

「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」
平成19 年度採択研究代表者

前田 龍太郎

(独)産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門・上席研究員

ULP ユビキタスセンサの IT システム電力最適化制御への応用

§ 1. 研究実施の概要

本研究は情報機器が集積したデータセンター (DC) を主な対象とし、その省電力化を機器稼働時の“運用効率化”により実現する。具体的には、ULP ユビキタスセンサによる消費電力等の“可視化”データを活用し、仮想化技術による計算機資源の削減および空調等を含む建屋全体の効率化により大幅な省電力化を狙う。本年度は以下の研究を実施した。

i) ULP ユビキタスセンサの開発に関しては、センサ端末を構成する基幹要素部品である超小型コイルの電磁界シミュレーションを用いた最適化設計を行うとともに、専用のコイル製造装置を構築した。また、プロトタイプ無線電力センサ端末の改良を行うとともに、それを用いたネットワーク測定システムを試作した。

ii) グリッドデータセンター運用管理システムについては、各要素モジュールである運用決定モジュール、仮想クラスタ構築システムおよび仮想計算機システムの高度化とともに、これら三つのモジュールを統合した運用管理システムのプロトタイプ実装を行った。

iii) ULP 情報システムのデザインでは、平成 20 年度にシナリオプランニング手法で描写した“4つの社会像”のそれぞれにおいて機器の稼働台数を見積もり、さらに技術進展がない(機器それぞれの消費電力量は現在と同等)という仮定を用いて、情報機器の将来の電力消費量を試算した。また、ULP ユビキタスセンサを用いた民生業務部門・家庭部門を対象とした“消費電力の可視化”の社会実証実験を開始した。

iv) システム実験グループでは、モジュラー型省エネ DC の実現を目指し、空調エネルギーの削減の観点から、空調機によらない排熱の可能性およびエアフロー管理による空調負荷の低減について検討を進めた。

§ 2. 研究実施体制

(1)「ユビキタスセンサ」グループ

① 研究分担グループ長:前田 龍太郎((独)産業技術総合研究所、上席研究員)

② 研究項目

IT 機器の消費電力を無給電(バッテリーレス)・非接触で測定する平均消費電力 $1\mu\text{W}$ レベルの無線センサ端末およびネットワークシステムを開発するため、以下の研究項目を実施する。

- ・高効率超小型コイル開発
- ・超低消費電力専用回路開発
- ・超低消費電力無線センサ端末の開発
- ・ネットワーク測定システムの開発
- ・情報システムの将来予測モデルの開発

(2)「グリッド」グループ

① 研究分担グループ長:伊藤 智((独)産業技術総合研究所、副研究部門長)

② 研究項目

地理的に分散された複数の DC を仮想的に統合し、DC 間で資源を共有することにより、設備の過剰投資抑制および資源の利用効率向上を実現しつつ、電力消費量を最適化可能な“グリッドデータセンター”の運用管理システムの研究開発を行う。

(3)「エコデザイン」グループ

① 研究分担グループ長:藤本 淳(東京大学、特任教授)

② 研究項目

情報機器の消費電力の実測値を活用し、わが国の情報システムの総消費電力量を試算することで、情報システムの省エネ施策立案に資する。わが国の民生部門からの二酸化炭素排出量削減(電力由来)を目的に、ユビキタスセンサを用いた電子・電気製品の消費電力の“可視化”の社会実証試験を実施する。

(4)「システム実験」グループ

① 研究分担グループ長:田村 徹也(日本電気株式会社、シニアマネージャー)

② 研究項目

- ・省エネを実現するモジュラー型データセンターのコンセプト立案
- ・データセンターの消費電力実態調査、消費電力モニタリング
- ・ユビキタスセンサを利用したデータセンターの省エネ施策の開発と実証実験

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

<ULP ユビキタスセンサの開発>

・高効率超小型コイル作製専用パターンニング装置の開発および改造を行った。開発した専用装置の露光光学系の光源はブロードな波長を持つ特徴があり、パターンニング結像面で多重結像を発生する色収差の原因となった。この色収差は、結像面での像ボケの主因となるため、半値全幅10nm、中心波長436nmの狭帯域干渉フィルタを用いることで光学系の改造を行った。また、無限遠補正光学系を構成するマスク後方の単一両凸レンズにより生じた像面湾曲収差を補正するため、三枚のレンズからなる組みレンズを用いることによって、露光光学系の改善を行った。その結果、計算上湾曲収差は単一両凸レンズより、最大1/30以下となり、図1に示すように、ほぼ設計通りのマスク結像が得られることが確認できた。⁶⁻⁷⁾

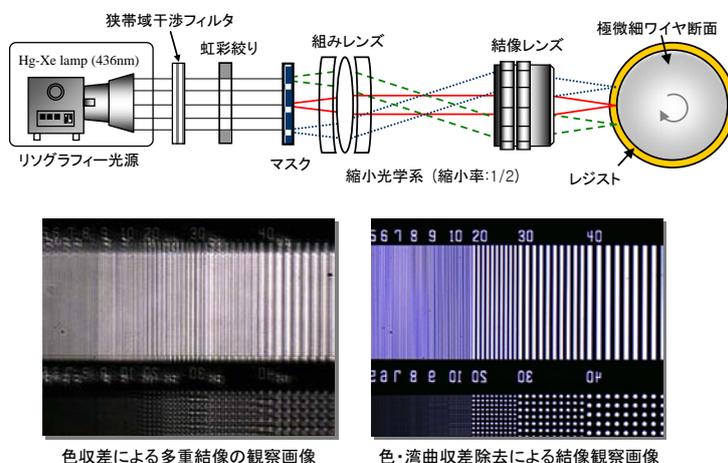


図. 1 専用パターンニング装置の露光光学系の概略図と平面基板上の結像面の観察画像

また、電磁界シミュレーションを用いた高効率超小型コイルの最適化設計を行い、商用電源周波数でもセンサ端末における発電に十分な誘導電圧が得られること、形状としては実質上ギャップを生じないようなコア構造を採用する必要があること、コア材料・形状の最適化が重要であることなどが明らかとなった。

さらに、小型クランプ型コイルを用いた温度センサ付きプロトタイプ電力測定無線センサ端末の改良を行うとともに、データセンターやオフィス・家庭において空調制御と組み合わせた電力制御への応用を視野に入れたネットワーク測定システムの試作を行った。具体的には、本領域の各チームに対し配付可能な、端末10台からなる無線電力・温度測定システムを実現した。また、無線センサ端末を用いた社会実証実験に向けて、エコデザイングループと連携して実験計画を具体化した。

<消費電力を削減するグリッドデータセンター管理システムの研究>

昨年度開発した三つのモジュール、運用決定モジュール、仮想クラスタ構築システム、および仮

想クラスタシステムの高度化¹⁻⁴⁾を行うとともに、統合して運用するためのグリッドデータセンター運用システムを開発した。

仮想クラスタシステムにおいては、より柔軟な資源運用を可能とするために、メモリイメージの転送を最適化することで、仮想マシンのマイグレーション時間の短縮を行った。従来技術では、メモリイメージの転送をすべて完了してから仮想マシンの起動を行うため、仮想マシンのマイグレーションは時間がかかってしまう。そこで、我々は、先に必要最小限の情報を移動してすぐに仮想マシンを起動し、その後必要なメモリイメージをコピーする機構を開発した。これによりこれまで10秒以上かかっていた仮想マシンの起動を1秒未満で実施することを可能とした。⁵⁾

グリッドデータセンター運用システムは、サーバからセンサやツールを利用して、消費電力、CPU 負荷などの情報を取得し、それに基づき、一つのサイト内でのサーバの消費電力を削減する運用を可能とした。今年度は、仮想マシンが必要とする CPU リソース量の情報に基づいて、可能な限り少ない物理サーバ上に集約し、不要な物理サーバの電源を落とすことを実現した。仮想マシンが必要とするCPUリソース量は、実際のCPU負荷を計測して使用したのでは、短時間で変動してしまうため、ユーザが設定した必要量に合わせて制御することとした。将来的には、仮想マシンで使用できるリソースを仮想マシン構築時に制限することで、ユーザへの SLA を満たすようになると考えられる。ユーザが必要なリソース量を変更(新しいリソースの要求や、リソースの開放を含む)したタイミングで、運用システムは消費電力を最小にする構成を運用決定モジュールにより計算し、必要な仮想マシンのマイグレーションを実行、稼働の必要がなくなった物理サーバの電源を落とし、電力消費量を抑えることを可能とした。

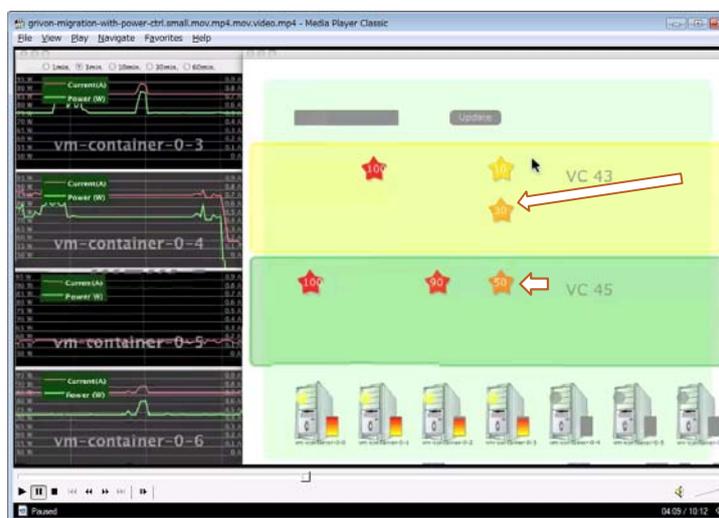


図2 グリッドデータセンター運用管理システムによる配置再編成を示す図。

7台の物理サーバ(vm-container-0-1, 2, ..., 6)上で二つの仮想マシンクラスタ(VC43, VC45)が稼働中。矢印の元にあった仮想マシンを矢印の先の物理サーバに移動し、二つの物理サーバ(vm-container-0-4, 6)の電源を落とした。

＜ULP 情報システムのデザイン＞

平成 20 年度にシナリオプランニング手法で描写した“4つの社会像”のそれぞれにおいて機器の稼働台数を見積もり、さらに技術進展がない(機器それぞれの消費電力量は現在と同等)という仮定を用いて、情報機器の将来の電力消費量を試算した。シナリオ作成では、“不確実性が高く”かつ“社会への影響が大きい”ファクターとして、計算・データ貯蔵資源の分散状態(ローカルか集中か)と、ユビキタスセンサの設置個数(100 億個以上か数億個程度)を選択した。前者のファクターでは、ローカルに資源が分布した場合、ホームサーバーが多くの家庭に普及し、反対に集中した場合、PC がすべてシンクライアント型になり、ネットワーク機器(クラスタールータ、高信頼性ルータ)やサーバー(普及型)の台数が増加するとした。また後者のセンサ数においては、100 億個以上普及した場合は、家庭やオフィス等での個々の EMS(Energy Management System)が統合された SEMS(Social Energy Management System:需要側からのスマートグリッド)社会が実現すると仮定した。この場合、EMS に関連した膨大なデータの処理・分析が必要になるためメインフレームの台数が大幅に増加すると仮定した。各シナリオにおいて、機器台数の増加については、2008 年から 2025 年までに、稼働台数が“2 倍”に増加するケース(年間出荷台数は毎年 25%で伸びる)と“1.5 倍”に増加するケース(同出荷台数の伸びは 10~15%)を想定した。これらの伸びは、最近の 5 年間の出荷台数のデータと比較すると極めて大きい。試算した結果、2025 年のわが国情報機器からの消費電力量は、91~104 TWh であり、2008 年度の 2 倍程度、現状の電力需要量の約 10%となった。試算においては 2025 年での稼働台数を前述のように大きく見積もったにもかかわらず、Green IT Initiative 等(経済産業省)での 2025 年の予測値、240~255 TWh の 1/2 以下となった。仮に 2050 年に 250 TWh(日本の総需要の 1/4)の消費電力を“実現”すると仮定すると、個々の機器の消費電力量の大幅な増加か、新たな情報機器(大きな電力消費)の“出現と急速”な増加が必要となろう。これらの試算および本チームの他のグループで得られた知見をまとめると、IT 機器システムの消費電力削減に関して次のことが言える。

1. 誤った理解

消費電力量の現在および将来にわたる試算には、大きな誤差を含むことを念頭にいれなければならない。言い換えれば、個々の技術の“有用性を訴求”するため恣意的な結果が社会へ発信されやすい(警鐘を鳴らす意味は認めるが)。社会の省エネ対策を効率的に進めるには、このような訴求に惑わされないことが重要である。

2. 無駄は無駄を生む

システム実験グループ等の結果より、計算機資源が活用されていない場合(idle)でも多くの電力を消費する、さらに現在稼働中のデータセンターでの計算機資源の利用率は極めて低いことが示めされている。これは、“計算機資源”の活用のために大きな“無駄”があり、この無駄な電力消費により生み出される“熱”を冷やすために、さらに“無駄”な空調電力が消費されていることを意味する。同様な“無駄”は、ルーターなどでも指摘されている。

3. 逆 U 字型曲線

情報化は、今後も高度化・普及拡大すると予想される。しかし、これが消費電力の増加に必

ずしもつながるとは言えない。規模の拡大とともに技術が向上し(効率が高まり)、エネルギー消費が低下する“環境クズネツ曲線”(逆 U 字型曲線)のように変化する場合もあり得るからである。情報システムの電力消費に多くの“無駄”が含まれていることを考えると(数十%と推定)、これら無駄を排除することにより、2025 年においても、現在と同等な電力消費量(約 50TWh)に留めることも可能であろう。これには、①“idle 状態”における電力消費の削減、②変動する情報トラフィック量に対応して計算機資源を有効活用するためのソフト技術(仮想化)、および③データセンター等における空調の効率化などが重要になる。この内、②および③の対策は、現状の IT システムの運用に大きな修正を求めるものである。これらの実現においては、長期間にわたるビジネスの“経験”を通して培われてきた“安全性”、“信頼性”および“サービス”等のレベルを、“システム運用の改変”を実施しても担保できることを工学的に検証する必要がある。

前述の社会像において、ユビキタスセンサの普及は、社会のエネルギー・マネジメントシステムの形態に大きく影響すると考えた。ユビキタスセンサによる消費電力量の“可視化”により、i) 現状情報機器としてどの程度電力を消費しているのか、ii) 省エネ行動はどのように促進されるのか、および iii) センサの社会普及においてどのような“技術的”および“制度”的な課題があるのか等を明らかにする目的で、社会実証実験を開始した。ユビキタスセンサグループが試作したセンサセット(電流センサ 150 個、受信器 50 台)を用いた業務部門(オフィス、店舗)でのモニタリング実験を開始した。また家庭部門における実験の準備として、対象者を選定するためのスクリーニングを実施した。

<DC 電力モニタリングおよび省エネ施策実証実験>

H21 年度に引き続き、DC のマシンプフロアの温度、IT 機器の消費電力のモニタリングや実地調査を行い、既設 DC の状況把握を進めた。消費電力や温度の変動は大きくなく、IT 機器のリソースは余裕を残して運用されている。

また、空調機によるマシンプフロアの効率的な排熱方法を探るため、ラックの配列、パネルなどによるエアフローの物理的な分離による空調機の冷却負荷の低減を数値シミュレーションにより検討した。マシンプフロアのエアフローをファンの追加や風量の制御のみで理想的な状態にすることは困難であり、経路の分離と圧力のコントロールを主とすることが望ましい。IT ラックが 2 本設置された小規模なマシンルームにおいてエアフロー分離による空調機の消費電力削減の検証を試みた。発熱量に対して冷気供給量・圧力が不十分であったことなどから、消費電力の削減効果の検証はできなかったが、引き続き検証環境を整えて検証を行う予定である。また、風量のコントロールが重要であることから、実際のデータセンターにおける床下からの供給冷気の風速測定のための補助器具を試作し、測定試験を行った。装置の置き方や風速センサの設置方法などに着目し、測定によるばらつきを小さくするための指針を得た。

DC の大幅な省エネを進めるため、エネルギー消費をとまなわない排熱方法を併用するモジュール型 DC の検討を進めた。H20 年度に実施したマシンルームの熱バランスの測定結果の検討をも

とに、模型を使った実験および CFD を用いた数値シミュレーションにより、マシンフロア内部から境界面を介しての外気への熱通過のモデルを検討した。モジュール型 DC への発展を想定した金属平板で囲まれたマシンフロアの排熱に関しては、模型での測定結果に近い温度分布を再現する数値シミュレーションのモデルを得られている。この模型を用いた実スケールでの数値シミュレーションでは、マシンルーム内の温度上昇が大きく、単純な熱通過のみでの排熱による IT 機器の運用は難しいことが確認された。縮小したスケールの模型を使った実測では、フィンによる放熱面の拡大や強制的な空気の循環による排熱量の拡大は確認されたが、数値シミュレーションでの再現方法や実スケールにおける効果の予測などが課題である。内部の暖気流路や境界面とエアフローの関係など、熱通過のモデルの再検討を進めるとともに、自然換気などの他の排熱方法や空調機の併用、DC 群の運用などの組み合わせが省エネ DC 開発の主なターゲットとなる。

ユビキタスセンサの利用による DC の省エネに関しては、既設の DC では無線機器の利用が制限されることから積極的な活用方法の構築には至っていない。空調機から供給される冷氣、IT 機器からの排気など、マシンフロアでは温度とエアフローの関係が強いことから、センサからの温度情報を利用したフロアの状態監視には有効である。既存の DC 運用では、消費電力も温度も変動がそれほど大きくないため、現時点ではユビキタスセンサの有効性は限られるが、パッシブクーリングや IT 機器の ON/OFF を取り入れた DC 運用ではその重要性は高い。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Takahiro Hirofuchi, Hirotaka Ogawa, Hidemoto Nakada, Satoshi Itoh and Satoshi Sekiguchi, A Live Storage Migration Mechanism over WAN for Relocatable Virtual Machine Services on Clouds, International Workshop on Cloud Computing (Cloud 2009), May 2009
2. Takahiro Hirofuchi, Hidemoto Nakada, Hirotaka Ogawa, Satoshi Itoh and Satoshi Sekiguchi, A Live Storage Migration Mechanism over WAN and its Performance Evaluation, Proceedings of the 3rd International Workshop on Virtualization Technologies in Distributed Computing (VTDC2009), pp. 67--74, ACM Publishing, Jun 2009
3. Hidemoto Nakada, Takahiro Hirofuchi, Hirotaka Ogawa, and Satoshi Itoh, Toward Virtual Machine Packing Optimization based on Genetic Algorithm, Distributed Computing, Artificial Intelligence, Bioinformatics, Soft Computing, and Ambient Assisted Living (Proceedings of International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence 2009), pp. 651--654, Springer, Jun 2009
4. 広瀬崇宏, 小川宏高, 中田秀基, 伊藤智, 関口智嗣, 仮想計算機遠隔ライブマイグレーション

のための透過的なストレージ再配置機構, 情報処理学会論文誌:コンピューティングシステム, pp. 152--165, Vol.2, No.SIG2(ACS26), 情報処理学会, Jul 2009

5. 広淵崇宏, 中田秀基, 伊藤智, 関口智嗣, 瞬間的な実行ホスト切り替えを可能とする仮想マシンの高速ライブマイグレーション機構, 日本ソフトウェア科学会研究会資料シリーズ No.62, pp. 57--66, 日本ソフトウェア科学会, インターネットカンファレンス 2009, Oct. 2009

6. Y. Zhang, J. Lu, H. Hiroshima, T. Itoh, R. Maeda, Simulation and design of micro inductor for electromagnetic energy scavenging at low AC frequency in wireless sensor network, Power MEMS 2009, Technical Digest, The 9th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, pp. 253-256, Dec. 2009

7. Dongkeon Lee, Harutaka Mekar, Hiroshi Hiroshima, Sohei Matsumoto, Toshiro Itoh, Masaharu Takahashi, Ryutaro Maeda, 3D UV-microreplication using cylindrical PDMS mold, *Microsystem Technology*, (*in Press*), Accepted Nov. 2009.