

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名: 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

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

前田 龍太郎((独)産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 研究センター長)

主たる共同研究者

伊藤 智((独)産業技術総合研究所情報技術研究部門 研究部門長)

藤本 淳(東京大学先端科学技術研究センター 特任教授)(~平成 23 年 3 月)

((独)産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター 招聘研究員)(平成 23 年 4 月~)

田村 徹也(日本電気(株)エネルギー事業開発本部 シニアマネージャー)

### 3. 研究実施概要

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量やサーバ周辺温湿度環境の“可視化”データを活用し、仮想化技術による計算機資源運用の効率化および自然換気を導入した空調レス化により大幅な省電力化を狙った。

高速なライブマイグレーション技術の開発により可能となった低負荷状態のサーバの停止、および自然換気による排熱の最大限の活用による空調消費電力の削減により、現在主流である PUE=1.5~2.0 の DC に比較して、50%に近い消費電力量削減が可能であることを明らかにした。これらの削減効果は、実運用中のクラウドへの仮想化技術の適用や、実スケールのモジュール型 DC 模型での排熱実験で得られた成果をもとに導出したものである。さらにこれら技術の実用化における“ディペンダビリティ”への懸念は、AI STスーパークラスターで 4 ヶ月間実施した約 100 台のサーバを用いた電源 ON-OFF 繰返しや高温環境下での稼働実験により、ある程度払拭した。また、自然換気による排熱の安全性を高めること、また仮想化技術との組み合わせを考えた場合、サーバ自身の稼働状況や周辺の温湿度変化を細かくモニタリングして、環境を最適に制御する必要がある。この制御に、ユビキタスセンサを用いた。ユビキタスセンサでは、間欠送信により低消費電力化(10  $\mu$ W レベル)を実現したプロトタイプで、大規模な社会実証実験を行い、その実用性を明らかにした。このクランプメータでは、1.5V のボタン電池で 2 年間動作することを、実際のコンビニエンスストア店舗で確認した。この実験の間、センサの改良を進め、最終的には1  $\mu$ W レベルの端末を試作した。通常の無線センサの消費電力は 100  $\mu$ W~1mW のレベルなので、1/100 から 1/1000 の低消費電力化を実現したことになる。これを実用化すれば、10,000 個以上の単位で社会に実装された端末のバッテリー交換は事実上不要となる。

機器単体の消費電力量からビジネス運用(シンクライアント/基幹系)の DC 全体の消費電力量まで計測することで、DC での電力消費構造を、空調等を含めて明らかにした。このデータを基に、本テーマで検討する省エネ対策(仮想化技術、モジュール構造/空調レス)の有効性と、現在から将来にわたる削減貢献目標を 200 億~400 億kWh と定めた。この削減長期目標は、シナリオ・プランニング手法を用いて「2025 年わが国の情報社会像」を描写し、現状のトレンド(機器稼働台数、消費電力等)と整合する形で求めたものである。仮想化技術では、ライブマイグレーションの方法を大きく改善し、負荷増加の予測なしに短時間(従来の数十秒を1秒未満に短縮)で仮想サーバの移動、ストレージデータを含めた移動、および IP アドレスを保持した移動などの技術を開発し、データセンターをまたがった移動も可能とした。これらの技術を用いて、負荷に合わせて運用するサーバ台数を最適化するグリッドデータセンター運用システムを開発し、数台の

システムを用いた試験的な Web サイトに適用し、30%以上の省エネ効果が得られることを確認した。また、DC 電力消費の約半分を占める空調の消費電力削減を目的に、レイアウトの最適配置方法の検討を行い、サーバの暖気と冷気側の隔離により最大空調の 20%程度の削減があることを明らかにした。また、将来の空調レス・データセンターの要素技術として、建て屋壁面からの熱通過や自然換気による排熱の可能性を検討した。自然換気による排熱については、実験設備を用いた計測とともに、実験データに基づいて数値シミュレーションを行い、様々な条件での排気の検討を行い、換気を促進するデータセンターモジュールの設計と、換気による排熱が適用できる限界条件などの知見を得た。換気による排熱では、発熱量や外気温度の変化を把握して適切な排熱モードを選ぶことが必要であり、ユビキタスセンサによる温度や電力(電流)のモニタリングデータを利用したシステムを構築した。自然換気のみで排熱が十分にできない場合、機械換気に切り換える必要があるが、自然換気モードでは排熱に要するエネルギーをゼロにすることができる。

ULP ユビキタスセンサについては、プロトタイプ無線電力センサ端末を数百台規模で開発し、社会実証実験を行った。国内最大のコンビニエンスストアでの実験では、60 店舗実験において、消費電力削減だけでなく売り上げ増加につながる可能性が高く評価された。また、平均消費電力 $1\mu\text{W}$ レベルの無給電型無線センサ端末の開発に成功した。さらに、将来の普及型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に関し、専用のパターンニング装置を開発するとともに、ガラスチューブを基材として用いて銅メッキコイルのパターンニングを行ってから、パーマロイの線材をガラスチューブに通すという製造プロセス・コイル構造を提案し、コイル線幅  $30\mu\text{m}$ 、コイル高さ  $5.6\mu\text{m}$ 、ピッチ  $40\mu\text{m}$  の銅メッキ微小コイル構造を試作することができた。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

情報機器の消費電力と周囲温度を無給電・非接触で測定する無線センサ端末を目指して、ナノインプリント技術を応用したマイクロマシニングによる高効率超小型コイル構造の改良を重ねた結果、消費電力 $1\mu\text{W}$ レベルの無線センサの開発に成功したことは、通常の無線センサの消費電力 $100\mu\text{W}\sim 1\text{mW}$ のレベルに対して $1/100$ から $1/1000$ の低消費電力化を実現したことになる。これは10,000 個以上の単位で社会に実装されるセンサ端末のバッテリー交換を事実上不要とするもので、優れた成果であり、高く評価する。

また、各機器の消費電力と環境の温度・熱流分布を可視化するネットワーク測定システムを開発し、大手コンビニエンスストア国内全店(約14,000 店)へのモニタリングシステムを実装した社会実験へ進展させ、最終年度には米国ハワイ店でのモニタリング実験にまで到達したことは、近い将来米国7500店舗への展開を現実のものとして無線ユビキタスセンサ約10 万個を米国に実装することになり、さらには、グローバルで開発が盛んなスマートグリッド構想等にも大きな影響を与えることが期待され、極めて高く評価できる。

仮想マシンを片寄せして電源を落とすために瞬間的(1秒未満)に実行ホスト切り替える高速ライブマイグレーション機構を開発したグリッドグループの成果については、複数のカンファレンスで論文賞、デモンストレーション賞、最優秀ポスター賞などを受賞しており、高く評価できる。

システム実験グループがユビキタスセンサを用いた換気の切り替えによる排熱を行うことで排熱エネルギーを削減するデータセンターモジュールを実スケールの設備で実証したことについては、社会の情報基盤へのセンサ応用の実用例として一定の評価を与えることができる。

しかしながら、それ以外のグリッドグループやシステム実験グループの成果の新規性・優位性については必ずしも十分には説明されているとは言えない。また、ユビキタスセンサの研究とデータセンター関連の研究との間の意思疎通が必ずしも充分ではなく、研究チーム全体として一体的に研究が遂行されたとは言えない面がある。さらにユビキタスセンサについては、センサーネットワークをどのように構築して、情報を収集・活用するのかなどのインフラ化に向けた研究が必要だと思われる。

研究成果の外部発表に関しては、国内外の論文誌や国際会議で十分な質と量の発表が行われ、新聞発表等の社会への成果発表も行われており、適切と認められる。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

電力センサは技術的に優れた成果であり、それを出発点として社会の情報基盤の核となるデータセンターと情報端末の双方における電力測定の手法を確立し、その結果を社会の低消費電力化に結びつける手法を確立した貢献は高く評価できる。電力センサの大規模展開と、それによって期待される省電力効果は、社会的に大きなインパクトがあり、戦略目標への貢献も大きい。

本領域のプロジェクトに継続してNEDOのファンドにより展開研究が実施されており、すでに、中規模および大規模な社会実験を行って実用化までのシナリオもできているので、実用化に向けた更なる展開が大いに期待できる。CPSなど他の技術との連携を考えて、社会情報基盤の低消費電力化にこの成果をどのように活用して行くかについて、さらなる研究開発を進めてほしい。

#### 4-3. 総合的評価

無給電・非接触の電力センサ開発は科学技術的に優れた成果であり、このセンサを大規模に展開した電力モニタリング実験は社会的に大きなインパクトがある。研究領域の趣旨に照らして十分な成果が得られていると評価できる。今後、社会情報基盤の低消費電力化にこの成果をどのように活用して行くかについて、さらなる研究開発を進めてほしい。

## 記入のポイント