

細粒度電力センシングによる浪費電力の検出

上田 泰嵩^{†1} 梶 克彦^{†1} 河口 信夫^{†1}

近年、省エネルギーへの関心が高まってきているが、実際に省エネ活動が盛んに行われているとは言い難い。省エネ行動を継続してもらう方法の一つとして電力可視化が行われているが、削減可能な電力を示さなければどこを削減すれば良いのか分からず、省エネをするのは難しいと考えられる。本論文では、個別の電気機器用の小型電力センサを用いて機器の消費電力を計測することにより、機器の消費電力量の内訳を明確にし、削減可能な浪費の発生箇所を把握出来る様にするを目的とする。実験として、機器の浪費電力を検出・生じた原因ごとに分類するために、どのような方法や特徴量を使用すれば良いのか調査した。浪費電力の検出と分類によって削減可能な浪費電力を明確に示すことで、無駄を削減できる箇所と方法を機器使用者に認識してもらうことができ、長期間省エネ行動を実行してもらうことを図る。

Detection of Waste Power with Fine-grained Power Sensing

YASUTAKA UEDA,^{†1} KATSUHIKO KAJI^{†1}
and NOBUO KAWAGUCHI^{†1}

Recently, the conservation of energy activity is not necessarily actually done though the concern for energy conservation has risen. It is difficult to understand where to be reduced, and to do conservation of energy if the electric power that can be reduced is not shown though the visible making of the electric power is done as one of the methods of continuing the conservation of energy action. In this thesis, it aims to clarify the breakdown of the amount of power consumption of the equipment, and to understand the generation part of the waste that can be reduced. I examine what method and the amount of characteristic to be used in order to detect and classify the waste electric power of the equipment by the measurement of the power consumption of the equipment with a small electric power sensor for an individual electric equipment. It is aimed at for the equipment user to recognize the part and the method of reducing waste and to execute the conservation of energy action for a long term by clearly showing the waste electric power that can be reduced by detecting and classifying the waste electric power.

1. はじめに

近年、省エネルギーへの関心が高まりつつある。2009・2010年度に「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法)を改正した「改正省エネ法」が施行されたり、より身近なところではエコポイント制度やエコカー補助金制度が設けられる等、人々が省エネを意識したり省エネ活動をしやすい環境が整ってきている。

しかし現状では、実際に省エネ活動が広く行われているとは言い難い。最近の国内の最終エネルギー消費量は横ばい傾向にあるものの、電力の消費量の割合は増加している。これを部門別にみた場合、産業・運輸部門では減少しているのに対し、民生部門で増加傾向が見られる¹⁾。民生部門のうち業務部門では、企業はエネルギーコスト削減や改正省エネ法遵守の為に自ら省エネに努めており、ここ数年でエネルギー消費量に減少傾向が見られる。しかし家庭部門では、世帯数の増加や情報機器の増大等により家庭での電力需要が高まっているにも関わらず、省エネを意識する機会や実行する意欲が無いと実行しづらいため、省エネに努める人がいても部門全体としての電力消費量は増加している。家庭部門における電力消費の増加を抑える為には、各家庭での省エネ行動が重要となる。

部門全体で消費電力量を抑えるには、省エネに関心が無い人にも省エネ行動を継続してもらうことが不可欠である。省エネ行動を長期間にわたって継続してもらうためには、まず省エネを意識してもらうこと、また実際に省エネ行動をしようと思う動機・要因が必要である。

省エネを意識させる方法の一つに電力可視化がある。電力可視化は、普段意識しない消費電力等の情報を数字等客観的に判断できる指標で把握できるようにする取り組みを指す。家庭で利用できる例として省エネナビ²⁾、エコワット³⁾、Google PowerMeter⁴⁾等が挙げられる。ただし、これらの取り組みによって長期間継続して省電力を達成できるかどうかは分からない。例えば省エネナビを使った実証実験⁵⁾によると、省エネナビを設置後、1年目の消費電力量の削減量は大きいですが、設置後3年目以降は再び消費電力量が増加し始める傾向があることが分かる。この理由として、(i)設置当初は目新しいので省エネに努めるが、長期間継続すると省エネ意識が低くなる (ii)消費電力量の削減余地が減少する (iii)消費電力量の内訳が分からないので、削減可能箇所・方法が分からない、等が挙げられる。この問題を解決することにより、長期間省エネを継続する動機・要因になると考えられる。

^{†1} 名古屋大学工学研究科
School of Engineering, Nagoya University

本論文は (iii) に注目し、消費電力量の内訳を明確にすることで無駄の削減可能箇所を示し、省エネを実行し易くすることを目的とする。細粒度電力センシング（後述）により詳細な電力データを収集し、削減可能な浪費電力の検出と浪費発生状況の分類を行う。削減可能な浪費電力を明確に示すことが出来れば、無駄を削減できる箇所と方法を機器使用者に認識してもらうことができ、省エネ行動を実行し易くなる。

2. 細粒度電力センシング

消費電力量の内訳を知り、削減可能な無駄な消費電力を見つけるには、詳細な電力情報を収集する必要がある。電力可視化の例で挙げた既存の電力計システムは、計測単位がブレーカーの回路ごとであったり、計測時間の間隔が秒単位ではなかったりと、計測の粒度が荒い。これでは、得られる情報は浪費電力検出に十分であるとは言えない。それらの問題点を考慮した電力センサを使用することにより、細かい粒度での電力情報取得（細粒度電力センシング）が可能となる。

2.1 既存の電力計システムの問題点

電力可視化の例で挙げた電力計システムから考えられる問題点を挙げると、(i) 電力計測対象の単位が荒い (ii) 計測時間の間隔が荒い (iii) 電力情報の提示部がセンサに付いている、がある。

(i) は、電力計測部を家庭の分電盤に取り付けるタイプのシステムに当てはまる問題で、家庭の合計消費電力量は分かるが機器単位の細かい内訳が分からない。これでは浪費が生じた箇所や原因を知ることが出来ない。

(ii) は、電力計測の時間の最小単位が「分」や「時間」というシステムに当てはまる問題で、細かい消費電力の変動を知ることが出来ない。これでは (i) と同様、浪費が生じた原因を知ることが出来ない。

(iii) は、電力センサにより得られる情報を知るためにはセンサの設置場所まで行く必要があり、各機器にセンサを取り付けると数が多すぎて電力情報を確かめるのが困難になるという問題である。

2.2 細粒度電力センサ

前節で述べた問題点を解消する細粒度電力センサ（図 1）を試作した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本センサは次の特徴を備える。

(i) 機器単位・コンセント単位の計測

コンセント単位で計測可能なことにより機器個別の消費電力変化を知ることができ、機器使



図 1 細粒度電力センサ
Fig. 1 Fine-grained Watt Meter

用者は消費電力の増減がどの機器で起こったのか判別できる。それによって省エネ可能な機器を判別できる。

(ii) 秒単位での計測

秒単位で計測可能なことにより消費電力が急に変化した場合の情報も取得できる。機器使用者はいつ、どんな行動をした時に消費電力の変化があったのかを知ることができ、何が原因で消費電力が変動したのか反省することができる。

(iii) 無線でセンサから情報を送信

データ処理・提示部がセンサ設置場所から離れても良いように、情報収集のネットワークは無線とした。本センサでは無線規格に Bluetooth を採用している。

この細粒度電力センサは機器とコンセントの間に挟んで使用する。毎秒計測した電力データを、Bluetooth を通じてデータ収集サーバに保存する。毎秒得られるデータは〈電力センサ ID, 電流 [A], 電圧 [V], 電力 [W]〉である。

本論文ではこの細粒度電力センサを用いて機器の電力計測を行い、機器の浪費電力の検出・分類を行うためのデータを収集した。

3. 浪費電力の検出・分類の提案

現在、電力可視化で提示される情報は主に消費電力や消費電力量（または換算された電気料金）である。この中で特に電気料金は節約意識を高める効果が期待できる。しかしこの情報だけでは消費電力が増減する原因が分からず、どの機器をどのように使用すれば省電力できるのか、またはそれ以上省電力はできないのかが分からない。削減可能な電力が分かって初めて省エネ行動を実行できるようになる。そこで、消費電力のうちで無駄に消費した「浪費

電力」を検出し、浪費が発生した時の機器の動作状態を分類することにより、どの行動を変えれば省電力に有効であるか把握でき、省エネを実行し易くなる。

3.1 浪費電力の定義

電気機器を使用する時には必ず電力を消費する。冷蔵庫やタイマー付き機器等の常時電力供給が必要な機器や、使用者が意図して機器を使う場合の消費電力は、有効に利用された電力である。逆に、テレビをつけたまま寝てしまったり照明を消し忘れたり、使用者が意図せず余分に消費した電力は無駄に消費された電力である。

本論文では、これら無駄に消費された電力のうち、確実に浪費だと断定できる分を浪費電力と定義する。普段電気機器を使用していて確実に浪費だと言える状況を考えると、

- (i) 待機電力：コンセントに接続された機器が、電源が切れた状態の時（待機時）に消費する電力
- (ii) 非利用時の消費電力：動作中の機器の機能が十分に利用されていない時に生じる消費電力

がある。これら機器の機能が有効に利用されていない時に消費した電力のことを浪費電力とする。

3.2 浪費電力の検出・分類

本節では、今回行った浪費電力の検出・分類について述べる。

3.2.1 浪費検出対象機器の選定

本論文では次の理由から、浪費検出対象の機器に PC を選定した。(i) 使用中に消費電力が頻繁に変化する為、細粒度電力センサの特長を活かした電力データを収集できる。(ii) 機器の取り得る動作状態が多く、他の機器に比べて動作状態の分類が困難だと予想され、PC で浪費分類が上手く出来れば他の機器でも可能である。(iii) 電源をオンにしたまま長時間席を離れる人が多く、定義した浪費が生じやすい。

これ以降、浪費電力の検出と浪費発生時の動作状態分類は PC を想定して述べる。

3.2.2 浪費発生状況の分類

PC が取りうる動作状態を 3.1 節で定義した浪費電力に合わせて考えると、(i) 作業中 (ii) アイドル状態 (数十秒以上の間入力操作なし) (iii) ディスプレイ電源オフ (iv) スタンバイ/休止状態 (スリープ) (v) PC 電源オフ (vi) コンセントからプラグを抜いた状態、に分類することが出来る。このうち (ii) ~ (iv) は「非利用時の消費電力」、(v) は「待機電力」でいずれも浪費電力とし、(i) と (vi) は浪費が生じていない状態とする。

ただし、(ii) については時間のかかる処理をしている場合には入力操作は無いが電力消費

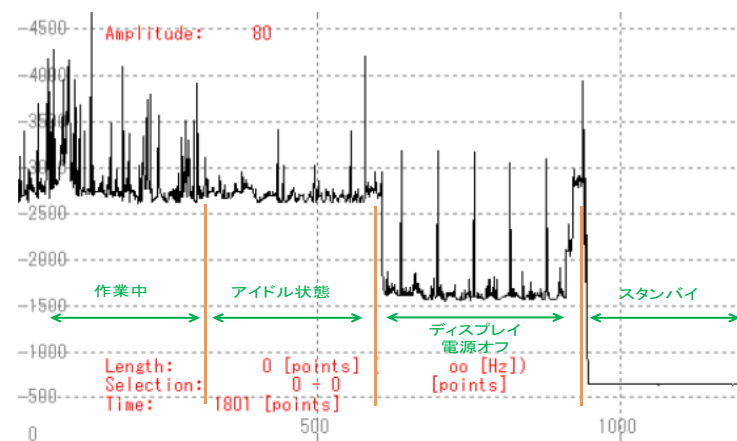


図 2 電力波形と動作状態の例

Fig. 2 An example of power corrugate and operation state

は必要であったり、(vi) についてはノート PC ならバッテリーで浪費が生じる可能性があったりと多様な状況が考えられるが、これらを考慮した場合に分類が複雑になるのを避ける為、今回は上記の様な単純な分類にとどめた。

4. 実験

この章では、細粒度電力センサを用いて PC の電力データを収集して行った浪費電力の分類に関する実験とその結果について述べる。

細粒度電力センサを用いて得られる電力波形の例を図 2 に示す。

この図に見られる様な PC の動作状態の違いを分類する方法として、どのようなクラス分類器やデータの特徴量を使用すればより正しく分類できるのかを知るため、収集した電力データから得られる特徴量の組み合わせがどのように分類の正解率に影響するのかを調べる実験を行った。手順は以下の通り。

4.1 実験手順

(1) データ収集対象の機器に DELL の LatitudeD530 を 2 台、富士通の FMV-A8270 を 1 台の計 3 台を使用した。この各 PC を 3.2.2 節で定義した動作状態 6 つを全て含むように

(i) から (vi) の順に 5 分間ずつ動作状態を変化させ、計 30 分間データを収集した。電力データは 1 秒ごとに得られるため 1 台の PC につき約 1800 秒分のデータが得られる。その毎秒のデータに 6 つの動作状態に対応したラベルを手動で付与し、クラス分類器出力の正解を用意した。

(2) 毎秒の動作状態の違いを識別して分類する際に、クラス分類器に与える属性 (特徴量) を用意した。PC の動作状態の違いに平均消費電力値や消費電力値の変化頻度が影響すると予想し、特徴量には「電力値、5/10/15/20 秒間の移動平均値、電力値の変化値 (微分)、5/10/15/20 秒間の移動平均値の微分、電力値の 2 階微分」を用意し、毎秒の動作状態のラベルと併せて CSV ファイルに記述した。このファイルをクラス分類器に与えるデータセットとして用いる。

(3) データマイニング用フリーツール Weka⁸⁾ を使用し、(2) の PC3 台分の CSV ファイルに対して 5 種類のクラス分類器「J48、RandomForest、MultiBoostAB.J48、KStar、IBk(k=3)」（後述）を用いて、与える特徴量の組み合わせを変えて動作状態分類の正解率の変動を調べた。各クラス分類器に対し、用意した特徴量一つ一つを使うか使わないかで条件を変え、全組み合わせで分類の正解率を求めた。クラス分類器の動作途中で、10 分割交差検定法で分類モデルの精度を評価するようにした。正解率は、(付与したラベル通りに分類されたデータ数) ÷ (全データ数) × 100 とした。

ここで、実験に使用した各クラス分類器について簡単に述べる。

(1) J48 : Quinlan の C4.5 という決定木生成アルゴリズムを Weka に実装したもの。ゲイン比と呼ばれる値を分岐基準に用いる。

(2) RandomForest : ブートストラップという方法でサブデータを生成し、各サブデータセットの決定木を組み合わせる方法を用いた決定木生成アルゴリズム。Breiman により提案された。

(3) MultiBoostAB.J48 : AdaBoost という、弱い学習機をまとめることで強い学習機を実現する方法の拡張版を J48 に適用したもの。

(4) KStar : Instance-based learners(事例を基礎にする機械学習機) で、既に分類されているインスタンス (今回は 1 秒分のデータセット) と比較することにより新しいインスタンスを分類する。比較の結果、類似するインスタンスは類似するクラスに分類されるという仮定を立てる。

(5) IBk(k=3) : K 近傍法を Weka に実装したもの。あるインスタンスの分類は、特徴空間における最も近い k 個のインスタンス群の投票により決定される。今回は k=3 に設定した。

4.2 結果

実験結果を表 1 に示す。特徴量のうち、正解率に影響しなかったものは省略した。

表 1 結果 : クラス分類器毎で最も正解率が高い特徴量の組み合わせ

Table 1 Result : Combination of amount of characteristics whose accuracy rate is the highest in each classifier

データを収集した機器名	使用したクラス分類器	クラス分類器に使用した特徴量					正解率 (正解データ数)
		電力 P	移動平均 M	電力の微分 P'	移動平均の微分 M'	電力の 2 階微分 P''	
富士通 FMV-A8270	J48		20	×	5,10,15,20	×	93.77% (1671/1782)
	RandomForest		5,10,15,20	×	5,10,15	×	94.61% (1686/1782)
	MultiBoostAB.J48		5,10,15,20	×	5,10,15,20		94.50% (1684/1782)
	KStar		20	×	×	×	92.70% (1652/1782)
	IBk(k=3)		5,10,15,20	×	5,10,15,20	×	92.65% (1651/1782)
DELL Latitude D530-A	J48		5,10,15,20	×	×	×	88.55% (1578/1782)
	RandomForest		5,10,15,20	×	×	×	90.52% (1613/1782)
	MultiBoostAB.J48		5,10,15,20	×	×	×	90.52% (1613/1782)
	KStar		5,10,15,20	×	×	×	87.15% (1553/1782)
	IBk(k=3)		5,10,15,20	×	×	×	88.10% (1570/1782)
DELL Latitude D530-B	J48		20	×	×	×	99.27% (1769/1782)
	RandomForest		5,10,15,20		×		99.49% (1773/1782)
	MultiBoostAB.J48		5,10,15,20	×	5,10,15,20	×	99.55% (1774/1782)
	KStar		5,10,15,20		×	×	99.27% (1769/1782)
	IBk(k=3)		10	×	×	×	99.49% (1773/1782)

注 : 表中の × は特徴量をクラス分類器に与えたか否か、数値は移動平均のデータ数を表す

実験結果から、クラス分類器に与える特徴量としては電力、移動平均があれば 9 割程度の正解率は得られることが分かる。また、電力値の微分、2 階微分は与えない方が正解率は高くなった。クラス分類器としては、適切な特徴量を与えればどれも精度に大差はないが、正解率の総合で見ると RandomForest が最も良く、分類速度については J48 が最も早かった。2 台

の Latitude D530 の正解率の差については、B のデータは動作状態の違いによる平均消費電力値の違いが明確だったため、「電力値」や「移動平均」を使って容易に正しい分類が出来たと考えられる。

4.3 考 察

実験結果から、電力値・移動平均値等の消費電力値から求まる特徴量を与えれば、ほぼ正しく状態を分類できることが分かった。分類誤りについては、主な分類誤りの要因は「作業中」と「アイドル状態」の識別ミスによるものだった。これは図 2 を見れば分かるように、消費電力値だけでは識別することが困難であることによる。それを考慮して微分や 2 階微分など電力値変化の頻度の判断に使用できると考えた特徴量を用意したが、分類への影響はほとんど無かった。また、J48 による出力結果の決定木を見ると、初めの分岐条件に 20 秒間の移動平均値が使用されることが多かった。つまり、動作状態は電力値を見ればほぼ識別できるということが言える。しかし、分類誤りの原因である「作業中」と「アイドル状態」の識別に関しては、より明確に識別できる特徴量を与える必要があった。

5. ま と め

今回、長期間省エネを継続してもらうための方法として、細粒度電力センシングによる詳細なデータ取得を通して浪費電力の検出と浪費発生時の動作状態の分類をすることを考えた。またその実現のためには、どのようなクラス分類器や特徴量を使用すれば分類正解率が高くなるのかを調べた。今回与えた特徴量の範囲では、電力値や移動平均値等、閾値で PC の動作状態を判断できるものが良いという結果になったが、分類誤りが多い「作業中」と「アイドル状態」等の識別については別の特徴量を考える必要があることが分かった。

今後はこれらの点を踏まえ、浪費検出・分類の仕組みを実際に利用できる様にするのが課題となる。浪費分類結果を利用して省電力を実施してもらうには、削減可能な浪費電力がリアルタイムに検出・分類されることが望ましい。そのために動作状態のラベル付けが可能なデータで機械学習をし、リアルタイム検出に利用できる様にする仕組みを作る必要がある。また、今回は PC のみを浪費検出対象に選定したが、他の電気機器でも同様に浪費分類ができることが課題である。

参 考 文 献

1) (財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編:EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2009年版), (財)省エネルギーセンター(2009).

- 2) (財)省エネルギーセンター:省エネナビ.
<http://www.eccj.or.jp/navi/index.html>, (参照 2010-04-20).
- 3) (株)エネゲート:エコワット.
<http://www.enegate.co.jp/products/eco/eco01.html>, (参照 2010-04-20).
- 4) Google.org:Google PowerMeter.
<http://www.google.com/powermeter/about/about.html>, (参照 2010-04-20).
- 5) 独立財団法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 エネルギー対策推進部:省エネルギー設備等導入促進情報公開対策等事業「住宅におけるエネルギー使用に係る実態調査及び情報提供事業」2006 事業内容紹介, pp.2-8, pp.3-3(2006).
http://www.nedo.go.jp/informations/events/181004/1_2006.pdf, (参照 2010-04-20).
- 6) Kawaguchi Nobuo:Small-sized Power Senser and Wireless Display for Fine-grained Measurement and Presentation, R'09 Twin World Congress Poster session(2009).
- 7) 上田泰嵩, 小川延宏, 河口信夫, 片山正昭:省エネ意識向上を目指した細粒度電力センシング・提示システムの構築, 電気学会通信研究会, CMN-10-007(2010).
- 8) The University of Waikato:Weka.
<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>, (参照 2010-05-10).