

安心安全省エネのための 既存家電の消費電力監視・制御を実現する智能化電源タップ - プロトタイプ1号機の開発と 相関分析を利用した自動オン・オフ制御の試み -

An Intelligent Outlet Tap for Monitoring Power Consumption and Control Ready-made Home Appliance for Safety and Energy Saving -Development of A Prototype Device and Trial of Automatic On-off Control Utilizing Association Analysis-

学 後 迫 弘明 (東京大学) 正 福井 類 (東京大学)
正 森 武俊 (東京大学) 正 佐藤 知正 (東京大学)

*Hiroaki Ushirosako, Rui Fukui, Taketoshi Mori, Tomomasa Sato
Department of Mechano-Informatics, The University of Tokyo, Tokyo, JAPAN
ushiros@ics.t.u-tokyo.ac.jp

This paper describes a power supply tap which can acquire power consumption history and control the power supply of home appliances plugged into it. Besides it has shape and appearance that user can put on accessible place (e.g. a television rack). It can be utilized for a power monitoring and controlling system. The system realizes comfortable, safety and energy saving condition by on-off controlling of ready-made home appliances. In this paper, development of a prototype of the tap (iTap) is introduced, and as some typical application examples of the iTap, following three services are described to automatic on-off control of ready-made home appliance. (1)Classification of home appliances whether on-off control is acceptable, (2)automatic on-off control by association analysis and (3)automatic off control by detection of abnormal power consumption via clustering.

Key Words : Automatic Power Management, Power Optimization, Life Pattern, Home Security

1 緒論

近年、人間の行動を簡略化する快適性に加え、安心・安全・省エネなどを目的とした住居や家電の智能化に対する関心が高まっている。これらのサービスを実現するために、人間の生活空間に多種多様なセンサを設置し、人間行動の計測支援を行う試み [1, 2] や智能化された情報家電により家電をネットワーク化し、遠隔制御や居住者の趣向や状況に応じた制御を行う試み [3] が行われている。しかし、生活空間に多数のセンサを配置しなければならないことや、既に家庭内に多く存在する家電を情報家電に買い換えることを必要とするこれらの試みは、導入時に設置の手間やコストがかかり実際の家庭で導入するには敷居が高く、未だ広く普及していないのが現状である。これらの問題を解決するため、家庭内に設置されている既存家電を対象としたネットワーク化や、消費電力監視・制御を実現するシステムの研究が行われている [4, 5]。これらの研究では、既存家電をネットワーク化する手段として、容易に多数の家電を一括して管理・制御可能な電源タップ型デバイスを利用しているものが多い。しかしながら、これらの研究は取得した電力情報の「見える化」を実現したものがほとんどであり、知的電力制御を行えるものはまだない。

以上のことから、本研究では必要最小限の設備および設定で既存家電の電力監視・制御を実現するデバイスとして、電力を監視するセンサ、人によるオン・オフ制御が可能なスイッチ等を実装した電源タップ型デバイスを開発する。本論文では、まず電源タップ型デバイス「智能化電源タップ」の試作1号機の詳細について述べ、続いて、その消費電力履歴情報と人感センサによる人位置情報から自動で機器のオン・オフを行うことにより以下のサービスを実現するアルゴリズムについて述べる。

- I. タップに差された機器を自動オン・オフ操作の可否によりカテゴリ分けすることで、自動稼働させると危険な機器を制御対象から排除する (安心・安全)
- II. ユーザが複数の機器を同時に操作する際の相関関係を分析することで一部の操作を自動で補完し、ユーザの手間を軽減する (快適)
- III. 消し忘れ等が発生した際に、クラスタリングを用いた異常検知を行い、機器をオフにすることで正常かつより低消費電力な状態へ移行する (省エネ)

2 既存家電の消費電力監視・制御を実現する 智能化電源タップ

智能化電源タップによる消費電力監視・制御を実現するに当たっては、既存家電の状態を把握することと生活空間における人間行動を推定する必要がある。本研究が目標とするサービスはオン・オフ制御であるため、推定すべき人間行動は家電のオン・オフに関する行動である。そこで、電力使用が人の生活を端的に表しているという仮定のもと、Fig.1 に示す構成を採用する。具体的には智能化電源タップを製作し、ホストPC、焦電センサと組み合わせることにより消費電力履歴、人の機器操作、人位置情報を取得し、1章で述べた3つのサービスを実現する分析手法を提案し実装する。智能化電源タップなどからデータの収集・解析、智能化電源タップへの指令を行うホストPCの役割や人位置情報を取得するための焦電センサに関しては、将来的には智能化電源タップに組み込まれることが求められるが、今回の試作1号機では実装の簡便性などからホストPC、焦電センサを別に設けることとした。導入手順は智能化電源タップと焦電センサを設置し、1週間ほど通常通りの生活を行い、その間に取得したデータを分析することで支援を行うようになっていく。一般的な家庭

では智能化電源タップがテレビラックや机上などに2~3個、
 焦電センサは部屋の数と同数の1~5個程度が想定される。

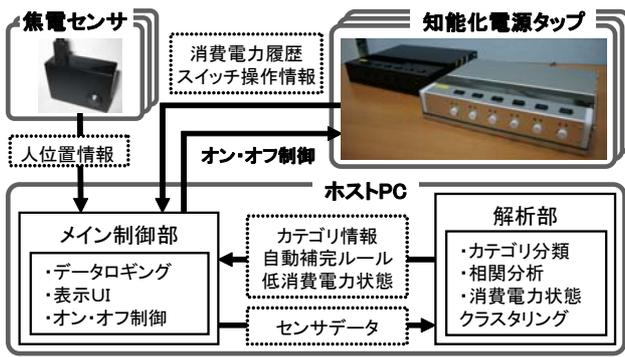


Fig. 1: 智能化電源タップによる電力監視・制御システム

2.1 智能化電源タップの機能分析

智能化電源タップに要求される機能を以下に挙げる。
 ホストPC, ユーザ双方によるオン・オフ切替機能: タップの差込口のオン・オフ切替はホストPCによる遠隔操作とユーザの直接的な操作の双方で行える必要がある。
 消費電力データの取得・通信・蓄積機能: 消費電力データを取得し, ホストPCに通知する。本研究では, データの蓄積はタップ側ではなくホストPC側で行う。
 機器のオン・オフを統括して行えるユーザインタフェース機能: ユーザの操作をタップで取得することで, 人の操作と消費電力変化の関係性を知り, 機器をカテゴリ分けする際に有効活用する。

2.2 消費電力履歴の解析アルゴリズムの機能分析

- 消費電力・人の機器操作情報および焦電センサ情報から1章のI~IIIのサービスを実現するための, 消費電力履歴解析アルゴリズムの機能を以下に示す。詳細は4章で述べる。
- I. 機器のカテゴリ分類機能: 消費電力の大きさや人の不在時に稼働するかなどの情報から決定木を作成し, 機器のオン・オフ可否を判別する。
 - II. オン・オフ自動補完機能: 消費電力履歴を機器のオン・オフ時系列データに変換し, 頻繁に発生する複数機器のオン・オフ切替組み合わせを抽出し, その一部の操作が行われた際に残りの操作を自動補完する。
 - III. 低消費電力状態移行機能: 消費電力履歴における各機器の状態をクラスタリングし, 現在の状態が特殊であった場合に, より低消費電力で一般的な状態へ移行する。

3 智能化電源タップの設計と実装

3.1 智能化電源タップのハードウェア設計と実装

智能化電源タップのブロック図と製作した基板を Fig.2 に, 智能化電源タップの概観を Fig.3 示す。機器の差込口は市販のタップを参考に6つとした。

[オン・オフ切替機能] ホストPCによる無線での操作とユーザによるスイッチ操作をマイコンが一括して受け取り, リレーを切り換える方式を採用した。無線通信への影響を考慮し, ソリッドステートリレーとメカニカルリレーの通信影響比較実験を行ったが両者に差異がなかったため, 発熱の少ないメカニカルリレーを採用した。

[消費電力取得・通信機能] 電流トランス方式による電流センサ (URD 製, CTL-6-V-Z) を用いて消費電力を取得する。取得したデータをホストPCに送信するための通信部には, 配線が不要であること, 将来的に他のセンサとの連携を考慮し ZigBee モジュールを採用した。

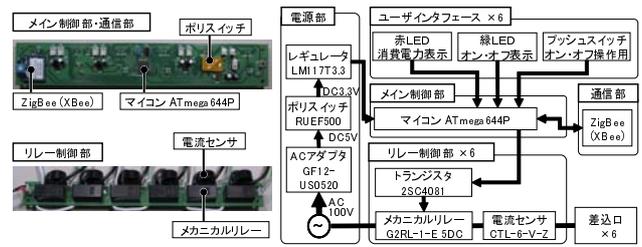


Fig. 2: 智能化電源タップの基板 (左) とブロック図 (右)

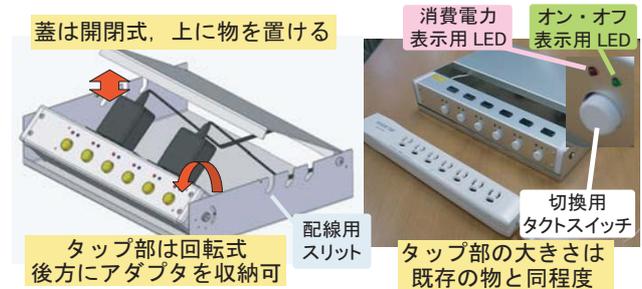


Fig. 3: 智能化電源タップの試作1号機

[インタフェース機能] ユーザがタップ側でオン・オフを切り換える操作の入力用のインタフェースとしてタクトスイッチを採用した。また, TV ラックや机上等ユーザがアクセスしやすい場所に設置でき, AC アダプタ等を収納可能なボックス形状を採用し, 操作性向上と柔軟なコードの引き回しのため, 差込口, 操作スイッチ部に回転機構を採用した。

3.2 基本性能評価実験

智能化電源タップの各差込口に機器を接続し, 24時間以上使用しても発熱が起こらず, データ通信, オン・オフ切替が正常に行えることを確認した。発熱の確認には不可逆の温度測定用ステッカーのヒート・ラベル (Fig.4) を用いた。



Fig. 4: 温度表示用ステッカー "ヒート・ラベル"

4 消費電力履歴の解析アルゴリズムと解析結果

本章では智能化電源タップを設置した実験環境について述べ, 次いで3つのサービスを実現するアルゴリズムと実験環境で取得したデータによる解析結果について述べる。

4.1 智能化電源タップを設置した実験環境

製作した智能化電源タップおよび焦電センサを表1に示す2家庭に設置し6日間データを取得した。以上のような環境でデータを取得・解析し, 居住者人数, 間取り, タップでの使用機器による差異等を考察する。

4.2 消費電力履歴と人位置情報によるカテゴリ分類アルゴリズムと分類実験結果

● 決定木を用いたカテゴリ分類アルゴリズム

各機器の自動オン・オフについて安全性などの面から可否を判断し以下の3つのカテゴリに分類する。(1) 起動停止制御型: オン・オフ共に操作可能な機器, (2) 停止制御型: 消費電力が大きく自動オンによる危険性の高いため自動オン不可の機器, (3) 起動制御型: 予約機能などによりユーザの行動と

Table 1: 知能化電源タップを設置した2家庭

	家庭1	家庭2
居住者	20代男性(一人暮らし)	30代夫婦(二人暮らし)
間取り	1K	1DK(二部屋)
使用機器	炊飯器, DVDレコーダ, テレビ, ルームライト, ドライヤ, 電子レンジ, etc	加湿器, フロアライト, PC, テレビ, デスクライト
設置場所 使用機器例	 設置場所 机上  ルームライト	 設置場所 テレビラック  フロアライト

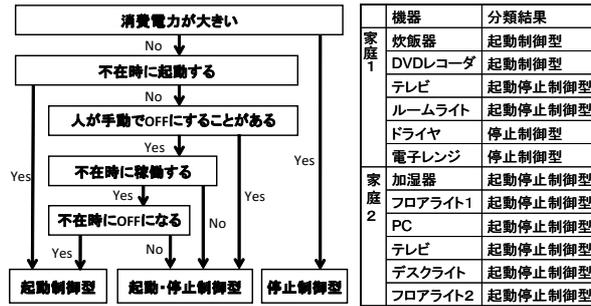


Fig. 5: カテゴリ分類決定木(左)と分類に成功した機器(右)

無関係に移動するため、自動オフ不可である機器. 代表的な家電が分類されるべきカテゴリとそれらの家電の消費電力履歴と人位置情報をシミュレーションした結果, Fig.5(左)の決定木を構築した.

●カテゴリ分類実験結果

知能化電源タップを2家庭に設置し, タップに差した6つの機器の消費電力とタップの置かれた部屋の焦電センサデータを取得した. 更新周期は1[s]とした. このデータをもとに差された機器と機器の分類結果を Fig.5(右)に示す. この結果から, 予約機能を使用した炊飯器, DVDレコーダ, 消費電力の大きい電子レンジ, ドライヤを意図したカテゴリに分類可能であることがわかった.

4.3 相関分析によるオン・オフ自動補完アルゴリズム

●時系列相関ルールの抽出

知能化電源タップにより取得された消費電力をオン・オフの2値化する. 2値化の閾値については各機器ごとの消費電力分布を生成しそこから適切な値を手動で設定した. 2値化したオン・オフの時系列データから相関性の強い組み合わせを抽出するため, Association analysis を時系列データに適用した手法 [6, 7] により時系列相関ルールを作成する. 時系列相関ルールは $X \rightarrow Y$ の形で表され, これは互いに素なオン・オフの組み合わせ X, Y に対して X が発生した際に Y を自動補完する ($X \rightarrow Y$) ことを意味する.

時系列データ中のオンとオフが切り換わる点を抽出しこれを event とする. 抽出したイベントを Fig.6 に示すパラメータによって sequence に統合する.

sequence に含まれる全てのオン・オフの組み合わせの中から support が高い組み合わせを抽出する. support とはパターンの頻度を表す指標で式 (1) で表される.

$$Support, supp(X \rightarrow Y) = \frac{\delta(XUY)}{N}, \quad (1)$$

$$Confidence, conf(X \rightarrow Y) = \frac{\sigma(XUY)}{\sigma(X)} \quad (2)$$

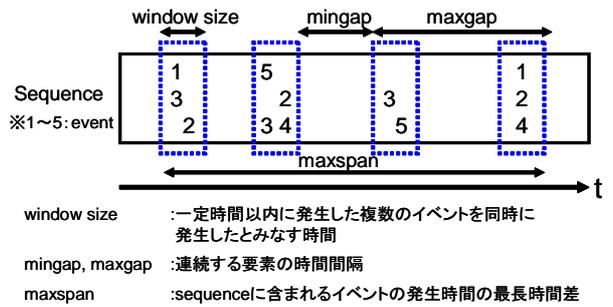


Fig. 6: 時系列データ中の event を sequence へ統合するパラメータ

- N : データ取得日数,
- $\delta(X)$: X を含む日数,
- $\sigma(X)$: X を含む sequence 数

抽出されたオン・オフの組み合わせから confidence の高い相関ルールを抽出する. confidence はルールを信頼性を表す指標で式 (2) で表される. 自動補完を行う際には, 以上のようにして抽出された時系列相関ルール $X \rightarrow Y$ について, X が発生したら Y を補完するという形で行われる.

●時間帯制限付相関ルールへの拡張

ここまでで抽出された時系列相関ルールは全時間帯において相関が強い必要があるため, 特定の時間帯のみ強い相関を抽出できないという問題点が存在する. 例えば, 1日に昼と夜の2回加湿器をオンにするユーザが, 昼は加湿器のみをオンにし, 夜は加湿器とデスクライトをオンにするといった場合には, {加湿器オン} {デスクライトオン} という相関ルールは confidence が上がらないため, 棄却される. このような問題を解決するため, 本研究では時間帯制限付相関ルールを導入する. 時間帯制限付相関ルールとは, 時系列相関ルールに T_1 時 ~ T_2 時までといった時間帯の情報を付け加えたもので, 以下のように導出される.

confidence が閾値を下回った時系列相関ルール $X \rightarrow Y$ について, オン・オフの組み合わせ XUY が全データ中に N' 回発生したとする.

- N' 回の XUY を発生時間順に並べる. このうちの連続する $N' - k$ 個 (k の初期値 1) のを取り出し, その中で最も早い発生時間を T_{start} , 最も遅い発生時間を T_{end} とする.
- N 日分の時系列データ D について $T_{start} \sim T_{end}$ の時間帯のみ抽出し新たな時系列データ D' とする. この D' に対して, 時系列相関ルール $X \rightarrow Y$ の support および confidence を再計算する.
- これが閾値を超えた場合, $T_{start} \sim T_{end}$ の時間帯制限付時系列相関ルールとする. 閾値を超えない場合は k をインクリメントし (1) の操作に戻る.

どの時間帯に絞っても confidence が閾値を超えない場合, その時系列相関ルールは完全に棄却される.

●時系列相関ルールによる自動補完実験

取得したデータについて, 時系列相関ルールの抽出を行うと共に, 自動補完を行うための人工テストデータを製作した. これは1日のオン・オフのうち任意の1つの操作を消去したもので, これを6日間の全操作に対して行った. 実験を行った家庭1, 家庭2ではそれぞれ142回, 131回の操作が行われたため, 人工テストデータは142個, 131個作成した. 取得データから時系列相関ルールを抽出し, その時系列相関ルールを人工テストデータに対して適用し, 人工テストデータにおいて削除された操作が補完された割合を調べた (Table 2). なお, 実験の際のパラメータは, window size=60[s], mingap=0[s],

Table 2: 自動補完実験結果

		家庭1	家庭2
自動 オン	補完対象操作	64/ 72(89%)	45/ 69(65%)
	補完成功操作	57/ 64(89%)	20/ 45(44%)
自動 オフ	補完対象操作	61/ 70(87%)	28/ 62(45%)
	補完成功操作	43/ 61(70%)	16/ 28(57%)
合計	補完対象操作	125/142(88%)	73/131(55%)
	補完成功操作	100/125(80%)	36/ 73(49%)

maxgap=300[s], maxspan=600[s] とし, support, confidence の閾値はそれぞれ 0.6, 0.8 とした. これらのパラメータの値は取得したデータから経験的に適切と思われる値を設定した.

Table 2 中の補完対象操作とは全操作に対する複数機器が同時に操作された回数の割合を表し, 補完成功操作とは複数機器が同時に操作された回数に対する正しく補完された操作の回数の割合を示す. 本研究で用いた時系列相関ルールでは, 複数機器が同時に操作される際に, その一部を補完することを目的としているため, 全操作に対してそもそも補完される操作がどの程度あるのかを補完対象操作で示し, 補完の対象となりうる操作のうちどの程度が補完できたかを補完成功操作で示している.

Table 2 の結果から, 補完対象操作の割合は家庭 1, 家庭 2 それぞれで 88%, 55% であり, 割合の低かった家庭 2 でも全操作の半数以上が複数機器を同時に操作しており, 複数機器操作の相関関係から自動補完しうる操作が多いことがわかった. また, 補完成功操作はそれぞれ 80%, 49% となった. 家庭 1 に比べ, 家庭 2 の割合が低くなっている理由としては, 家庭 2 が二人暮らしであるため, ユーザによって機器の使用パターンが異なる可能性が挙げられる. このため, 時系列相関ルールによる自動補完はユーザが一人であるときにより効果的であるといえる. また, 自動オンと自動オフの補完対象操作, 補完成功操作の割合などは家庭 1, 家庭 2 でそれぞれ異なっており, 今回の実験では法則性といえるものは見受けられず, 家庭ごとに異なる可能性が高いと考えられる.

●抽出された時系列相関ルール

取得されたデータから家庭 2 で抽出された時系列相関ルールの一部を Table 3 に示す. 1 つ目のルールは時間帯制限付の時系列相関ルールで夜の帰宅時に 2 つの部屋のライトを点灯する操作であると考えられる. 2 つ目のルールは 2 つの部屋のライトを消し, ベッド脇のデスクライトを点ける操作であり, 就寝前の行動であると考えられる. このように, 時系列相関ルールにより, 家電や部屋の使われ方を暗に抽出しているといえる.

Table 3: 家庭 2 で抽出された時系列相関ルール (一部抜粋)

時系列相関ルール		時間帯制限
Floorlight1ON	Floorlight2ON	19:29 ~ 22:59
Floorlight1OFF, Floorlight2OFF	DesklightON	

4.4 消費電力履歴のクラスタリングによる低消費電力状態移行アルゴリズムと自動オフ実験結果

●クラスタリングによる状態移行アルゴリズム

消費電力履歴の 1 サンプル (1[s]) ごとの状態を取り出し, 6 つの機器がそれぞれオンかオフかにより 64 個のクラスタに分類する. 各クラスタには平均継続時間の情報が付加される. 前節での 2 家庭で取得したデータからクラスタリングした結果の一部を Fig.7 に示す.

以下の手順で低消費電力状態へ移行する.

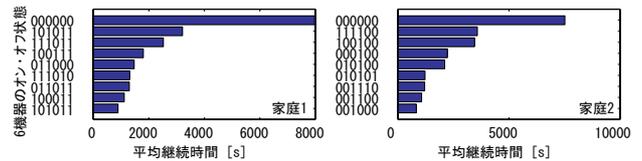
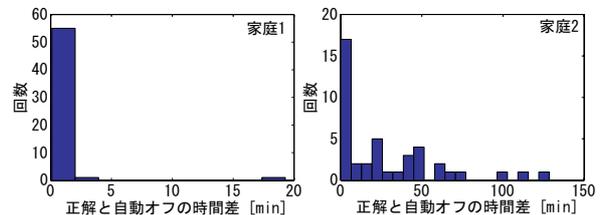
Fig. 7: 2 家庭でのクラスタリング結果 (一部抜粋)
6 機器のオン (1), オフ (0) によりクラスタを表現

Fig. 8: 正解データのオフ操作と自動オフの時間差

- (1) 現在の状態の継続時間が, クラスタ平均継続時間の 1.5 倍を超えたら (2) へ
- (2) オン状態の機器 N 個のうち 1 つをオフにした N 個のクラスタを候補とし, 平均継続時間が最大のものへ移行する.

●状態移行実験結果

前節の実験と同様, 人のオフ操作を削除した擬似データを用い, 自動オフの性能評価実験を行った. この結果, 家庭 1 では 70 回中 57 回, 家庭 2 では 62 回中 42 回正しく自動オフが行われた. 自動オフとユーザが実際にオフにした時間の差を Fig.8 に示す. 家庭 1 では一人暮らしのため, クラスタ自体が比較的少なく, 自動オフも早い時間で行われた. 家庭 2 ではクラスタごとのばらつきのため自動オフにかかる時間が長くなっているが, 1 時間を超えるものは稀で, 外出時の消し忘れなどに対して有効であることがわかった.

5 結論

本論文では既存の電源タップの機能に加え消費電力履歴取得と電力制御の機能を有する智能化電源タップの開発と, それにより実現される 3 つのサービス例について述べた. カテゴリ分類では危険な機器等の分類が可能であることを示した. また, 相関分析によるオン・オフ自動補完では, 特一人暮らしの家庭において高い割合で補完可能であることがわかった. さらに, クラスタリングによる低消費電力状態移行では, 1 時間以上の消し忘れに対し有効であることがわかった.

将来課題として, 家電機器の相関関係の導出や状態クラスタリングの際に焦電センサの継続・遷移情報を加えていくことが挙げられる.

文献

- [1] G.M. Youngblood et al. Managing adaptive versatile environments. In *Proc. of 3rd IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications*, pp. 351–360, 2005.
- [2] A. HELAL. Gator tech smart house : A programmable pervasive space. *IEEE Computer magazine*, pp. 64–74, 2005.
- [3] Panasonic. エコナビ. <http://panasonic.jp/econavi/>.
- [4] 柴垣早映子, 伊藤雅仁. 消費電力特性を利用した既存家電機器の遠隔制御システム. 情報処理学会研究報告. UBI, [コピキタスコンピューティングシステム], Vol. 2007, No. 14, pp. 151–158.
- [5] 徳舂彰, 塚原みな, 鈴木拓央, 中内靖. コピキタスセンサによる省エネ支援システムの開発. 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC2F2-03, Sep. 2009.
- [6] Rakesh. Agrawal. Mining sequential patterns. *Proc. Int'l Conference on Data Engineering (ICDE)*, Taipei, pp. 3–14, 1995.
- [7] Pang-Ning Tan et al. *INTRODUCTION TO DATA MINING*. Pearson Education, 2006.