

論文 / 著書情報
Article / Book Information

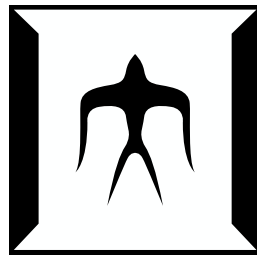
題目(和文)	ICT機器連携システムを利用したデータセンタ空調制御システムの開発と検証
Title(English)	
著者(和文)	遠藤浩史
Author(English)	Hiroshi Endo
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11420号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:藤田 政之,三平 満司,井村 順一,山北 昌毅,早川 朋久,畑中 健志
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11420号, Conferred date:2020/3/26, 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

ICT 機器連携システムを利用したデータセンタ空調制御シ
ステムの開発と検証

指導教員 藤田 政之 教授

畑中 健志 特定准教授



東京工業大学

工学院 システム制御系 システム制御コース

遠藤 浩史

2020 年 2 月 26 日

要 旨

本論文ではデータセンタの高効率運用に向け、サーバ情報を含む多様なセンサ情報を利用したデータセンタ空調システムに対する空調制御手法を示す。情報通信技術 (ICT) の発達に伴い、データセンタの増加や高性能コンピューティングシステムの演算処理能力向上が加速すると想定される。これにより、データセンタで消費される電力が今後さらに増加し、データセンタの消費電力削減が重要な課題となると予想される。これまで、省電力を目的とした空調システムの制御アルゴリズム構築に関する研究が多数報告されている。近年、データセンタインフラ管理 (DCIM) システムにより、データセンタでは冷却機器や ICT 機器のセンサ情報が一括で取得可能である。このシステムを利用する事で、冷却システムだけでなく ICT 機器も含めた全体最適化によりさらなる電力削減が期待できる。

本論文では DCIM が与える多様なセンサ情報を利用し、データセンタ空調システムを高効率する手法について検討する。はじめに、検証に利用した2箇所のデータセンタとして、実験用のサーバルームと実運用サービスを展開している実運用中のサーバルームを紹介する。つぎに、サーバルームにある空調機および外調機に対し、空調効率向上や電力削減を実現する制御手法およびモデリング手法を提案する。一般にデータセンタの ICT 機器と空調機の電力にはサーバルームや ICT 機器の温度に対してトレードオフの関係が存在し、ICT 機器と空調機の電力和には最小点が存在することが知られている。これをふまえ、空調機はサーバルームと ICT 機器の温度制約を守りながら、ICT 機器と空調機の電力和を最小にするように空調機を制御する。また、空調機効率は温度のみならず湿度の影響を受けるため、外気と室内の温湿度のバランスを見ながら外気導入量を調整する必要がある。これをふまえ、温湿度両者を加味したエンタルピに基づく外調機制御手法を提案する。空調機および外調機の制御により、全体のエネルギー効率向上が期待できる。最後に実運用データセンタのモデリングにおいて、対象の動的なレイアウト変更や同定用データの取得の難しさを課題として挙げ、解決策として Just-In-Time(JIT) モデリングを用いた逐次モデル構築手法を提案する。

提案手法の実現のため、ICT 機器情報やエンタルピ情報を用いた空調機および外調機制御の有用性と、JIT モデリングを用いたモデル構築手法の有用性を検証する必要がある。そこで、本論文では実験用サーバルームおよび実運用中サーバルームでこれらの提案手法の有用性を検証する。はじめに、実験用サーバルームではサーバ情報の空調制御に対する有用性を検証する。サーバルームの構成からエアフローに基づくブロック図を構築し、入力変数を決定しモデルを同定する。同定結果より、空調機を備えサーバ情報が利用できる対象

のサーバールームを静的モデルで表現できることを導出する．つぎにこのモデルを用い，空調機設定温度に対する実時間最適化制御を検証する．具体的には，サーバールーム電力を最小化する空調制御手法を用いて，サーバ負荷情報から空調機設定温度を決定するアルゴリズムを用いて空調機設定温度を制御し，制約温度から制御の有用性と，電力量から電力削減効果を得る．その結果，実際のサーバ負荷履歴において急激な負荷上昇が生じる時間帯のみ空調機を予運転する対策を施すことで，サーバールーム及びサーバの温度制約を満たしながら空調機設定温度を制御できることを確認する．

つぎに，本論文では実運用中サーバールームで，JIT モデリング手法とエンタルピを利用した外調機制御に対する有用性を検証する．ここでは，JIT モデリングを使い物理量の一時間先の推定モデルを逐次構築し，制御量を考慮して操作量を決定する一連のアルゴリズムを提案する．本論文では，入力変数を全て使う従来の単純な JIT モデリング手法は，推定精度が不十分であることを，推定結果をシミュレーション結果より指摘する．この課題に対し，各物理量の依存関係に関する物理的な知見とステップワイズ法を併合することで，同定データから寄与度の低い変数を消去する逐次モデリング手法を提案する．具体的には，各物理量の依存関係については，サーバールーム内のエアフローに基づき決定する．その結果，提案法により予測精度が大幅に向上した事を，推定結果をシミュレーション結果より確認する．つぎにモデリング結果にもとづいて，エンタルピを使用した外調機の制御手法，および複数空調機の設定温度に対し電力効率が最大となる最適制御手法を使い，実証試験を行う．その結果，提案アルゴリズムが種々の制約を満たしつつ，空調機の電力効率が高い行動を選択することを確認する．およそ2か月の連続試験を実運用中のサーバールームで実機検証し，29%の空調電力削減を達成する．

最後に本論文の研究成果についてまとめ，今後の研究の方向性について考察を述べる．

本研究に関する論文

学術論文誌

- [1] 遠藤, 石倉, 畑中, 児玉, 鈴木, 福田, 藤田: ICT 機器連携システムを利用したデータセンタ空調機の実時間最適化, 計測自動制御学会論文集, **55-2**, 118/126 (2019) [Chapters 2, 3]
- [2] 遠藤, 鈴木, 白石, 畑中, 福田, 藤田: JIT 予測モデル融合型データセンタ空調制御システムの開発と検証, 計測自動制御学会論文集, **55-10**, 625/634 (2019) [Chapters 2, 4]

国際会議会議録掲載論文

- [3] H. Endo, S. Suzuki, H. Kodama, T. Hatanaka, H. Fukuda and M. Fujita: Development of Predictive Control System Using Just-In-Time Modeling and Enthalpy-Aware Control in Air Conditioners for Large-Scale Data Center, *2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems*, 1278/1283 (2018) [Chapters 2, 4]

国内学会誌および雑誌

- [4] 遠藤, 白石, 鈴木, 福田: 大規模データセンタにおける ICT 情報を利用する空調制御システムの開発, 計測と制御, **58-8**, (2019) [Chapters 2, 4]
- [5] 遠藤, 白石, 土肥, 山本, 福田: データセンタの空調電力を大幅に削減する予測制御技術の開発, クリーンエネルギー, **28-3**, (2019)[Chapters 2, 4]

[その他の関連する主な業績]

学術論文誌

- [6] H. Endo, H. Kodama, H. Fukuda, T. Sugimoto, T. Horie and M. Kondo: Effect of Climatic Conditions on Energy Consumption in Direct Fresh-Air Container Data Centers, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, **6**, 17/25 (2015)

国際会議会議録掲載論文

- [7] H. Endo, H. Kodama, H. Fukuda, T. Sugimoto, T. Horie and M. Kondo: Effect of climatic conditions on energy consumption in container data centers, *Green Computing Conference*, 1/10 (2013)
- [8] H. Endo, H. Kodama, H. Fukuda, T. Sugimoto, T. Horie and M. Kondo: Cooperative control architecture of fan-less servers and fresh-air cooling in container servers for low power operation, *Workshop on Power-Aware Computing and Systems*, (2013)
- [9] M. Ogawa, H. Endo, H. Fukuda, H. Kodama, T. Sugimoto, T. Horie, T. Maruyama and M. Kondo: Cooling control based on model predictive control using temperature information of IT equipment for modular data center utilizing fresh-air, *2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems*, 1815/1820 (2013)
- [10] M. Ogawa, H. Endo, H. Fukuda, H. Kodama, T. Sugimoto, H. Soneda and M. Kondo: Cooling Control Restraining Effects Due to ICT Equipment Utilization of Disturbance Based on Model Predictive Control for Modular Data Center, *2014 IEEE Conference on Control Applications*, 183/190 (2014)
- [11] M. Ogawa, H. Fukuda, H. Kodama, H. Endo, T. Sugimoto, T. Kasajima and M. Kondo: Development of a Cooling Control System for Data Centers Utilizing Indirect Fresh Air Based on Model Predictive Control, *2015 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, 132/137 (2015)

- [12] H. Endo, M. Ogawa, T. Kasajima and H. Fukuda: Development of Cooling Control Technology by Just-In-Time Modeling for Power Reduction in Large-Scale Data Center, *2016 European Control Conference*, 611/616 (2016)
- [13] H. Kodama, H. Endo, S. Suzuki and H. Fukuda: High Efficiency Cloud Data Center Management System Using Live Migration, *2017 IEEE 10th International Conference on Cloud Computing*, 733/738 (2017)
- [14] C. Lee, T. Kumano, T. Matsuki, H. Endo, N. Fukumoto and M. Sugawara: Understanding Storage Traffic Characteristics on Enterprise Virtual Desktop Infrastructure, *Proceedings of the 10th ACM International Systems and Storage Conference* (2017)
- [15] H. Endo, H. Kodama and H. Fukuda: Temperature and Humidity Management Method of Direct Fresh-Air Cooling for Energy-Saving in Modular Data Centers, *7th International Symposium on Energy*, 13/17 (2017)
- [16] T. Shiraishi, H. Endo, T. Hineno and H. Fukuda: Robust Data-Driven Power Simulator for Fast Cooling Control Optimization of a Large-Scale Computing System, *The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis* (2019)

国内会議会議録掲載論文

- [17] 杉本, 稲野, 児玉, 遠藤, 福田, 近藤, 田中, 堀江: 統合管理・運用による高効率データセンターの実現, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2014)
- [18] 小川, 遠藤, 福田, 児玉, 杉本, 堀江, 丸山, 近藤: モデル予測制御法による ICT 機器温度管理と省エネルギーを考慮した外気導入型データセンタの冷却制御, 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (2014)
- [19] 鈴木, 児玉, 遠藤, 福田: JIT モデリングによるサーバ負荷予測手法の検討と評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2018)

特許

- [20] 小川, 遠藤, 福田, 近藤: 電子機器冷却システム, 特許第 6083305 号 (2017)

- [21] 梅宮, 遠藤, 有岡, 小川, 柄澤, 徳世, 福田, 菊地, 近藤: 電子機器冷却システム, 特許第 6083316 号 (2017)
- [22] M. Kondo, H. Fukuda, S. Umemiya and H. Endo: RACK FOR ELECTRONIC EQUIPMENT, AND INFORMATION PROCESSING DEVICE, EP2787801B1 (2017)
- [23] M. Ogawa, H. Endo, H. Fukuda and M. Kondo: Temperature management system, US9645622B2 (2017)
- [24] 梅宮, 遠藤, 小川, 柄澤, 菊地, 福田, 近藤, 徳世, 有岡: モジュール型データセンタとその制御方法, 特許第 6149372 号 (2017)
- [25] H. Kodama and H. Endo: Information processing device and controlling method, US9732972B2 (2017)
- [26] M. Kondo, H. Fukuda, S. Umemiya and H. Endo: Electronic device rack and information processing apparatus, US9814161B2 (2017)
- [27] K. Karasawa, M. Ogawa, H. Endo, T. Arioka, S. Umemiya, Y. Kikuchi, S. Tokuyo, H. Fukuda, M. Kondo, H. Yoshida and A. So: Modular data center, US9820412B2 (2017)
- [28] H. Endo, H. Kodama, M. Ogawa and H. Fukuda: Modular data center and controlling method of modular data center, US9839165B2 (2017)
- [29] M. Ogawa, H. Endo, H. Fukuda and M. Kondo: Air conditioning control system and air conditioning control method, US9841204B2 (2017)
- [30] H. Endo, H. Kodama, M. Ogawa and H. Fukuda: MODULAR DATA CENTER AND CONTROL METHOD THEREFOR, EP2916083B1 (2017)
- [31] H. Endo, H. Kodama, M. Ogawa and H. Fukuda: Modular data center and method of controlling modular data center, US9930814B2 (2018)
- [32] M. Kondo, H. Fukuda, H. Endo and M. Ogawa: Temperature management system, US9958916B2 (2018)
- [33] Y. Wakino, H. Endo, H. Kodama, H. Fukuda and S. Inano: Data center with liquid immersion tank and control method of the data center based on temperature difference, US10015912B2 (2018)

- [34] H. Fukuda, S. Tokuyo, S. Umemiya, M. Ogawa and H. Endo: Data center, US10025327B2 (2018)
- [35] H. Endo and H. Kodama: Management apparatus and method of controlling information processing system, US10025369B2 (2018)
- [36] M. Ogawa, H. Kodama, H. Endo, H. Fukuda and M. Kondo: Temperature prediction system using prediction models, temperature prediction method using prediction models, and non-transitory computer readable recording medium having therein program for temperature prediction using prediction models, US10061365B2 (2018)
- [37] H. Kodama, H. Endo, Y. Wakino, S. Inano and H. Fukuda: Liquid immersion cooling apparatus, liquid immersion cooling system, and control method of liquid immersion cooling apparatus, US10111367B2 (2018)
- [38] H. Endo, M. Kondo, H. Fukuda and M. Ogawa: Module-type data center, US10178809B2 (2019)
- [39] M. Kondo, H. Endo, S. Umemiya, T. Arioka and H. Fukuda: MODULAR DATA CENTER AND CONTROL METHOD THEREFOR, EP2833239B1 (2019)
- [40] M. Ogawa, H. Endo, H. Fukuda and M. Kondo: TEMPERATURE MANAGEMENT SYSTEM, EP2977852B1 (2019)
- [41] H. Endo and H. Fukuda: Data center, US10299411B2 (2019)
- [42] M. Ogawa, T. Kasajima, H. Endo, H. Fukuda and M. Kondo: Physical quantities prediction apparatus and method, US10325214B2 (2019)
- [43] H. Endo and H. Fukuda: Management device and system for calculating a predicted value of a measurement location, US10379516B2 (2019)
- [44] S. Suzuki, H. Endo, H. Kodama and H. Fukuda: Apparatus and method to control calculation resources of an information processing device based on predictive values of reference data, US10417050B2 (2019)
- [45] M. Ogawa, H. Endo, H. Fukuda and M. Kondo: TEMPERATURE ADMINISTRATION SYSTEM, EP2894524B1 (2020)

プレスリリース

- [46] コンテナデータセンター向けにサーバと空調システムを連携させた 省電力システム制御技術を開発 内蔵ファンを持たないサーバを採用し，総消費電力を最大約 40%削減，株式会社富士通研究所プレスリリース (2013)
- [47] データセンターの空調の省エネを実現する技術を開発 高精度な予測技術により空調電力を 20%削減，株式会社富士通研究所プレスリリース (2016)
- [48] データセンターのラックあたりのサーバ実装密度を向上させる仮想サーバ制御技術を開発，株式会社富士通研究所プレスリリース (2017)
- [49] データセンターの空調電力を大幅に削減する空調制御技術を開発 内気循環と外気導入の適切な組み合わせ算出などにより，空調設備の消費電力を 29%削減，株式会社富士通研究所プレスリリース (2018)

技術講演

- [50] 遠藤浩史：データセンタの電力削減に向けた，ICT 機器-空調機一体制御技術について，グリーングリッド日本支部 データセンタ技術勉強会 (2017)