

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300015

研究課題名(和文) ユーザコンテキストに応じた電力管理による省電力コンピューティング環境の研究

研究課題名(英文) Low Power Computing Environment by Adaptive Power Management to User's Context

研究代表者

中村 宏 (NAKAMURA, HIROSHI)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：20212102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：フロントエンド系の情報システムの省電力化を目指す。これらのシステムでは常にユーザからの処理要求があるわけではない。そのため、通常は電源を切断しユーザからの要求に応じて処理に必要な部分を起動すれば電力消費は抑えられるが、その場合、起動に時間を要するため、ユーザの快適さが大きく損なわれる。本研究はこの問題を解決すべく、ユーザと情報システムの間で介在するユーザコンテキストを正確に把握し、ユーザコンテキストに応じてシステムの電力を管理することで、省電力性とユーザの快適性を両立させる手法を研究した。実際に、無線 LAN インタフェース、ディスプレイ、ハードディスクに提案手法を適用しその有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This research aims to reduce power consumption of front-end information systems which serves interactions with users. Users do not always request these systems for processing. It would reduce power consumption if components of those systems are usually powered off unless requested by users. However, it would make users unpleasant because they have to wait until the required components are powered on and get ready for processing. To solve these problems, this research proposes an adaptive power management which recognize user context which exist in the interaction between users and systems. The proposed method realizes adaptive power management by making full use of the above user context. The method is applied to wireless LAN interface, display, and hard disk drives and reveals that it satisfies both reduction of power consumption and comfort of users.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、計算機システム・ネットワーク

キーワード：省電力化 コンピューティング ユーザコンテキスト ユーザ環境 行動計測

1. 研究開始当初の背景

2006年における情報システム機器の消費電力は日本全体の消費電力の約5%に相当し、また2025年にはこの消費電力が5倍になるという予想もある(経済産業省:グリーンITイニシアティブ)。CO₂排出量の削減が全世界的に必要とされており、この消費電力の削減は緊急の課題である。

情報システムは、データセンターなどのユーザとの直接のインタラクションのないバックエンド系と、携帯端末やPCなどのユーザとのインタラクションで処理を行うフロントエンド系がある。後者は常に処理要求があるわけではなく、常に電源を投入している場合の無駄な消費電力の割合は前者に比べてはるかに高い。図1に示すのは、文献より引用した、ある企業のデスクトップ24台の利用状況である。電源はONであるがIdle状態にある時間(図中の青い部分)が約半分もあることを示している。

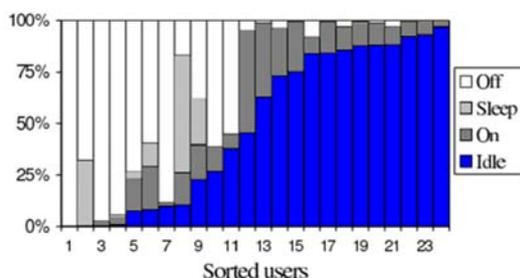


図1: PCの稼働状況例(文献, S. Nedeveschi et al. "Skilled in the art of being idle:reducing energy waste in networked systems", NSDI'09, pp381-394 より引用)

近年はフロントエンド系も消費電力の大きい高性能プロセッサや高性能ネットワークインタフェースを搭載するようになっており、この無駄な消費電力の増大はより深刻な問題になっている。したがって、フロントエンド系の台数が飛躍的に伸びている状況下で、ユーザからの要求に応じて適切な電力管理と省電力化を行うことの重要性が増している。

省電力化の観点からは平時はシステムを停止させ、ユーザからの処理要求時に必要な構成部分を起動するリアクティブな電力管理が効果的であるが、起動に時間を要するためユーザの快適さが大きく損なわれる。設定されたタイムアウト時間以上要求がないとハードウェアの各構成要素を停止させる設定は広く使われているが、ユーザによりあるいは利用状況により適切なタイムアウト時間は異なる。したがって、ユーザがシステムに求めている状況、すなわちユーザと情報システムの間介在するユーザコンテキストを正確に把握し、ユーザコンテキストに応じてプロアクティブにシステムの電力管理をするべきである。また、ハードウェアシステム

は、従来のスループット重視ではなく、インタラクティブな環境下での性能という観点から全体の構成方式を検討すべきである。さらに、プロセス単位で資源管理を行う現在のシステムソフトウェアではプロセスはシステム再開時に復帰されるが、ネットワークのセッションなど外界全体とのインタラクションをとる資源は再開対象ではないため、ユーザにとって快適な電力管理は実現されていない

2. 研究の目的

本研究の目的は、背景で述べた問題を解決し、ユーザコンテキストに応じてハードウェアおよびシステムソフトウェアが協調してシステムの電力管理をすることで、ユーザの快適さを十分に担保しつつ省電力性の高いコンピューティング環境を実現することである。本研究の特色は、ユーザからのインタラクションで処理の実行が開始されるというフロントエンド系の情報システムの特徴に鑑み、ユーザの行動を積極的に計測しモデル化すること、このモデルに基づきユーザの利用状況であるユーザコンテキストを把握すること、そして、このユーザコンテキストに応じてシステムの電力を管理することにある。これにより、ユーザの快適さを十分に担保しつつ、省電力性の高い情報システムを実現することが可能となる。人と情報システムが協調・共生して快適かつ省電力性の高いコンピューティング環境を実現する道筋を明らかにし、さらなる高度情報化の恩恵を享受し続ける持続可能な社会実現への道筋を作ることにも本研究の目的である。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するために、以下の2つを主たる検討項目として研究を行う。

- ・ユーザ行動のモニタリングとユーザコンテキストのモデリング: ユーザのコンテキストとコンテキスト間の遷移関係をモデリングし、構築したモデルに基づく省電力化アルゴリズムを検討する。実際に構築するシステムにおいて電力管理をするコンポーネントにおいて、システムの動作中に生じるリクエストを観測するなど、システムの実行状況との対応がとれ、しかも省電力効果の高いモデリングをする必要がある。
- ・快適で省電力効果の大きいシステム構築: 省電力効果の大きいハードウェアシステムの構築、およびその上で、ユーザコンテキストに応じて電力管理を行うシステムソフトウェアの実装を行う。前項で開発される省電力効果の高い電力管理アルゴリズムを、ハードウェアで実装するのか、システムソフトウェアとして実装するのか、のハードウェア・ソフトウェア協調設計もこの中に含まれる。

情報機器の省電力化が最も進んでいるのはプロセッサである。しかしそれ以外にも、無線LANインタフェース、ディスプレイ、ハードディスクなどさまざまなコンポーネントが多く電力を消費していることが知られている。これらは消費電力の特性や使用頻度も多様であり、一律な制御は難しい。そこで、これらの3つのコンポーネントを取り上げ、それぞれに応じた制御手法の開発を目指した。

4. 研究成果

(1) 無線LANインタフェース

無線LANインタフェースに限らず、電力制御として広く使われている手法はタイムアウトである。これは、あらかじめタイムアウト時間を決めておき、あるコンポーネントがその時間使用されなかったら、当該コンポーネントの電源を落とすものである。一般にタイムアウト時間を短くすれば省電力効果は大きくなるが、ユーザの不快感は増加する。不快感は、利用しようとしたときに当該コンポーネントの電源が落ちていてすぐ利用できない確率であらわせる。

そこで、ネットワークインタフェースへのリクエスト間隔を予測することで、次のリクエストの到着時刻を予測し、その時刻には当該コンポーネントが利用できるように、あらかじめ電源を投入する手法を提案した。この場合、正確にリクエスト間隔を予測することができれば、ユーザの不快感を増やさずに省電力効果を発揮できる。提案する手法を実装し、a) 単純なタイムアウト手法と、b) 提案するリクエスト間隔に基づく電源事前投入手法を比較した。図2に結果を示す。この評価では、予備実験で得られた結果として、リクエスト間隔が指数分布に従うと予測している。

図2では、縦軸が電源を遮断した時間の割合、横軸が、ユーザが利用した時に当該コンポーネントの電源が入っている確率（直感的にはユーザの満足度）である。したがって、当然ながら、できるだけ右上の領域を実現することが望ましい。灰色の菱形が a) を、黄色い四角が b) を表す。この図からわかるように b) のほうが、電源遮断時間を大きく、しかも、ユーザの満足度を高められることが分かった。

次に、ネットワークインタフェースへのリクエストは、ユーザ由来のものと非ユーザ由来のものがあることに着目し、リクエスト間隔予測の精度を上げることを考えた。その結果、リクエスト間隔はユーザ由来と非ユーザ由来で異なることが分かった。また、ユーザの不快感は、ユーザ由来のリクエスト到着時のコンポーネントの状態にのみ依存し、非ユーザ由来のリクエスト到着時には関係ない。そこで、新しい手法として c) ユーザ由来のリクエスト到着時刻のみを予測し、その時刻

には当該コンポーネントが利用できるように、あらかじめ電源を投入する手法、を考案した。その結果は、同じ図2の青い三角で示されている。この図からわかるように、c) のほうが、b) よりも電源遮断時間が長く、しかも、ユーザの満足度を高められることが分かった。

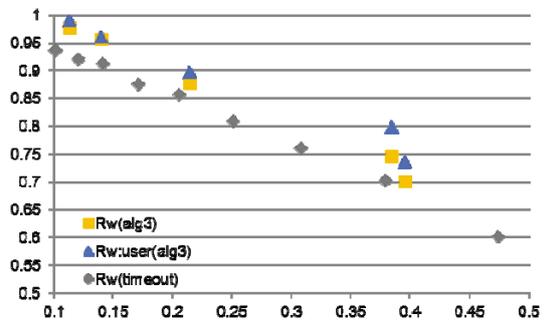


図2：ネットワークインタフェースの電源制御結果（横軸：ユーザの満足度、縦軸：電力削減率）

(2) システム構築

電源制御対象をディスプレイモニターとしたときに、ユーザコンテキストを在室状況ととらえ、オフィスへの入退室イベントに応じコンテキストが変わり、ディスプレイモニターの電源を制御することを考えた。モニターの電源制御は、しばらく入力がない場合にモニターをオフにするタイムアウト制御が良く使われている。タイムアウト制御の問題は、設定するタイムアウト時間を長くするとモニターをオフにできない時間が生じ無駄な電力消費が増えてしまうこと、逆にタイムアウト時間を短くすると、ユーザが作業中であるにもかかわらずモニターがオフになってしまいユーザの快適さが失われることである。ユーザコンテキストが変わるイベントをとらえる機構として、無線センサを用いてユーザの距離を測定し、ユーザがある閾値以上の距離離れた場合にモニターの電源を切る制御を行った。

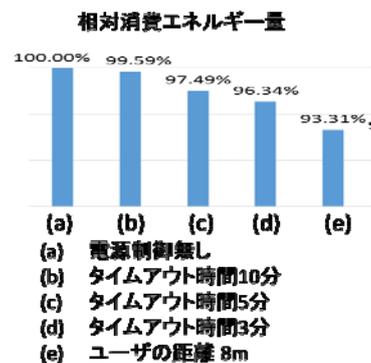


図3：ディスプレイの電源制御結果（縦軸：消費エネルギーの相対値）

この図では、(a)が電源制御をしない場合を表し、(b), (c), (d)の3つがOSによるタイムアウト制御(タイムアウト時間はそれぞれ10分、5分、3分)としている。タイムアウト時間を短くした方が電力は削減できる。これに対し、提案手法は(e)である。距離の閾値を8mに設定し、それよりユーザが離れるとモニターをオフにするものである。この図からわかるように提案手法の(e)が最も電力を削減できる。

次に、距離の閾値を変化させた場合の消費エネルギーとユーザの満足度を評価した。ユーザの満足度はディスプレイの前でユーザが利用しようとしたときにディスプレイがONになっている確率である。その結果を図4に示す。この図の(a), (b), (c)からわかるように、当然ながら、閾値を短くするとエネルギーは削減されるが、ユーザの満足度も下がる傾向がわかる。またこの距離の閾値を固定にするアルゴリズムでは、ユーザの歩く速度、オフィス環境依存の無線強度測定の誤差などの要因によりユーザの快適さが失われることもわかった。これに対し、認識エラーが発生した場合は閾値を長くし、モニターのoff状態が続いた場合には閾値を短くするという適応的閾値制御をした場合の結果を(d)に示す。この結果からわかるように閾値を動的に変化させることで、省電力効果と快適さの両方が改善することが分かった。

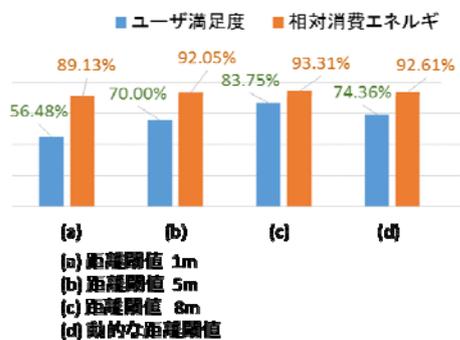


図4 距離閾値を変化させた場合のユーザ満足度と消費エネルギーの関係

(3) 補助記憶装置に着目して以下を実施した。SSD (Solid-State Drive) がHDD (Hard Disk Drive) に比べランダムアクセス性能が高く、省電力であるという特徴を持つが、SSDの容量単価はHDDに比べて高いという欠点を持つ。そこで、SSDをHDDのディスクキャッシュとして用いるSSDディスクキャッシュシステムを想定し、省電力化のためにHDDの電源制御を行う手法を開発した。この制御では、SSDをHDDのディスクキャッシュとして用い、SSD上のディスクキャッシュヒット率が高くHDDをアクセスしないと

きの待機時間を検出し、自動的にHDDをスピンドウンし省電力化を行う。制御の基本は、SSDキャッシュでHDDへのI/Oを削減し、HDDのアイドル時間を長くし、その期間HDDをスピンドウンすることである。しかし、HDDへのI/Oが発生し、HDDをスピンドアップする場合には、ディスクの回転にともなうエネルギーと遅延のペナルティが大きい。エネルギー削減につながるスピンドアウンを行うには、ある一定時間以上、スピンドアウンの状態を維持する必要がある。この時間を損益分岐点(BET: Break-Even Time)と呼ぶ。スピンドアウン時間がBETより長くなるように、SSDディスクキャッシュからHDDへのI/Oがなくなってもすぐにはスピンドアウンを行わずに一定期間(タイムアウト時間)待つようにした。BETはシステムに固有の値であるが、選択すべきタイムアウト時間は、アプリケーション固有の(すなわち処理するコンテキスト固有の)HDDへのアクセス間隔に依存する。そこで、コンテキストごとのプロファイルを採取し、適切なタイムアウト時間を設定した。また、このHDD自動スピンドアウン機構は、device-mapperを介したioctlコマンドインタフェースを用いて、ディスクキャッシュドライバからHDDへのI/O要求数を取得してスピンドアウンをHDDに対し指示する。このHDD自動スピンドアウン機構はユーザ空間で動作するスピンドアウン制御デーモンとして実装した。

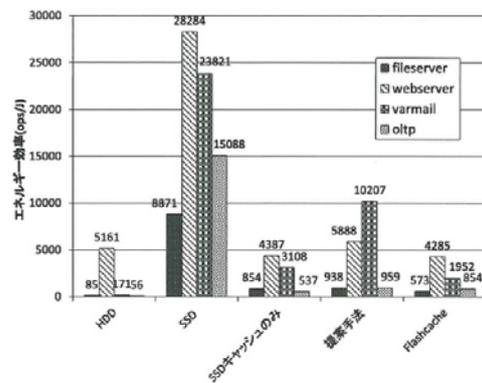


図5 HDD自動スピンドアウンを用いた場合のエネルギー効率

この機構を実装し、file server (ファイルサーバ)、varmail (メールサーバ)、webserver (ウェブサーバ)、oltp (オンライントランザクション処理)の4つのワークロードに適用した結果を図5に示す。左から2番目のSSDは全ての補助記憶をSSDで実装するものでありコスト的な観点からは非現実的であるため、参考のために示すが比較対象とはならない。またもっとも右のFlashcacheは従来研究である。この図からわかるように、提案手法は他の手法よりも高いエネルギー効率を達成できることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

坂本龍一、仁科圭介、佐藤未来子、並木美太郎、”SSD をディスクキャッシュとして利用するディスクシステムの省電力化手法”, 情報処理学会論文誌、査読有、Vol.55, No.4, pp., 2014

[学会発表] (計5件)

- ① 谷本輝夫、佐々木広、三輪忍、中村宏、”メニーコアプロセッサにおける競合とスケラビリティを考慮したスレッドスケジューリング”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-ARC-197, No. 10, pp. 1-7 (2011/11/29) 北海道大学
- ② 渡辺千洋、佐々木広、中村宏、”情報機器の動的電源制御における起動時間隠蔽のためのリクエスト間隔予測手法”, 情報処理学会 第74回全国大会 2012年3月6日 東京工業大学
- ③ 岩澤直弘、薦田登志矢、三輪忍、中田尚、中村宏、ユーザーの快適さを考慮した情報機器の動的電源制御, FIT2012 C-006 (2012/9/4) 法政大学
- ④ Douangchak Sithixay、佐藤未来子、山田浩史、並木美太郎、”消費エネルギー予測に基づいた KVM 仮想化環境における省電力制御の研究”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2013-OS-127, No. 8, pp1-10, (2013/12/3) 芝浦工業大学
- ⑤ T. Cao, M. Kondo, H. Nakamura, ”A Preliminary Study on Energy Saving of Personal ICT Equipment by User Recognition”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-EMB-32, No. 42, pp1-8, (2014/3/16) ICT文化ホール(石垣島)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 宏 (NAKAMURA HIROSHI)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
研究者番号：20212102

(2) 研究分担者

並木 美太郎 (NAMIKI MITARO)
東京農工大学・共生科学技術研究科・教授
研究者番号：10108077

近藤 正章 (KONDO MASAOKI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：30376660

(3) 連携研究者：なし