

学習アルゴリズムを用いたコンセントによる待機電力の削減

Cutting Standby Power by Using the Plug with Learning Algorithm

天野 賢二† 森 雅智‡ 金沢 貴俊‡

Kenji Amano Masato Mori Takatoshi Kanazawa

斉藤 匡人‡ 間 博人‡ 徳田 英幸†

Masato Saito Hiroto Aida Hideyuki Tokuda

1. はじめに

近年、環境改善を目的とした取り組みとして、家庭の消費電力削減に対する取り組みが活発化している。家庭の年間消費電力量に対する待機電力の割合は比較的高く、平成20年度の統計データによると、一世帯あたりの年間消費電力のうち待機電力が占める割合は6.0%にあたる[1]。過去の統計データと比較すると、平成15年度は6.6%、平成17年度は7.3%と大きな変動が見られないことから、待機電力を大幅に削減する取り組みがないことがわかる。

待機電力削減の根本的な課題として、家電機器には、待機電力を削減することによって機能が損なわれるテレビ、DVDレコーダーなどの機器と、待機状態の必要性が低いにも関わらず待機電力を消費している充電器、電子レンジといった機器の2種類があることが挙げられる。本論文ではこれらの機器をそれぞれ、前者は待機家電、後者は非待機家電と呼ぶこととする。待機家電において待機電力を自動的に、かつ無条件で削減することは、機器の機能性を損なわせる可能性を有しているため、ユーザの利便性を著しく低下させる原因となる。また、手動で待機電力を削減することを目的とした商品は既に数多くあるが[2]、これらの商品の多くは手元スイッチの手動ON/OFFにより待機電力を削減している。そのため、わずらわしい、消し忘れるといったことから、やはりユーザの利便性を低下させてしまい、結果的に待機電力の削減に対する効果が薄くなってしまおうといった問題を抱えている。

これらの問題を解決するため、本論文では学習アルゴリ

ズムを用いたコンセントを開発し、ユーザが頻繁に待機電力をOFFしたプラグのみの電力供給を操作することで、ユーザが意識することなく、特定のプラグのみ待機電力を削減する学習コンセントを提案する。これにより、前述した2種類の機器のうち、非待機家電は自動で切断し、待機家電は継続して電力を供給することで、待機電力の削減とユーザの利便性の双方を確保することができる。学習コンセントではON/OFFの履歴に基づきON/OFFのタイミングを学習し、ON/OFFを行うイベントテーブルを作成する。この学習データを時刻学習データと呼ぶ。さらに、ユーザが家の中にいるかどうかを検知し、ユーザの位置状態と家電の状態を比較したデータも学習要素に用いた。この学習データを位置学習データと呼ぶ。時刻学習データおよび位置学習データという二つの学習データを用いてON/OFFの制御を行うことにより、ユーザの生活に合わせて待機電力の削減を自動で行うことが可能になる。

本論文では、学習コンセントにおいて、時間、ユーザの位置情報、家電の電力量というデータを使用し、前述した二つの学習データを用いた待機電力を削減するためのアルゴリズムの実装を行った。その上で、一般家庭における動作実験、ならびに学習コンセントを用いた場合の待機電力量削減効果の評価を行う。

2. 既存研究

待機電力を自動的に削減する手法として、既にいくつかのシステムが提案されている。明山らの提案する待機電力削減手法[3]では、多機能コンセントを用いてスケジューリングにより待機電力のON/OFFを行っている。この手法では、ユーザのライフスタイルに合わせてスケジューラ

† 慶應義塾大学 環境情報学部

‡ 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

を変更することができるため、毎日ほぼ決まった時刻の間使用する家電機器には非常に有効である。しかし、使用時間がまちまちな家電や、突発的なスケジュールの変更の際には、スケジューラをその都度変更しなくてはならず、ユーザの利便性を低下させてしまう問題がある。

また、近年では、家電機器の電力波形パターン認識による機器識別手法が提案されている[4,5,6]。1節で述べたように、待機電力の削減には家電機器の分類が問題となっているため、家電機器の自動識別は待機電力の削減に大きな効果をもたらすと期待できる。しかし、既存の識別手法は電力波形の解析にPCを用いており、解析に用いるPCで発生する消費電力量のオーバーヘッドが節約できる電力量を上回るため、待機電力削減のための手法には適していない。

そこで我々の提案するコンセントでは、ユーザが待機電力を削減した時刻を記録し、学習データとして蓄積することで、ユーザの行動特性に合わせて自動スケジューリングを行う。そのため、ユーザがスケジュールの変更を意図的に行う必要がなく、待機電力を意識することなく消費電力を削減することができる。また非待機家電の場合、タイマー動作などの自動制御による稼働が行われないため、ユーザが家電と同一の場所にいる場合のみ稼働していると考えられ、ユーザの位置状態によって待機電力をON/OFFする機構を作成した。これにより、ユーザが家の中にいない場合はスケジューリングによる動作を行わず、無駄な待機電力を削減することが可能になる。また、学習コンセントは複雑な解析を行わないため、マイコン上で全ての動作を行うことができ、削減できる待機電力量を測定機器の電力量を上回ることはいない。

3. 機器構成

本節では学習コンセントの機器実装、およびシステム設計を述べる。学習コンセントは電力供給の自動制御が可能な機器構成であること、待機電力が測定可能な機器構成であること、また学習データを機器に反映できる構成であることが機器の機能要件として挙げられる。

図1に機器の構成図を示す。学習コンセントでは、電流センサにより家電が使用する電力量を計測し、学習モジュ

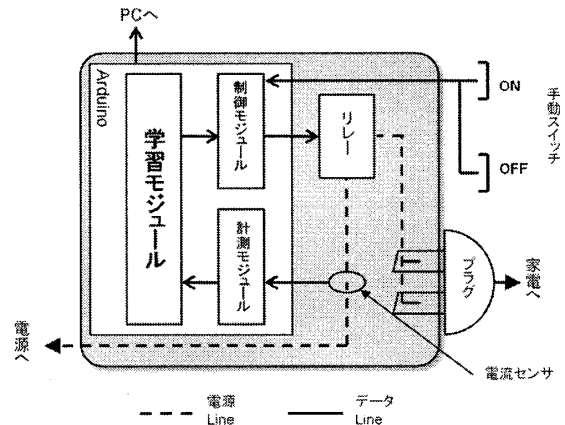


図1 機器構成図

ールへ値を送信している。さらに手動スイッチからのON/OFFイベントを検知し、制御モジュールへ送信する。制御モジュールでは、手動スイッチから送られて来たON/OFF情報に基づき、リレーの制御を行う。また、学習モジュールから送られて来たON/OFF情報に関しても同様にリレー制御を行う。

提案するコンセントは、待機電力および消費電力測定機能、リレー接点制御機能、学習機能を有する。各機能を制御するための機器として、安価で入出力インタフェースが比較的多く、かつADC(アナログデジタル変換回路)を持つArduino Diecimila[7]を使用する。Arduinoの動作電力は約5Wであるが、後述するPC液晶モニタ待機電力の平均値が11Wであるため、機器単体では待機電力を大きく上回るオーバーヘッドは発生しない。また、リレーには安価でかつ小型、25Aの大容量ソリッドステートリレーを使用し、電流センサにはU-RD社製の小型精密計測用電流センサCTL-6-V-Zを用いた。

手動スイッチは、待機電力のON/OFFを行うスイッチである。家電の電源を切断した状態が待機状態であり、待機電力が発生している。この状態から手動スイッチをOFFにすることにより、待機電力の切断が可能となる。また、家電の電源をONにする場合、手動スイッチをONにし、家電を待機状態にした後に家電の電源を入れる必要がある。この点は従来のスイッチ付き電源タップと同様である。

4. ソフトウェア実装

実際のユーザ位置状態の取得, および電力量とタイムスタンプの付加を行えるよう実装を行った. また, それらをログデータとして一つのファイルに保存し, データとして簡易的に扱えるようにした.

4.1 ユーザ位置状態の取得

ユーザが実際に家にいるか, 家の外にいるかを調べるため, 本論文では家庭内 LAN に接続された管理用 PC から生存確認パケット送信 (Ping) によって確認を行う. ユーザに無線 LAN 接続が可能なデバイスを所持してもらい, 家にいる場合は常時家庭内無線 LAN に接続を行う設定にする. ユーザが所持する無線デバイスの IP アドレスを固定にし, 管理用 PC から無線デバイスに対して生存確認パケットを送信することにより, ユーザの位置状態の情報を取得する. ユーザが外出した場合は家庭内無線 LAN の接続は切れるため, 生存確認パケットは到達しない. 従って, 生存確認パケットが到達しない場合は, 家にいないと判断することができる. また, Ping パケットの欠落も考慮し, 4回送信したうち1回以上応答があった場合を在宅中と判断した.

4.2 ログイング

学習コンセントでは, 日付, 時間, ユーザの状態, 電力値がログイングされる. タイムスタンプを付加するタイミング, すなわち電力値が送信されてきたタイミングで, 同時にユーザへの生存確認パケットも送信し, ユーザの状態も把握する. ログイングの形式は統計データとして使用しやすいよう CSV とした. また, PC との通信はシリアルインタフェースを用いて行う. 電力値のログイングも全てシリアル経由で PC へ送信し, PC 上でログイングを行う. 将来的には, Arduino 上に拡張ボードをつけ, ログイングから制御まで学習コンセント上で行えるようにする.

4.3 位置学習アルゴリズム

ユーザと家電の稼働状態の関係性の強さを計るためには, ユーザに対する位置確認パケットと家電の稼働状態を比較し, 数値化することが必要である.

ユーザの無線デバイスにパケットが到達せず, かつ家電が稼働状態または待機状態にある時の個数を F_p とし, パケットが到達しなかった個数を N_p とする. これより, 外出中に家電が稼働していない確率 P を下記にて求めることができる.

$$P = \frac{(N_p - F_p)}{N_p} \times 100 [\%]$$

4.4 時刻学習アルゴリズム

就寝中など, ユーザが家の中にいる場合でも待機電力の削減が行われていた時間では, ユーザの位置学習データのみでは待機電力の削減はできない. そこで, ユーザが ON/OFF を行った履歴からユーザが待機電力を OFF 状態にしていた時間を学習することにより, ユーザが在宅中であつても稼働性の低い時間帯は待機電力を削減することができる. また, ON/OFF を行った履歴を ON/OFF イベントと呼ぶ. 任意の1日分の履歴データを下記方法で抽出し, 時刻学習データを自動生成するよう実装した.

- (i) 1日を0時~6時, 6時~12時, 12時~18時, 18時~24時の4ピリオドに分割する
- (ii) ピリオド毎に ON/OFF イベント数をそれぞれ確認する
- (iii) ピリオド毎に ON/OFF イベントが発生した時間(hour)をそれぞれ配列に代入し, (ii)で取得したイベント数で割り, 平均時間を算出する
- (iv) イベント開始時間を必ず ON→OFF→ON→OFF となるように, ON/OFF 時間をセットする

例えば図3の場合, ピリオド1では OFF イベントが1回だけ発生しているため, 午前3時に OFF するイベントをセットする. 次に, ピリオド2では午前11時~12時にかけて ON するイベントが発生しているため, 午前11時に ON をセットする. この動作をピリオド4まで行い, イベントテーブルを作成する(表2). 同一ピリオド内に ON イベントおよび OFF イベントが重複した場合, 一つ前のピリオドにおける最終動作の逆のイベントを対象ピリオドの初期イベントとして設定する. 表2の例では, ピ

	ON イベント	OFF イベント
period1 (hour=0-6)	-	hour = 3
period2 (hour=6-12)	hour = 11	-
period3 (hour=12-18)	-	hour = 12
period4 (hour=18-24)	hour = 21	hour = 22

表2 イベントテーブル

リオド3の最終動作はOFFであるため、ピリオド4の初期イベントはONとなる。また、ONおよびOFFを同時刻に行うことはできないため、ピリオド内で同一の時刻のイベントが検出された場合、2番目のイベントは初期イベントに対して1時間加算したものを適用することとした。

4.5 学習アルゴリズム制御フロー

位置学習データおよび時刻学習データをロギングし、まず位置学習データによるユーザの位置状態の確認が行われ、在宅、もしくは外出の判別がなされる。外出中であれば時刻学習データのルーチンには進まず、待機電力の発生状況を調べて直接リレーの制御へと進み、待機電力をOFFにする。在宅中の場合、ピリオド単位で現在時刻とテーブルの比較を行い、条件に当てはまる場合はリレーの制御を行う。以上の流れを学習アルゴリズム制御フローとし、図2に示す。

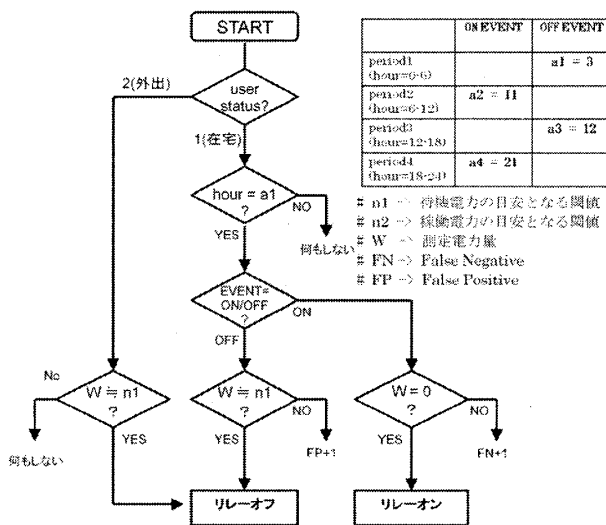


図2 学習データ反映後の制御フロー

5. 実験

本論文では、学習データの取得のため2名のユーザが1週間にわたり、対象家電を使用していない場合は待機電力の削減を手動で行った。家電を使用していない時は、コンセントの手動スイッチのOFFボタンを押すことにより待機電力を削減する。同様に、家電を使用する場合は手動スイッチのONボタンを押すことにより家電を使用する。自動制御を行わないロギングのみの状態で5日間稼働させ、平日5日間分の学習用データを取得した。また、今回使用する学習コンセントはネットワークに接続されていないスタンドアロンな機器であるため、正確な時刻を取得することができない。そのため、管理用PCにて電力値がシリアルから送信されてきたタイミングでタイムスタンプを付加し、日付と時間をロギングした。その上で、学習コンセントを実際の家庭に設置されている家電にて実験し、機能性の確認を行った。

5.1 計測対象機器の選択

ユーザの位置状態と家電の稼働状態の相関性を学習するため、一般的な家庭に存在するPC用液晶モニターを選択した。この家電は待機電力量が検出可能な量、すなわち家庭の総待機電力量のうち比較的大きい割合を占める家電であるということ、一般家庭での所持率が高いこと[1]、さらにユーザの分別がはっきりなされている家電であるということに着目した。また、非待機家電であることから、自動で待機電力を削減することでユーザの利便性を低下させる可能性が極めて低いと考えられ、本論文の実験に適した家電であると言える。

5.2 ユーザ位置状態と家電稼働状態の関係性

ユーザと家電の関係性について、学習データ取得中の任意の1日のうち、PC用液晶モニターのロギングデータを用いて比較を行ったものが図3である。

液晶モニターの消費電力量は稼働時で約80W、待機時で約10Wであり、このグラフから、ユーザの手動スイッチによる待機電力の削減により待機電力が発生していないことが分かる。また、ユーザ1が外出中は液晶モニターが稼

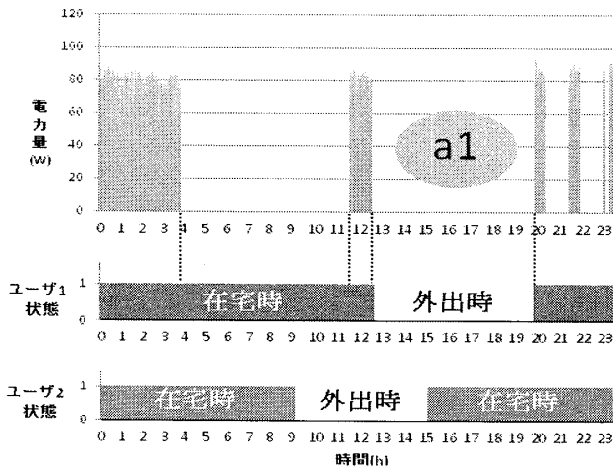


図3 ユーザ1および2の状態と家電稼働状態の関係性

働していないこと、および待機電力が発生していないことが確認できる(図3-a1)。

また、ユーザー2が在宅または外出中に関係無く液晶モニタが稼働していることから、図3に示したユーザーと家電の関係性の通り、ユーザー1が使用するPC用液晶モニタの稼働状態とユーザー2の位置状態に関係性が無いことも図3から分かる。さらに、4.3の式における F_p が0であったことから、ユーザー1が外出中の場合100%の確率でPC用液晶モニタが稼働していないことがわかった。以上のことから、PC用液晶モニタはユーザー1が外出中の場合は待機電力を遮断し、ユーザー1が在宅中の場合は待機中にするという学習データが得られた。

5.3 位置学習データの反映

学習データに従い、ユーザーの位置状態を取得し、位置状態の学習データのみで実際に自動で待機電力のON/OFFを行った結果が図4である。この間、ユーザー1は一切手動スイッチのON/OFFを行わない。さらに、ユーザー1の持つ無線デバイスにパケットが到達しなかった場合、かつ初期設定にて定めた待機電力閾値との比較によりPC用モニタが待機状態であると判断した場合、自動で待機電力をOFF状態とする。また、待機電力が自動切断によって0になった後にユーザー1の持つ無線デバイスにパケットが到達した場合、自動でON状態にする設定を行った。

ユーザー1が外出中は無線LANデバイスにパケットが到達しないため、待機電力が遮断される。図4では、午前

10時～午後21時がそれにあたる。しかし、ユーザー1が在宅中は待機電力をOFF状態にしないこととなっているため、午前3時～9時までの間待機電力が発生している(図4-a2)。位置状態のみで待機電力を削減する場合、ユーザーが在宅中は全く使用していない状態でも待機電力を削減することはできない。

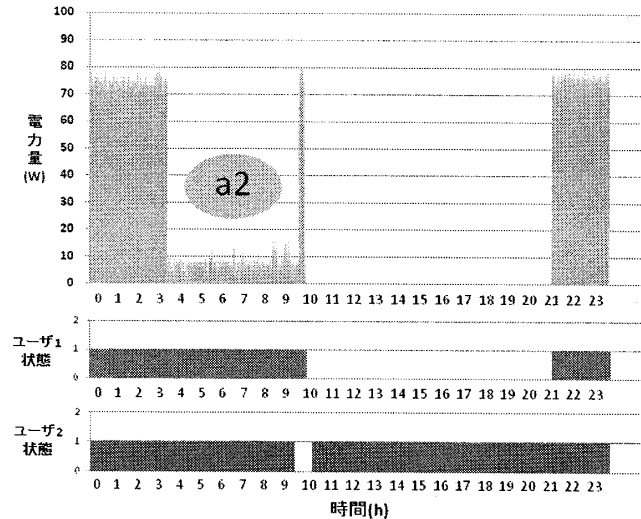


図4 位置状態学習情報をコンセンに反映した場合のグラフ

5.4 時刻学習データの反映

5.3から、位置と稼働状況の学習データのみでは待機電力を自動で削減するには不十分な情報であることが分かった。そこで我々は、位置学習データに加え4.3のフローに基づきON/OFFイベントの時刻学習データを加え、学習したデータを自動でスケジューリングし測定を行った。結果を図5に示す。

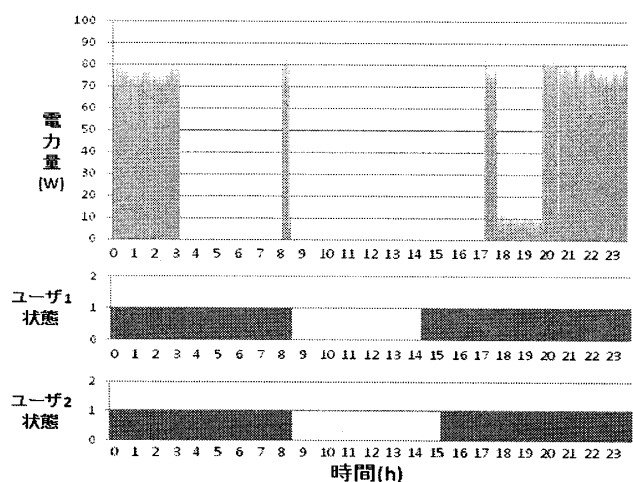


図5 位置学習データとON/OFF時刻学習データを用いて計測したグラフ

図5より、位置学習データに基づき、ユーザ1が外出時は待機電力が自動でOFFにされていることが分かる。また、イベントテーブルを反映した結果、在宅中であっても待機電力のOFFが行われていることが分かる。

6. 評価

第5節における実験にて得られた各データについて、3つの視点から評価を行い、学習コンセンツの機能性について分析をする。

6.1 学習情報の種類別成功率の評価

学習のアルゴリズムを適用した場合、第5節にて述べた学習情報を組み合わせることにより、待機電力削減における効果を検証する。成功率は5日間の学習データを反映した状態で下記3種類の学習データに基づく自動制御状態とし、算出した。

- (A) 位置学習データ
- (B) 時刻学習データ
- (C) 位置学習データ+時刻学習データ

ここで、実験では自動制御としているため、電力量が0になる時は、すなわち機械的制御が動作し待機電力を削減している状態であると言え、電力量が0の時間が成功率算出の要素となる。これを、元の待機電力が発生する予定であった時間、つまり家電が稼働状態でない時間で割ることにより、成功率が算出できる。従って算出の式は

$$\frac{\text{電力量が0の時間}}{(\text{総時間数} - \text{家電稼働時間})} \times 100 [\%]$$

となる。A, B, Cの検証を行った結果が図6である。A, BとCを比較すると、Cの成功率がAに対し2倍近い値を示していることから、単一の学習データのみで制御を行うより、複合的な学習データに基づいて制御を行った方がより削減率を高めることができることが分かった。

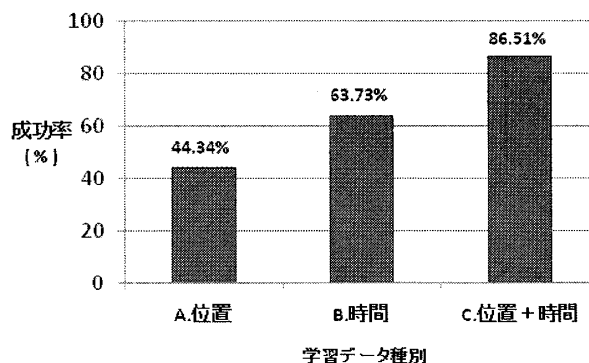


図6 学習データ別成功率

6.2 False Positive と False Negative の個数の推移

学習コンセンツでは、イベントテーブル上OFFの動作を行うべき時間に、家電の稼働状況によってOFF出来ない状況にある場合の値をFP (False Positive) 値とし、ON動作時にユーザの使用状況によりON出来ない場合の値をFN (False Negative) 値と定義する。また、学習時間からOFFになるまでの時間、および学習時間前にONになる時間を表す指標を評価関数 $F(x)$ と定義し、 $F(x)$ に代入する値 t を変動させた時にFPおよびFNの変化を観測することで、学習データに忠実に動作を行うことがエラーカウントにどのような影響を与えるか検証することが可能となる。 t をそれぞれ50分、30分、0分 (default) に設定しFPおよびFNの測定を行った例が図7である。

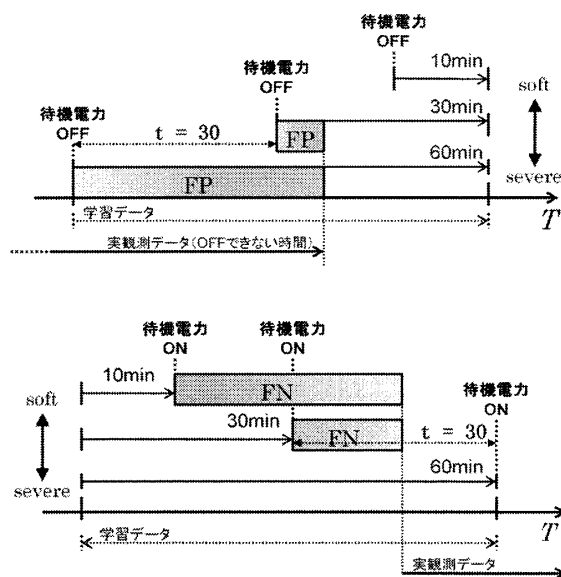


図7 FPおよびFNの測定例

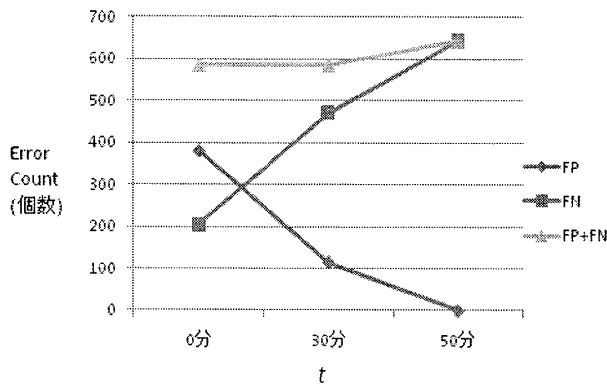


図8 評価関数とエラー特性の関係

また、実際に測定を行った結果、図8のグラフを得た。

t が小さいほど、つまり学習データに忠実であるほど、FP が多く発生することが分かった。また、t が大きいほど、FN が多く発生する。従って、この2つのグラフが交わる点が最もエラーカウントが少ないこととなり、t を決定する基準となり得る。

6.3 待機電力の削減効果

削減できた待機電力量の割合を、学習データ別に評価した。ここでは、6.1におけるA, B, Cの各々の学習データに基づく制御を行った場合と、6.2の評価関数についてtを0または最大に設定した場合の待機電力削減効果を測定し、比較を行った。比較は待機電力を全く削減しない場合を1とし、各アルゴリズムを反映させ削減効果を各々で測定する。結果を図9に示す。

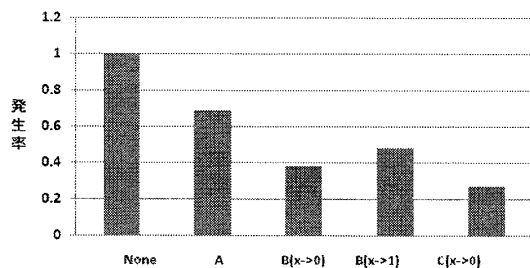


図9 アルゴリズム別待機電力の平均発生率

この結果から、6.1にて得た結果と同様に、複数の学習情報に基づき制御することで、より高い削減効果が期待でき

ることが分かった。特に、位置学習情報と時刻学習情報の組み合わせによる削減アルゴリズムは非常に有効で、評価関数が0に近い場合、8割近くの待機電力削減が期待できることも分かった。

7. まとめと今後の課題

本論文では学習コンセンを用いたロギング解析と、解析結果を反映したアルゴリズムが待機電力の削減にどのような影響を与えるか、またその削減効果について述べた。実験では、一つのアルゴリズムを用いるより、二つ以上の複合的なアルゴリズムを用いた方がより削減効果が見込めるという結果を得た。

Arduinoは非常に拡張性の高いマイコンであるが、PICなどのワンコイン型チップと比較すると、学習コンセント自体が消費する電力量が大きくなってしまふ。コンセントは生活には必要不可欠な物であるため、本来、省スペース省コストであるべきものである。将来的には学習コンセントを単独で動作させ、学習コンセント上で測定から解析、さらに制御といった全ての動作を行えるようなシステムを構築することが重要である。また、本システムを長期間多くのユーザに導入してもらい、コンセントの使用電力量データを収集することで、一般家庭における真の待機電力削減効果を測定することが、このシステムの有用性を図るために非常に重要な実験項目である。

参考文献

- [1]ECCJ 財団法人省エネルギーセンター“待機時消費電力調査報告書”。<http://www.eccj.or.jp/standby/index.html>
- [2]パナソニック電工“こまめにスイッチ”
<http://panasonic-denko.co.jp/corp/news/1003/1003-11.htm>
- [3]明山寛史, 川村尚生, 菅原一孔, 齋藤剛史, 小西亮介, “多機能コンセントのスケジューリング機能による待機電力の削減”, 第8回情報科学技術フォーラム一般講演論文集, 第1分冊, pp.173-179, 2009
- [4]加藤丈和, HyunSang Cho, DongwookLee, 豊村鉄男, 山崎達也: “情報・エネルギー統合ネットワークのための電力センシング情報からの家電認識とその応用”, 電子情報通信学会, USN2008-85, pp.133-138, 2009
- [5]伊藤雅仁, 大亦寿之, 井上智史, 重野寛, 岡野譲一, 松下温, “消費電力波形の特徴を利用した家電機器検出手法と制御システム”, 情報処理学会論文誌, vol144, pp.95-105, 2003
- [6]S.N.Patel, T.Robertson, J.A.Kientz, M.S.Reynolds and G.D.Abowl, “At the flick of a switch: Detecting and classifying unique electrical events on the residential power line”, UbiComp2007, pp.271-288, 2007
- [7]Arduino, <http://www.arduino.cc/>