

家庭における省エネ促進のための電力消費振り返りサービスの実装と評価

井垣 宏[†] 瀬戸 英晴^{††} 福田 将之^{††} 梶本 真佑^{††}
中村 匡秀^{††}

Implementation and Evaluation of a Looking Back Service for Power Consumption Behavior

Hiroshi IGAKI[†], Hideharu SETO^{††}, Masayuki FUKUDA^{††}, Shinsuke MATSUMOTO^{††},
and Masahide NAKAMURA^{††}

あらまし 近年、住宅設備の電化や家電機器の増加・性能向上を要因として、家庭における消費電力量増加が重要課題となっている。家庭内の省エネ実現を目的として、ネットワークに接続された電力センサ等を用いた宅内の消費電力量可視化するサービスが研究・開発されている。実際に消費電力量の可視化によってユーザの省エネ行動を促進することができるという実験結果も現れつつある。一方で、既存サービスのほとんどは宅内の消費電力量のログを可視化するものであり、ユーザの在/不在や室温、照度といった環境状態に基づいた電力の消費結果と消費の原因の因果関係を後から細かく振り返ることを目的としていない。本研究では、HNSにおいて取得可能な様々なログを組み合わせることで、ユーザが日々の電力消費をより細かく振り返ることができる「電力消費振り返りサービス」を提案する。また、提案サービスを実際のホームネットワークシステム上で実装し、有用性を確認するための評価実験を行った。実験により、提案サービスを用いて「電力消費超過」、「サービス提供不能」、「環境状態無視」といった分類でのユーザの電力浪費行動全てを具体的な根拠に基づいて発見することができた。

キーワード 省エネ、消費電力、ホームネットワークシステム、センサ、家電機器

1. ま え が き

住宅設備の電化や家電機器の増加・性能向上に伴い、家庭における消費電力量が近年急激に増大しつつある [1]。震災の影響による計画停電なども相まって、家庭における省エネが重要課題となっている。ホームネットワークシステム (HNS) は、家電機器やセンサを宅内のネットワーク経由で制御・連携できるシステムである。HNS を利用した宅内の消費電力量可視化サービスは次世代の省エネソリューションとして注目を集めている [2]。実際に宅内の消費電力可視化実験では、10~30%もの消費電力が削減された事例が確認さ

れている [3], [4]。

最近では、家単位や部屋単位といった比較的粗い粒度の消費電力量ログだけでなく、スマートタップ [5] などの機器を用いて、家電機器一つひとつの消費電力をリアルタイムに計測し、可視化することが実現されつつある。しかしながらこれらの消費電力量の可視化のみでは、ユーザによって利用されている機器の具体的な制御内容やその制御内容が浪費であるかどうかを判断することは困難である。例えば、室温によってはエアコンの利用が妥当である場合もあればそうでない場合もあることが考えられるが、それらの判断を消費電力量の推移のみで行うのは非常に困難である。

そこで本研究では、HNS において取得可能な様々なログを組み合わせることで、ユーザの日々の電力消費をより細かく振り返ることができる電力消費振り返りサービスを提案する。具体的には、消費電力に加えて、ユーザの機器操作ログや、室温・明るさ等の環境センサログを時系列で組み合わせて可視化することで、

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科, 吹田市
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, 1-5 Yamadaoka, Suita-shi, 565-0871
Japan

^{††} 神戸大学大学院工学研究科, 神戸市
Graduate School of Engineering, Kobe University, 1-1
Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, 657-8501 Japan

ユーザを取り巻く様々な要因と消費電力量との関連の「見える化」を実現する。

我々は提案サービスを実際の HNS 上に実装し、有用性を確認するための評価実験を行った。実験では約 5 か月間のログの蓄積を行い、被験者 6 名による電力消費の振り返りを行ってもらった。その結果、提案サービスを用いることで、電力消費超過、サービス提供不能、環境状態無視といったユーザの電力浪費行動を提案サービスによって指摘することが可能となることが確認できた。既存の消費電力量可視化サービスと比較してより多くの浪費行動を正しい理由付きで検出が可能となることで、よりいっそうの省エネを促進することが可能となると考えている。

以降では、まず、現状の省エネに関連する家電機器や HNS サービスを紹介する。その後、複数のログを利用した電力振り返りとして消費電力ログ・機器操作ログ・環境センサログそれぞれの概要とそれらを統合した電力消費振り返りサービスについて詳述する。更に、具体的な実装内容と評価実験について記述する。

2. 準備

2.1 ホームネットワークシステム

ホームネットワークシステム (HNS) とはテレビやエアコンといった宅内の家電機器や、温度計・照度計といったセンサを家庭内ネットワークに接続し、連携させるシステムである [6], [7]。

多様な機器の連携が可能となることで、ユーザに新しい付加価値を提供することが可能となる。例えば、CS27-HNS [8] では、家電機器やセンサのベンダに関係なく複数の機器がネットワークに接続されており、入退室システムと連動した照明制御や複数機器の組み合わせによる DVD シアターシステムなど多様なサービスが開発されている。

本研究では、このような HNS を対象とした消費電力の可視化とそれに伴う省エネ活動の促進についての提案を行う。

2.2 家庭における消費電力の可視化

住宅設備の電化や家電機器の増加・性能向上を要因として、家庭における消費電力量は急激に増加しつつある。震災による電力供給量不足の影響もあり、家庭における省エネは重要課題となっている。これらの課題を受けて、近年特にエネルギーの節約 (省エネ) が叫ばれており、企業向けを中心とした消費電力可視化ソリューションが数多く開発されている [2]。家庭用と

しては、Google Power Meter [9] やパナソニック電工株式会社の ECO マネシステム [10] のような分電盤単位での消費電力の可視化や、運転時の消費電力をリアルタイムに表示する機能をもったエアコン [11]、スマートタップ [5] といった家電個別の消費電力を可視化する機器やセンサが開発されつつある。

これらの消費電力可視化サービスはユーザの省エネ行動を促進することが可能であることが知られている。実際に Fischer ら [3] の研究では、消費電力の可視化によって 12%程度もの省エネがユーザによって実現されたという結果が表れている。また、Petersen ら [4] の研究によるとリアルタイムに消費される電力を居住者にフィードバックすることで、32%もの省エネが実現されたとされている。このように、消費電力量可視化サービスはユーザに対して電力の浪費を意識させ、省エネ行動を促進する効果をもっている。

2.3 電力浪費行動の分類

ユーザの家庭における省エネを促進するためには、ユーザによる無駄に電力を消費する行動、すなわち電力浪費行動を検出し、削減する必要がある。電力の浪費につながる行動は多様な文献によって紹介されている。我々は財団法人省エネルギーセンターの省エネ大辞典 [12] に掲載されている電力浪費行動を下記のように分類した。

N1: 電力消費超過 特定の家電機器が長時間継続して実行されている場合やユーザの行動によって消費される電力量が過大であるケース。

N2: サービス提供不能 ユーザにサービスが提供できない状態であるにもかかわらず機器機能が実行され続けているケース。

N3: 環境状態無視 ユーザの在/不在、室温、室内の明るさ、湿度といった環境状態を考慮せずに機器機能が実行されているケース。

消費電力を削減するためには、ユーザが利用しない機器を長時間使い続けず、こまめに停止することが望ましい。また、一度に利用される機器機能の数が多くなり、消費される電力が多くなるとそれだけ余裕のある電力供給が必要となり、無駄が大きくなる。N1 はそのような長時間にわたる機器機能利用や過大な消費電力量を伴うユーザ行動を表す無駄分類である。

N2 は対象機器によって実現されるサービスがユーザに対して適切に提供できないにもかかわらず実行されている場合を指す。例えば、家庭用の据え置き型ゲーム機はテレビが実行されていなければゲーム機能

をユーザに対して提供することはできない。すなわち、テレビの電源が OFF の状態でもしゲーム機や DVD Player が実行されていれば、ゲーム機や DVD Player は無駄に実行されていると判断できる。

N3 は必要がないにもかかわらず実行されている無駄な機器機能実行が該当する。例えば、ユーザ不在時のテレビやエアコンの実行、室温が十分に高いあるいは低いにもかかわらず実行されているエアコンなど、通常は機器機能実行時の環境状態によって浪費であるかどうか判断される。

これらの電力浪費行動の一部は既存の消費電力可視化サービスでも判定が可能である。例えば N1 は Google Power Meter のような部屋全体や家全体の消費電力量の推移を見るだけでも、長時間消費電力量が変化しないことにより判断できる。またスマートタップなどにより家電機器ごとの電源 ON/OFF が消費電力量の推移により分かれば、N2 に分類される浪費行動を判別することは可能である。しかしながら、ユーザのどの行動が無駄であるかを N3 の観点において判断するのは既存の消費電力可視化サービスでは困難である。

そこで本研究では、N3 に分類される電力浪費行動をユーザが容易に検出し、省エネ行動をより促進するための電力消費振り返りサービスを提案する。

3. 電力消費振り返りサービス

3.1 アーキテクチャ

既存の消費電力可視化サービスの多くは、消費電力の情報をログとして収集し、そのみを可視化している。そのため、どれだけの電力を現在使っているか(または、過去に使われた消費電力量がどのくらいか)という情報は把握可能である。しかしながら、消費電力ログだけでは、どのような機器の機能が実行されたか、更にはその行動のうちどれが無駄であったのかを必ずしも判断できない。

本研究において我々が提案する電力消費振り返りサービスのアーキテクチャを図 1 に示す。この図が示すように、提案サービスは家電機器ごとの消費電力ログとユーザが行った機器操作ログの収集をまず行う。更に、電力浪費行動の検出を支援するために、ユーザが機器操作を行った際の環境センサログを収集し、他のログと組み合わせて可視化することで、省エネ行動促進のための振り返りを支援する。以降ではこれらのログ情報の詳細と可視化手法の詳細を述べる。

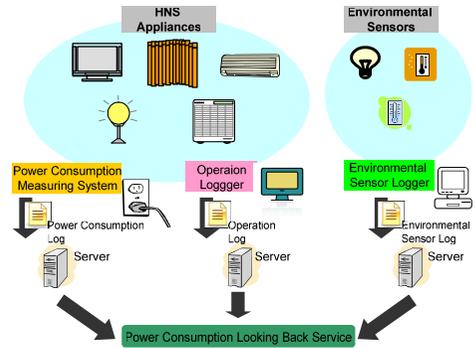


図 1 システムアーキテクチャ
Fig.1 System architecture.

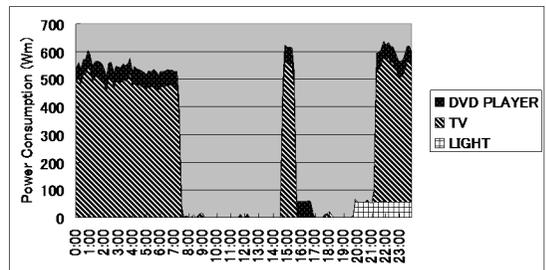


図 2 積み上げ折れ線グラフによる消費電力ログ
Fig.2 Power consumption log by stacking line chart.

3.2 消費電力ログ

消費電力ログとは、HNS 機器ごとの消費電力を一定周期ごとに取得し、時系列データとして記録したものである。本研究では、日時、機器 ID、消費電力 (Wm) からなるフォーマットで保存されている。例として、我々の研究室で開発している CS27-HNS の照明機器から計測された消費電力を示す。

2009-09-26	19:00:05	light1	61.074
2009-09-26	19:00:11	light1	60.958
2009-09-26	19:00:16	light1	60.842
2009-09-26	19:00:22	light1	62.7

我々はこのような消費電力ログを機器ごとに収集し、図 2 に示すような積み上げ折れ線グラフとして可視化を行う。このグラフは横軸が時間軸、縦軸が消費電力を表しており、機器ごとにいつどの程度電力が消費されたかが容易に分かるようになっている。この例では、夜 21 時から翌 7 時まで TV と DVD Player がつけっぱなしであることが分かる。このグラフだけでも、この利用が N1 の観点において無駄であることは推測できる。しかしながら、N3 に該当する、すなわち実際

```
[2009/09/26T11:22:46]:<UserA>:FAN,on
[2009/09/26T11:22:49]:<UserA>:LIGHT,on
[2009/09/26T11:29:07]:<UserA>:CURTAIN,open
[2009/09/26T11:29:14]:<UserA>:AIR_CONDITIONER,on
[2009/09/26T11:33:16]:<UserA>:FAN,off
[2009/09/26T11:47:40]:<UserA>:LIGHT,off
[2009/09/26T13:08:25]:<UserA>:TV,on
[2009/09/26T16:02:30]:<UserA>:AIR_CONDITIONER,off
[2009/09/26T16:31:27]:<UserA>:TV,off
[2009/09/26T17:02:41]:<UserA>:LIGHT,on
[2009/09/26T20:03:00]:<UserA>:TV,on
[2009/09/26T20:03:26]:<UserA>:AIR_CONDITIONER,on
[2009/09/26T23:29:27]:<UserA>:AIR_CONDITIONER,off
[2009/09/26T23:29:30]:<UserA>:LIGHT,setBrightness,8
[2009/09/26T23:29:33]:<UserA>:TV,ch,4
[2009/09/26T23:43:08]:<UserA>:TV,ch,8
[2009/09/26T23:43:10]:<UserA>:AIR_CONDITIONER,on
[2009/09/26T23:43:13]:<UserA>:CURTAIN,close
[2009/09/26T23:43:16]:<UserA>:LIGHT,off
[2009/09/26T23:44:03]:<UserA>:TV,off
```

図3 機器操作ログ
Fig. 3 Appliance operation log.

にユーザが利用していないにもかかわらず実行されているかどうかは分からない。

3.3 機器操作ログ

機器操作ログとは、ユーザが HNS 機器を操作した際のユーザ名と操作内容を記録したものである。すなわち、機器操作ログは、ユーザの HNS における行動を反映した「ライフログ」と考えることができる。このライフログとしての機器操作ログは、家電機器の消費電力と密接に関係がある。

本研究における機器操作ログの形式は「操作日時、操作者、機器名、機器操作名、パラメータ値」となっている。操作日時とはユーザが家電機器を操作した日時、操作者とは家電機器を操作したユーザ、機器名とはユーザによって操作された家電機器名、機器操作名とはユーザが行った家電機器の操作名、パラメータ値とはユーザが機器操作時に必要となる値（例えば、テレビのチャンネル番号や音量など）をそれぞれ表す。図3に機器操作ログの例を示す。

この例では、UserA が 11 時 22 分 46 秒に扇風機の電源を ON にし、11 時 33 分 16 秒に電源を OFF にしていることがログとして記録されている。

機器操作ログが可視化されることで、ユーザの電力浪費行動をより具体的に把握することが可能となる。

3.4 環境センサログ

環境センサログとは、温度や湿度といった HNS 内の環境情報をセンサによって取得し、それらの値を時系列で記録したものを指す。HNS 内の環境状態は、

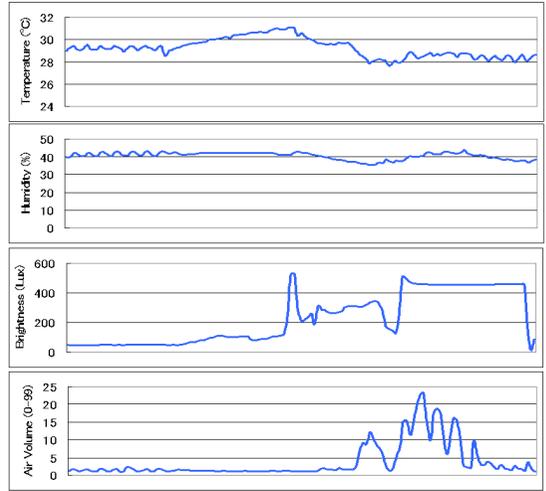


図4 環境センサログ
Fig. 4 Environmental sensor logs.

ユーザによる機器操作を促すきっかけとなる。例えば、「寒くなったから暖房をつけた」や「暗くなったから照明をつけた」というように環境状態の変動によってユーザは機器を操作することがある。そのため、センサによって取得された環境状態は機器操作の理由を裏づける状況情報（コンテキスト）として、非常に有効である。

本研究では、HNS 内に温度センサ、湿度センサ、照度センサ、風量センサ、人感センサを設置し、1分おきに次のようなデータを得た：

温度 (°C), 湿度 (%), 明るさ (Lux), 風量 (0-99), ユーザの在室状況 (true/false)。

例として、9月26日に研究室で実測した環境センサログの一部を以下に示す。

2009-09-26	11:22	31.5	41	65	1	false
2009-09-26	11:23	31	41	506	1	true
2009-09-26	11:24	30.75	41	513	1	true
2009-09-26	11:25	31	41	515	1.8	true
2009-09-26	11:26	31.5	41	509	1.6	true

図4に環境センサログをグラフ化したものを示す。室内の温度と明るさをそれぞれ表すグラフにおいて、6時頃に温度と照度が上昇し始めていることから外が明るくなり始めたことが分かる。

このような環境センサログを消費電力や機器操作ログと組み合わせることによって、ユーザの電力浪費行動を容易に発見できるようになると考えられる。

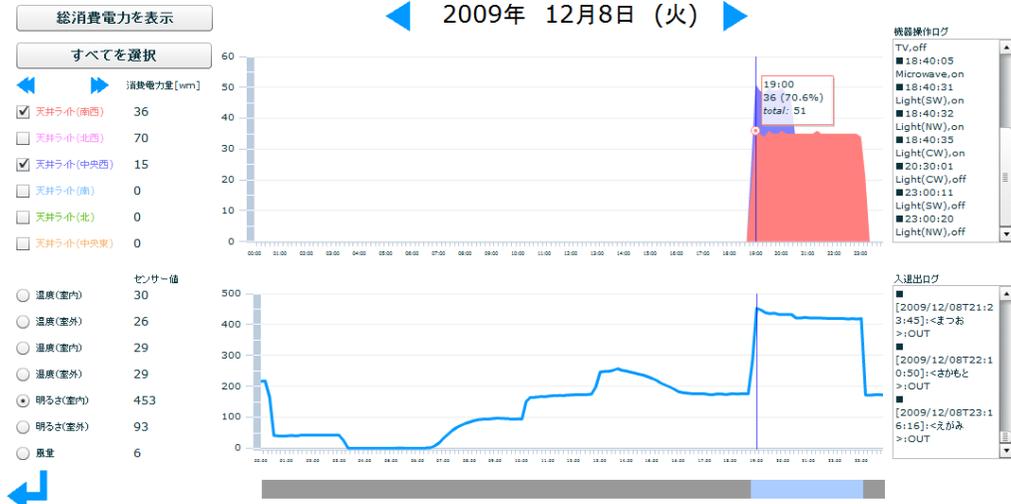


図 5 複数ログのマッシュアップによる電力消費振り返りサービス
 Fig. 5 Mashing up multiple logs for looking back power consumption service.

3.5 複数ログのマッシュアップによる電力消費振り返りサービス

ここまでで述べた三つのログ（消費電力ログ，機器操作ログ，環境センサログ）を日時基準で集約することで，電力浪費行動検出の容易化を目的とした電力消費振り返りサービスを実現する。

図 5 に三つのログを統合した電力消費振り返りサービスの GUI 例を示す。画面上部には消費電力ログ，画面右上には機器操作ログより抽出された機器状態，画面下部には環境センサログ，画面右下には環境センサログより抽出されたユーザの在室状況が表示されている。ユーザは画面左上で表示する機器を選択することができる。また，左下で表示する環境センサログの種類を選択することができる。

このように消費電力ログに機器操作ログを重ね合わせることで消費電力の推移に起因する機器操作内容が把握できる。更に環境センサログを重ね合わせることで，機器操作を行った際の周囲の状況を確認することが可能となる。結果として，複数ログのマッシュアップによって，単体のログを個別に見るよりも確実にユーザの電力浪費行動を確認することができるようになる。

以降では実際の HNS を利用して行った複数のログ収集のための予備実験と，収集したログの可視化による電力浪費行動実験及びその評価について詳述する。

4. 実装

本章では，以降で述べる CS27-HNS に実際に適用した各ログの収集システム及び電力消費振り返りサービスの可視化部の実装内容について詳述する。

4.1 CS27-HNS

CS27-HNS には外部から制御可能な API を備えた以下の家電機器が存在する。

- テレビ：Panasonic VIERA TH-58PZ800
 - エアコン：コロナ CWH-187R
 - フロアライト：Kishima オープス
 - テーブルライト：Kishima オープス
 - 電動カーテン：Resite
 - 加湿空気清浄機：日立 EP-CV60
 - 空気清浄機：PA-QC13-WX（ナチュラルホワイ）エアブリーズ
 - 天井ライト：National HK9392K
 - 扇風機：Pieria メタルリビング扇風機
 - DVD プレイヤー：TOSHIBA HDD/DVD レコーダー「RD-S601」
 - 家庭用ゲーム機：SONY PlayStation3 ECH-2000A（チャコール・ブラック）
 - HDD コンポ：SONY NAS-D500HD（SILVER）
- また，以下の機器は API をもたないため，機器操作ログは取得しないが，消費電力の計測は行う。
- ラックシアター：Panasonic SC-HTR510-K

- 家庭用ゲーム機：任天堂 Wii
- オープンレンジ：SHARP RE-SW10-B
- 冷蔵庫：SHARP SJ-23TM
- PC：0.99 GB RAM, 2.19 GHz, Win XP Pro

4.2 消費電力計測システム

前節で述べた 17 種類, 24 個の家電機器を対象として消費電力計測システムを実装した。

実装にあたり, 回路ごとの消費電力を測定できる分電盤 (パナソニック電工製 ECO マネシステム対応住宅分電盤・コスモパネル・コンパクト 21 BQEL810322S 及びくらし安心ホームパネル S WTZN280K) を導入した。この分電盤の 1 回路につき一つの機器を接続することで, 機器個別の消費電力ログを取得する環境の構築を行った。分電盤によって計測される消費電力を Java プログラム (JDK5 を利用) によって MySQL データベースに 3.2 で述べた形式で記録した。

4.3 機器操作ロガー

我々は機器操作ログを記録するために, 図 6 に示すユーザ認証機能をもった HNS 機器操作インタフェースを開発した。HNS 機器操作インタフェースは Adobe Flex SDK 3.0 を用いて開発されている。

このインタフェースを利用して家電機器を操作する際には, ユーザはまずドロップダウンリストから自分の名前を選び, 目的の家電のカテゴリーをタブで選択する。その後, 操作する家電アイコンに付随する機器操作ボタンをタッチすることで機器操作が行われる。HNS 機器操作インタフェースは, ユーザによるボタン操作が起こるたびにその操作内容を機器操作ログとして 3.3 で述べた形式で MySQL データベースに記録する。

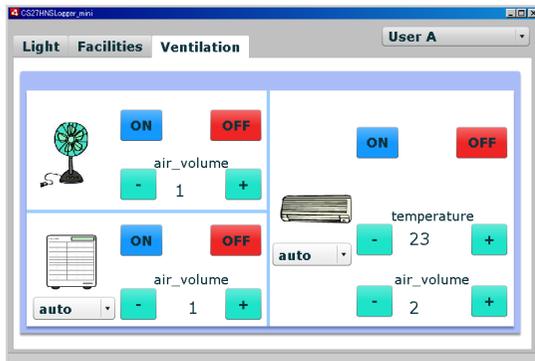


図 6 HNS 機器操作インタフェース
Fig. 6 HNS operation interface.

4.4 環境センサロガー

環境センサログを取得するために下記センサを対象としてログを残すプログラムを Perl5 で開発した。CS27-HNS におけるセンサを以下に示す。

- Phidget 社の各種センサー (TemperatureSensor, LightSensor, Humidity Sensor) [13]
- ITWatchDogs の Wxgoos (温度計, 湿度計, 照度計, 風量計含む) [14]

ロガーはそれぞれのセンサの値を 1 分ごとに取得し, 3.4 で述べた形式で MySQL データベースに記録を行う。

また, ユーザの入退室状況を管理するための入退室管理システムを開発した。入退室管理システムは PhidgetRFID Kit, Phidget MotionSensor [13] を利用し, Java (JDK5) を用いて実装されている。我々の入退室管理システムでは, ユーザは入退室を行う際に RFID リーダーに各自の RFID タグをかざす。なお, 入退室の際にユーザが RFID タグをかざし忘れることがあるため, MotionSensor を利用してかざし忘れがあった場合に警告音を鳴らす仕組みを実装した。

4.5 電力消費振り返りサービス GUI

電力消費振り返りサービスの GUI 部は MySQL データベースに保存された消費電力ログ, 機器操作ログ, 環境センサログを集約し, 可視化を行う。我々は本 GUI を Adobe Flex SDK3.0 を用いて開発した。

電力消費振り返りサービスは年間消費電力量表示画面, 月間消費電力量表示画面, 及び 1 日の消費電力量表示画面から構成される。年間消費電力量表示画面は図 7 に示すように, 月ごとの消費電力量の合計値と電気代を 1 年分 1 画面で表示する。この画面で月を選択すると, 図 8 に示す月間消費電力量表示画面が現れる。月間消費電力量表示画面は, 1 か月の消費電力量を日単位の折れ線グラフで表示すると同時に, 最も電

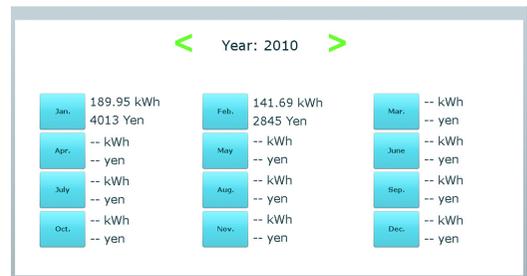


図 7 年間消費電力量表示画面
Fig. 7 Screen of power consumption a year.



図 8 月間消費電力量表示画面

Fig. 8 Screen of power consumption a month.

力が消費された日と消費電力が最も少なかった日を表示する。ユーザはこの画面から任意の日付を選択することで、図 5 で示す複数ログがマッシュアップされた 1 日の消費電力量表示画面を見ることができる。

図 5 の GUI は七つのエリアから構成されている。左上に、家電機器選択エリア、画面上部中央に消費電力ロググラフ表示エリア、右上に機器操作ログ表示エリア、左下に環境センサ選択エリア、下部中央に環境センサロググラフ表示エリア、右下にユーザの在室状況ログ表示エリアが表示される。画面最下部には在室状況表示エリアがあり、このエリアは室内に人が一人でも存在するとその時間帯のバーの色を青く表示する。

消費電力ロググラフの横軸は時刻、縦軸は消費電力量 (Wm) をそれぞれ表している。家電機器選択エリアにおいて、ユーザが消費電力量を表示したい家電機器にチェックを入れることで、選択された機器の消費電力が右側のグラフエリアに表示される。グラフは積み上げ面グラフとなっているため、選択された機器全てが同一のグラフに表示される。これにより、ユーザは家電機器間での消費電力量を比較することが可能となっている。

環境センサロググラフの横軸は時刻、縦軸は環境センサ値をそれぞれ表している。ユーザが環境センサ選択エリアにおいて任意の環境センサ名を選択することで、選択された環境センサのみが右側に折れ線グラフとして表示される。

これら二つのグラフはグラフ内の任意の点がクリックできるようになっている。ユーザが任意の点をクリックすると、その点の時刻における全ての家電機器ごとの消費電力量及び全ての環境センサ値が家電機器選択エリア及び環境センサ選択エリアにそれぞれ表示される。

図 5 の画面例では、2009 年 12 月 8 日の天井ライト

(南西) 及び天井ライト (中央西) の消費電力量と明るさ (室内) の環境センサ値がそれぞれ表示されている。更に、19 時 00 分の点がクリックされており、その時刻に計測された消費電力量と環境センサ値がそれぞれ家電機器選択エリア及び環境センサ選択エリアに表示されている。消費電力量に関して、天井ライト (南西) は 36 Wm, 天井ライト (北西) は 70 Wm, 天井ライト (中央西) は 15 Wm, その他の機器は全て 0 Wm であり、これら六つの機器の合計値は 121 Wm であったことが分かる。また、環境センサ値に関して、温度 (室内) は 30°C, 温度 (室外) は 26°C, 湿度 (室内) と湿度 (室外) はともに 29%, 明るさ (室内) は 453 Lux, 明るさ (室外) は 93, 風量は 6 であったことが分かる。また、在室状況表示エリアは、18 時半頃~23 時 15 分頃までユーザが在室していたことを示している。

5. 評価実験

電力消費振り返りサービスを CS27-HNS に実際に適用し、電力浪費行動を検出できるかを評価する実験を行った。本章では、ログ収集のための予備実験と予備実験により収集されたログを利用した振り返りサービスによる電力浪費行動検出実験について詳述する。

5.1 予備実験：ログ蓄積実験

まず、サービスで利用するための 3 種類のログ (消費電力ログ, 環境センサログ, 機器操作ログ) を収集する実験を行った。実験では、ユーザ 1 名に 2009 年 9 月 9 日から 2010 年 1 月 31 日までの約 5 か月間の間 CS27-HNS で生活してもらった。その結果、サービス評価に利用可能なログとして、消費電力ログ 145 日分 (2.94 MByte), 機器操作ログ 116 日分 (115 kByte), 環境センサログ 132 日分 (24.7 MByte) が得られた。

5.2 本実験：電力消費振り返り実験

開発した電力消費振り返りサービスを被験者 6 名に使用してもらい、ログ蓄積実験で行われた電力消費を実際に振り返ってもらう実験を行った。サービスの有用性を評価する上では、振り返りによって「電力浪費行動とそれが浪費であると判断できる理由をどれだけ発見できるか」に着目する。実験においては、従来型の可視化サービスと提案サービスとの差を測るため、以下の 3 種類の振り返りタスクを設定した。

T1：従来法 1 (総消費電力のみによる振り返り) 全家電機器の総消費電力のログのみを用いて振り返りを行う。**2.2** で述べた従来型の消費電力可視化サービ

表 1 評価実験におけるタスク割当
Table 1 Task assignment of evaluation experiment.

	12/5	12/6	12/7	12/8	12/16	12/19
P1, P2	T1	T2	T3	T1	T2	T3
P3, P4	T2	T3	T1	T2	T3	T1
P5, P6	T3	T1	T2	T3	T1	T2

ス (Google Power Meter サービス等) に相当する。
T2: 従来法 2 (機器ごと消費電力ログを用いた振り返り) 個別家電機器ごとの消費電力ログを用いて振り返りを行う。従来のスマートタップなどを用いた消費電力可視化サービスに相当する。

T3: 提案法 (電力消費振り返りサービスによる振り返り) 個別家電機器ごとの消費電力ログ, 機器操作ログ, 環境センサログを用いて振り返りを行う。提案手法による振り返りサービスである。

実験では, 6 人の被験者 (P1, P2, P3, P4, P5, P6) に参加してもらった。なお, 予備実験のユーザはこの被験者には含まれていない。それぞれの被験者には 5 か月のログから抜き出したおよそ同数の無駄行動が含まれる日付 (2009 年の 12/5, 6, 7, 8, 16, 19) 6 日分を対象に T1~T3 の異なる振り返りタスクによって一人ずつ実施してもらった。被験者ごとのタスク割当は表 1 に示すとおりである。例えば, 被験者 P1 及び P2 には 12/5 を対象に T1 (従来法 1) のタスクを, 12/6 を対象に T2 (従来法 2) のタスクを個別に行ってもらった。

実験開始前には家庭の省エネ大辞典 [12] を全ての被験者に 1 時間ほどで読んでもらい, 電力浪費行動についての知識をもってもらった。その後, 実験対象の各日分を対象に, 指定された振り返りタスクを実行してもらった。全ての振り返りタスク実行では, 図 5 の画面あるいはその一部を利用した。タスク T1 では, 全家電機器の合計消費電力量を表示させた図 5 の消費電力ロググラフのみを被験者に見せた。タスク T2 では, 消費電力ロググラフだけでなく, 図 5 の上半分の領域全てを被験者に提示し, 家電機器選択も自由に行えるようにした。タスク T3 では, 図 5 の全画面を被験者に提示し, 家電機器選択や環境センサ選択が自由に行える状態で実験を行った。なお, 一人の被験者につき 6 回タスクを実行してもらったが, 各タスク実施前には毎回 10 分の GUI 説明と練習を行った。

各タスク実行時に被験者に指摘してもらった内容は下記のとおりである。

A1 (無駄な機器機能操作): ユーザが実行している家電機器機能のうち無駄だと被験者が考えるものを指摘

表 2 指摘された浪費行動数 (分類 N1)
Table 2 Number of energy-wasting behaviors found (Category N1).

	12/5	12/6	12/7	12/8	12/16	12/19	Total
T1: 従来法 1	2	2	1	2	2	2	11
T2: 従来法 2	1	7	5	2	4	2	21
T3: 提案法	1	5	4	2	5	3	20

表 3 指摘された浪費行動数 (分類 N2)
Table 3 Number of energy-wasting behaviors found (Category N2).

	12/5	12/6	12/7	12/8	12/16	12/19	Total
T1: 従来法 1	0	0	0	0	0	0	0
T2: 従来法 2	4	3	8	4	2	2	23
T3: 提案法	2	3	3	2 (1)	6	2	18 (1)

する。ただし, T1 (従来法 1) においては A1 は指摘していない。また, T2 (従来法 2) においても具体的な機器操作を指摘することは不可能であるため, 無駄である機器のみを指摘してもらう形式にした。

A2 (時間範囲): 被験者が無駄だと思ふ機器機能が実行されている時間の範囲。

A3 (無駄理由): 被験者が無駄だと判断した理由。
ここで, 電力浪費行動を識別するために, 家庭の省エネ大辞典を参考に下記の判断基準を全被験者に提示した。

- つけっぱなしであると判断する時間は 8 時間
- 電力量が過大であると判断する電力は 1000 Wmin
- 室温は 20°C, 湿度は 50%, 照度は 400 lx あれば十分であるものとする。

以上の実験によって被験者が A1~A3 の組合せをいくつ指摘したかを数えた。

5.3 実験結果

12/5~12/19 までの浪費行動分類ごとの実験結果を表 2~表 4 に示す。今回の実験では, 同じ日の同じタスクを 2 名の被験者が別々に行っているため, 表にはその合計が記されている。また, 全結果の合計を表 5 に示す。なお, 特に提案法では, 特定の電力浪費行動が複数の浪費行動分類に適合すると指摘されるものがあった。その場合は, N1, N2, N3 の順で後に適合するものとして浪費行動の数をカウントした。すなわち, N2 と N3 の両方として被験者が特定の浪費行動を指摘した場合, それは N3 に相当するものとしてカウントしている。

表 2~表 5 の縦軸はタスク名, 横軸は日付を示している。表 2 は N1 (電力消費超過) の実験結果を示し

表 4 指摘された浪費行動数 (分類 N3)

Table 4 Number of energy-wasting behaviors found (Category N3).

	12/5	12/6	12/7	12/8	12/16	12/19	Total
T1: 従来法 1	0	0	0	0	0	0	0
T2: 従来法 2	0	0	0	0	0	0	0
T3: 提案法	3	3	3	6	9	6	30

表 5 手法ごとの指摘浪費行動数

Table 5 Number of wasted power consumption behavior per looking back service.

従来法 1	従来法 2	提案法
11	44	68

ている。この結果が示すように、従来法 2 と提案法では指摘数が変わらず、従来法 1 での浪費行動検出数が最も少なくなっている。これは、特定の機器が長時間利用されていることを特定するためには機器ごとの消費電力量を知る必要があるためである。

表 3 に示す N2 (サービス提供不能) に相当する浪費行動の指摘数では、検出数は従来法 2 が最も多く、提案法がそれに継いでおり、従来法 1 では 0 となっている。従来法 1 では、機器ごとの動作状況が分からないため、N2 の検出は事実上不可能である。一方従来法 2 では、正確な機器の動作状況が分からずとも、対象機器の電源状態が消費電力量により推測できるため、N2 が指摘できた。また、従来法 2 の方が提案法よりも多く浪費行動を指摘できているが、これは、N3 に相当する電力浪費行動の一部が N2 や N1 として検出されていることに起因する。例えば、PS3 と TV を利用していたユーザが退室時に TV のみを OFF にしていったようなケースで、T3 では N3 と判断され、T2 では N2 と判断されていた。

表 4 では N3 (環境状態無視) に相当する浪費行動の指摘数が示されている。この結果から分かるように、環境状態を考慮したユーザの機器操作妥当性については、提案法でしか指摘ができない。

表 2~表 4 により、T1 では N1 を、T2 では N1 と N2 を T3 では全ての無駄分類を被験者が検出できていることが分かる。表 5 からは、提案法による浪費行動指摘数が最も多いことが確認できる。

また、全体的に消費電力の少ない一部の照明や扇風機といった機器に関する浪費行動は積み上げ折れ線グラフではほとんど目立たないため、指摘の対象となることがほとんどなかった。

更に本実験では、各被験者が無駄を指摘するのに要

表 6 手法ごとの平均電力浪費行動指摘時間 (秒)

Table 6 Average time for indicating wasted power consumption behaviors per looking back service.

	N1	N2	N3
T1: 従来法 1	23.7	—	—
T2: 従来法 2	26.5	34.1	—
T3: 提案法	38.6	41.2	50.2

した時間を計測した。具体的には、実験開始後、被験者が浪費行動を指摘するたびにそのときの時刻を記録しておき、個別の浪費行動を検出するのに要した時間を測定した。表 6 において、本実験において被験者が N1, N2, N3 の各浪費行動 1 件を指摘する際に、平均してどの程度の時間 (秒) を要したかを示した。この表では、同種の浪費行動であろうと、T1, T2, T3 の順に、すなわちタスクにおいて提示される情報量が多くなるごとに、浪費行動の指摘に要する時間が 2.8~7.2 秒増加していることが分かる。この結果から、ユーザに浪費行動を指摘してもらう際には、検出してほしい浪費行動の種別ごとに提示する情報を削減する手法が有効であると考えられる。

5.4 振り返り実験の効果

実験後に行った自由記述形式のアンケートでは、「家電機器の待機電力の大きさに驚いた」、というものや「天井ライトを全てつけたときの消費電力量が分かったので、これからは過度につけすぎないようにしたい」といったように、被験者の省エネ意識の改善が一部に見られた。一方で、「一つの画面に表示されるデータが多く、どこを見ればよいか分かりづらい」といったものや「機器操作ログや入退室ログがそのまま羅列されているので、振り返る際に他のデータとの照合が難しい」といった意見も見られた。この点については、浪費行動と思われるものをある程度自動的に UI が指摘したり、注目すべき箇所を強調して表示したりといった形で振り返りサービスの改善を今後進めていく予定である。実際に一部の浪費行動を検出する仕組みについての研究を現在進めている [15]。

5.5 従来法と提案法の比較

N1~N3 の各分類を被験者が検出する際、同じ分類に属する浪費行動であっても、タスク T1~T3 によってその判断基準となる情報が異なっている場合と共通している場合があった。まず T1 では、判断基準が総消費電力のみであるため、消費電力の推移と時刻を確認している被験者が多かった。例えば、長い時間同じ

消費電力のままのときに、特定の家電機器が点いたままになっていると判断し、N1と評価した事例が多く含まれていた。

T2の場合、多くの被験者がまず総消費電力から、長時間若しくは消費電力量の大きい時間帯に着目していた。更に、その時間帯に実行されている家電機器群の中にN2である機器組合せが含まれるかを確認し、最後にN1に該当するかを調査している事例が散見された。

T3では、T2と同様に総消費電力にまず着目するという事例と、ユーザの在室状況を最初に確認した後総消費電力を確認するという事例が多く含まれていた。前者の事例では、総消費電力を確認後に消費電力量の大きい特定の家電機器に着目する。その後、照明であれば明るさといったその家電機器と関連のあるセンサ値やユーザの在/不在状況を確認し、N3やN2に相当する浪費行動を検出していた。後者の事例では、ユーザが不在の時間帯を最初に確認し、その時間帯に電力を消費している家電機器が存在しないかどうかを検査することで、N3に相当する浪費行動を検出し、その後N1及びN2を検出するケースが多くなっていた。

また、本実験における唯一の事例として、N2であるにもかかわらずT2のタスクでは検出が困難なものも12/8のT3において確認された。この事例では、ユーザはTVで地上波放送を鑑賞しており、同時にPS3の電源が入ったままであった。PS3を正常に実行するためには、TVのビデオ入力をPS3に合わせる必要がある。そのため、この事例におけるPS3の実行は電力浪費行動であるといえる。この浪費行動は2.3で述べた浪費行動分類ではN2に相当する。しかしながら、機器の消費電力量のみでビデオ入力の状態が分からないため、この浪費行動を手動で検出することはほぼ不可能である。そこで我々は分類N2を細分化し、消費電力のみで判断できる浪費行動(N2-1)と消費電力だけでなく機器の状態が必要な浪費行動(N2-2)に分けた。以上により、既存の消費電力量可視化サービスと提案サービスで検出可能な電力浪費行動分類は表7に示すようになる。

また、従来法1,2において、5件の指摘ミスが発生した。これはその行動が行われた付帯状況を被験者が勝手に推測した結果、間違っただけのものがほとんどであった。例えば、時刻が深夜であったために人が居ないあるいは睡眠中であると推測し、浪費行動であると判断してしまった事例が存在した。一方提案法では、全て

表7 電力浪費行動分類

Table 7 Classification of wasted power consumption behaviors.

	N1	N2-1	N2-2	N3
全消費電力	○			
機器毎消費電力	○	○		
提案システム	○	○	○	○

の付帯状況が環境センサログと機器操作ログで明示されているため、このような指摘ミスは1件もなかった。この意味で提案法はより正確な振り返りが実行できると考えられる。

以上の結果より、長時間あるいは消費電力量が過度に大きいようなケースや、ユーザが不在であるにもかかわらず電力が消費されているようなケースにおいて、その内容を強調表示するといった可視化が無駄検出の初期段階において有効であると考えられる。更に、家電機器ごとの消費電力を表示する際に、本実験の被験者が着目した事例から、その家電機器と関係のある他の家電機器の動作状態やセンサ値を、連携して表示することによって、より容易にN2, N3に相当する浪費行動の検知が容易になると考えている。

5.6 関連研究

センサや複数の家電機器を組み合わせて新しいサービスを提供するHNS環境は多く提案されている。[16]～[19]は、HNSの基盤としての機能に焦点を当て、センサや家電機器の組合せによるアプリケーション開発を支援することを主たる目的としている。そのため、本論文で述べた電力浪費行動の発見や振り返り支援手法までを考慮したアプリケーションをこれらの基盤上に構築することは可能だと思われるが、現状ではその点についての評価は行われていない。

[20]は、事前に設定された九つの省エネ行動がユーザによって実行されているかを家電機器ごとの消費電力と複数のセンサから判断するシステムを提案している。このシステムはユーザが実行できなかった省エネ行動を検知し、その内容をユーザに提示することができる。一方で、我々の提案手法では、ユーザの行動を消費電力とセンサだけでなく、機器操作ログと環境センサの併用によって判断しているため、より高い精度で分類N2, N3の浪費行動が発見できる。また、我々の手法は事前の想定による固定的な省エネ行動の振り返りではなく、ユーザ自身による浪費行動の振り返りとそれによる発見を支援することを目的としているという点が既存手法と異なっているといえる。

6. む す び

本論文では、HNS を対象とし、ユーザの電力浪費行動の検出を支援する電力消費振り返りサービスを提案した。具体的には、ユーザによる機器の操作ログ、センサより得られる環境情報、機器より得られる機器状態を、消費電力の推移に重ね合わせ三つのログの統合を行うことで、ユーザを取り巻く様々な要因と消費電力の関連の「見える化」を実現した。そして、提案サービスを実際の HNS 上に実装し、有用性を確認するための実験を行った。その結果、環境センサや機器操作ログが無ければ検出できない電力浪費行動の多くを、提案システムを利用することで検出可能であることが確認できた。今後は、見やすさの向上だけでなく、本サービスの利用を振り返りだけにとどまらず、システムによる自動振り返りサービスやより見やすい UI を備えた新たな付加価値サービスの提案を行っていきたいと考えている。

謝辞 この研究の一部は、科学技術研究費（基盤研究 B 23300009, 若手研究 B 21700077, 研究活動スタート支援 22800042）、及び、ひょうご科学技術協会の助成を受けて行われている。

文 献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部, 電力需給の概要 2009, 中和出版, 2010.
- [2] 株式会社岡村製作所, “OfficeNavi,” http://www.okamura.co.jp/product/work/office_navi/index.html
- [3] C. Fischer, “Feedback on household electricity consumption: A tool for saving energy?,” *Energy Efficiency*, vol.1, pp.79–104, Feb. 2008.
- [4] J.E. Petersen, V. Shunturov, K. Janda, G. Platt, and K. Weinberger, “Dormitory residents reduce electricity consumption when exposed to real-time visual feedback and incentives,” *Int. J. Sustainability in Higher Education*, vol.8, no.1, pp.16–33, 2007.
- [5] 塚本昌彦, 加藤丈和, “エネルギーの情報化—IT による電力マネジメント: 2. スマートタップの共通仕様化に向けて,” *情報処理*, vol.51, no.8, pp.934–942, Aug. 2010.
- [6] パナソニック電工株式会社, “ライフイニティ,” <http://denko.panasonic.biz/Ebox/kahs/>
- [7] 東芝ホームアプライアンス株式会社, “Feminity,” http://www3.toshiba.co.jp/feminity/index_j.html
- [8] M. Nakamura, A. Tanaka, H. Igaki, H. Tamada, and K.-I. Matsumoto, “Constructing home network systems and integrated services using legacy home appliances and Web services,” *Int. J. Web Services Research*, vol.5, no.1, pp.82–98, 2008.
- [9] Google Inc., “Google Power Meter,” <http://www.google.org/powermeter/>

- [10] パナソニック電工株式会社, “エコマネシステム,” <http://denko.panasonic.biz/Ebox/densetsu/lifinity/eco/>
- [11] 東芝キャリア株式会社, “東芝エアコン大清快,” http://www.toshiba.co.jp/living/air_conditioners/
- [12] 財団法人省エネルギーセンター, “家庭の省エネ大辞典,” <http://www.eccj.or.jp/index.html>
- [13] S. Greenberg and C. Fitchett, “Phidgets: Easy development of physical interfaces through physical widgets,” *Proc. 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST’01)*, pp.209–218, 2001.
- [14] ITWatchDogs, “WeatherGoose,” <http://www.itwatchdogs.com/>
- [15] 北岡賢人, 瀬戸英晴, 裕本真佑, 中村匡秀, “ホームネットワークシステムにおける機器状態ログからのエネルギー浪費行動の検出,” *信学技報*, LOIS2010-71, March 2011.
- [16] 山崎達也, 沢田篤史, 西村俊和, 高岡真則, 多鹿陽介, 美濃導彦, “分散協調型ホームネットワークサービス構築基盤,” *情報通信研究機構季報*, vol.53, no.3, pp.135–144, Sept. 2007.
- [17] S. Helal, M. William, H. El-Zabadani, J. King, Y. Kaddoura, and E. Jansen, “The gator tech smart house: A programmable pervasive space,” *Computer*, vol.38, no.3, pp.50–60, March 2005.
- [18] 和田佑二郎, 井垣 宏, 井上亮文, 星 徹, “多様な可視化アプリケーションとの連携を考慮した消費電力量取得 api の設計,” 第 73 回情報処理学会全国大会, vol.2W-6, pp.261–262, March 2011.
- [19] 志水 裕, “消費エネルギー抑制ホームネットワーク技術の研究開発,” http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/pdf/100825.15.pdf
- [20] 小林敬介, 塚原みな, 徳舛 彰, 奥山弘祐, 齋藤孝平, 中内靖, “ユビキタスセンサによる電力の見える化システムの開発,” *情処学研報*, vol.2010-UBI-27, no.23, pp.1–6, July 2010.

付 録

本付録において、5.2 で行った実験中に提案サービスを用いて被験者に指摘された浪費行動の一覧を示す。ただし、重複した指摘内容は省略している。

分類 N1 に属する浪費行動例

- エアコンが一日中つけっぱなし
- PC が一日中つけっぱなし
- 家庭用ゲーム機 (PS3) が一日中つけっぱなし
- 家庭用ゲーム機 2 台, テレビを含む複数機器が同時に点いており, 消費電力が過大になっている (他の時間帯でも同様の指摘あり)
- 加湿空気清浄機: 一日中つけっぱなし

N1 (電力消費超過) では, 上記のように長時間特定の機器がつけっぱなしになっている場合や, 総消費電力量が大きくなっている時間帯と機器が指摘されていた。

分類 N2 に属する浪費行動例

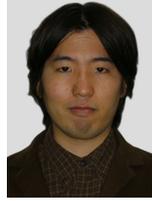
- DVD プレイヤーと家庭用ゲーム機 (PS3) が同時に使用されていた。
- TV が OFF であるにもかかわらず、家庭用ゲーム機 (PS3) の電源が入っていた。
- TV が OFF であるにもかかわらず、家庭用ゲーム機 (Wii) の電源が入っていた。
- TV で家庭用ゲーム機 (Wii) が表示されているにもかかわらず、家庭用ゲーム機 (PS3) の電源が入っていた。
- TV が OFF であるにもかかわらず、DVD プレイヤーが再生されていた。
- TV で地上波放送が表示されているにもかかわらず、家庭用ゲーム機 (Wii) の電源が入っていた。
- DVD プレイヤーと家庭用ゲーム機 (Wii) が同時に実行されていた。

分類 N2 の浪費行動では、TV を利用する機器の無駄な操作を指摘するものが大半であった。

分類 N3 に属する浪費行動例

- 湿度が十分高いにもかかわらず、加湿空気清浄機の加湿機能が実行されていた
- 十分明るいにもかかわらず、天井ライトが一点いていた。
- 十分明るいにもかかわらず、天井ライトが二点いていた。
- 室温が十分に高いにもかかわらず、エアコンの暖房機能が使われていた。
- ユーザが不在であるにもかかわらず、テレビがついたままだった。
- ユーザが不在であるにもかかわらず、家庭用ゲーム機 (PS3) がついたままだった。
- ユーザが不在であるにもかかわらず、家庭用ゲーム機 (Wii) がついたままだった。
- ユーザが不在であるにもかかわらず、PC がついたままだった。
- ユーザが不在であるにもかかわらず、加湿空気清浄機がついたままだった。
- ユーザが不在であるにもかかわらず、HDD コンボがついたままだった。

(平成 23 年 6 月 30 日受付, 11 月 7 日再受付)



井垣 宏 (正員)

平 12 神戸大・工・電気電子卒。平 14 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程了。平 17 同大学院博士後期課程了。同年同大学院特任助手。平 18 南山大学数理情報学部講師。平 19 神戸大学大学院工学研究科特命助教。平 22 東京工科大学コンピュータサイエンス学部助教。平 23 大阪大学大学院情報科学研究科特任准教授。博士 (工学)。ソフトウェア工学教育、サービス指向アーキテクチャ、ホームネットワークシステム、Web サービス、ソフトウェアプロセス等の研究に従事。IEEE, ACM, IPSJ 各会員。



瀬戸 英晴

平 22 神戸大・工卒。平 24 同大大学院システム情報学研究科博士前期課程修了予定。ホームネットワークシステム、特にログデータを活用した付加価値サービスに興味をもつ。



福田 将之

平 20 神戸大・工卒。平 22 神戸大学大学院工学研究科博士前期課程了。現在パナソニック電気インフォメーションシステムズ (株) に勤務。ホームネットワークシステム、特にログデータを活用した付加価値サービスに興味をもつ。



裕本 真佑 (正員)

平 18 京都産業大・理卒。平 21 日本学術振興会特別研究員 (DC2)。平 22 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程了。同年神戸大学大学院システム情報学研究科特命助教。博士 (工学)。エンピリカルソフトウェア工学、特にソフトウェアメトリックスの研究に従事。情報処理学会、IEEE, ACM 各会員。



中村 匡秀 (正員)

平 6 阪大・基礎工・情報工学卒。平 11 同大大学院博士後期課程了。平 12 同大学サイバメディアセンター助手。平 14 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。平 19 神戸大学大学院工学研究科准教授。平 22 同大学大学院システム情報学研究科准教授。博士 (工学)。サービス・クラウドコンピューティング、ライフログ、ホームネットワーク、ソフトウェア工学の研究に従事。IEEE, ACM, 情報処理学会各会員。