表論文

研究論文

[1] Y. Iino, K. Abe & Y. Tsukamoto, “Hierarchical Model Predictive Control Applied to a Cement Raw Material Mixing Process”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.1, No.3, pp.207-215, May 2008.

【第6章】

[2] 飯野,村井,村山,本山, “ビル熱需要予測の物理モデルとデータベースモデルの融合によるハイブリッドモデリング手法”, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌) , Vol.131, No.8, pp.1431-1438, 2011年8月. 【第5章】

国際学会

[1] Y. Iino, T. Hatanaka & M. Fujita, “Wireless Sensor Network based Control System Considering Communication Cost”, Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, pp.14992-14997, Seoul, Korea, July 6-11, 2008. 【第2章】

[2] Y. Iino, T. Hatanaka & M. Fujita, “Event-predictive Control for Energy Saving of Wireless Networked Control System”, Proceedings of the 2009 American Control Conference, pp.2236-2242, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009. 【第3章】

[3] Y. Iino, T. Hatanaka & M. Fujita, “Dynamic Topology Optimization for Dependable Sensor Networks”, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp.274-279, Yokohama, Japan, September 8-10, 2010.

【第4章】

その他関連する学会等における口頭発表

[1] 飯野, 畑中, 藤田, “無線センサネットワーク制御システムの諸問題における考察ー 通信コストと制御性能のトレードオフ ー”, 計測自動制御学会 第36

回制御理論シンポジウム予稿集, pp.457-462, 2007年9月5-7日.

[2] Y. Iino & M. Fujita, "Wireless Sensor Network based Control System --- Trade off between sensor power saving and control performance ---", Proceedings of the SICE Annual Conference 2007, pp. Sept.17-20, 2007, Kagawa University, Japan.

[3] 飯野, 阿部, 塚本, "階層型モデル予測制御方式のセメント原料配合系への適用", 計測自動制御学会 第8回制御部門大会予稿集, SY0004/08/0000-05222, 2008年3月5-7日.

[4] 飯野, 畑中, 藤田, "モデル予測型イベント駆動制御のセンサ・アクチュエータネットワーク制御システムへの応用", 計測自動制御学会 第37回制御理論シンポジウム予稿集, pp.347-350, 2008年9月17-19日.

[5] 飯野, 畑中, 藤田, "信頼性を考慮したセンサネットワーク化制御系に関する考察", 計測自動制御学会 第9回制御部門大会予稿集, SY0003/09/0000-WC22, 2009年3月.

[6] Y. Iino, M. Murai, D. Murayama, I. Motoyama, S. Kuzusaka, K. Ueta, "Hybrid Modeling with Physical and JIT model for Building Thermal Load Prediction and Optimal Energy Saving Control", Proceedings of the ICROS-SICE International Joint Conference 2009, pp.2008-2011, August 18-21, 2009, Fukuoka international Congress Center.

[7] 飯野, 畑中, 藤田, "通信コストを考慮したカルマンフィルタによる状態推定型予測制御方式", 計測自動制御学会 第38回制御理論シンポジウム予稿集, pp.335-338, 2009年9月14-16日.

[8] 飯野, 畑中, 藤田, "センサアクチュエータネットワーク制御における連携型スリープモード制御に関する考察", 計測自動制御学会 第39回制御理論シンポジウム予稿集, pp.57-60, 2010年9月27-29日.