

分散スマートタップ群を用いた協調的計測による電力フロー推定 1 — 間歇的電流計測からの連続的電力変動推定 —

Electric Power Flow Estimation by Cooperative Distributed Smart-taps 1:

Continuous Electric Power from Sparse Current Measurements

加藤 丈和
Takekazu Kato

林宗一郎
Soichiro Hayashi

松山 隆司
Takashi Matsuyama

京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics Kyoto University

1 はじめに

我々は、電力ネットワークと情報通信ネットワークを融合した新しいエネルギーネットワーク基盤の構築のために「エネルギーの情報化」というアイデアを提唱し研究開発を行っている [1]。エネルギーの情報化とは、太陽光発電、家庭用蓄電池、電気自動車などの普及によって、急速に分散化・双方向化が進みつつある電力ネットワークに対して、家庭内・地域内の電力ネットワーク全体のエネルギー流れの総合的なマネジメントを行うための超分散型のエネルギーネットワーク基盤である。

従来から家庭内やオフィスの電気機器の消費電力の見える化や制御を行う (Home Energy Management System) の研究開発が行われてきた [2, 3] が、エネルギーの情報化では、このような単なる電気機器ごとの特性や消費電力の見える化・制御の技術とは異なり、どこから供給された電力がどのような経路を通り、どこでどれくらい利用されているか、配線経路上の電力損失までを含めた、電力ネットワーク全体のエネルギーの流れ (電力フロー) を推定・制御することを目的としている。

どの電源から供給されたの電力がどのような経路をたどってどこへいったかを区別すること (電力カラーリング) は物理的には不可能であるが、我々は多数の分散配置された電源や電気機器を協調的に計測・制御することにより、仮想的に電力ネットワーク全体の電力の流れを推定・制御することが可能であると考えている。

このような目的のために、我々は各家電や電源に分散配置して電力の計測や制御を行うための、電力計測・制御・通信機能を持つコンセント (スマートタップ) を開発し、これらを用いたエネルギーマネジメント、電力フロー推定・制御の研究を行ってきた [4, 5, 6]。

本稿では、家電ごとに分散配置した間歇的な計測を行うスマートタップ群を協調的に用いることで、各家電の電力流の連続的な変化を推定する方法について述べる。

2 分散スマートタップ群の協調的計測

2.1 分散スマートタップ群

家庭内ではコンセントや家電に接続して家電ごとの電力を計測する家電計測用のスマートタップの他に、分電盤などの家から見て電力源側に接続し配線経路ごとの計測を行う電力源計測用のスマートタップなどが考えられる。これらのスマートタップ群で計測した電力データは、ホームサーバに送信・集約し、電力の見える化や総合的

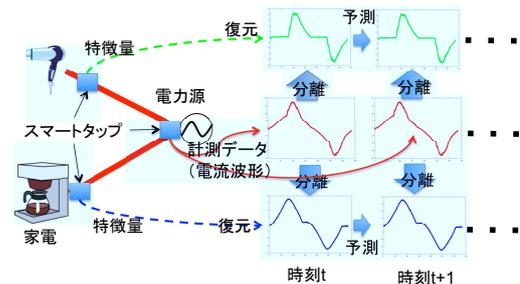


図 1 提案手法の概要

なマネジメントを行う。

これらのスマートタップのうち、家電計測用では、継続する家電の電力を直接計測することができる反面、多数分散して設置するため、高精度な計測や大量のデータを高頻度で送信することは難しい。一方で、電力源計測用では、比較的高精度かつ高密度な計測が可能であるが、家全体、または配線系統ごとの計測であるため、個々の家電の電力を計測することはできない。

本研究では、電力源計測用のスマートタップによる高精度、高密度な計測データと、家電計測用のスマートタップによる各家電の間歇的な計測データを協調させることにより、家電ごとの連続的な電力変動を推定する方法を提案する。

2.2 計測システム概要とアプローチ

本研究では、図 1 に示すように、一つの電力源に複数の家電を接続し、電力源側と家電側にそれぞれスマートタップを接続する。電力源側のスマートタップでは、電流、電圧の瞬時値の波形を計測でき、家電側のスマートタップでは、瞬時波形を計測・送信することは難しいので、交流周期ごとの有効電力や電流・電圧の実効値と電流波形の特徴量を計測し、間欠的 (数十周期ごと) にサーバーに送信する。

本研究の目的は、家電側のスマートタップから間欠的に送られる特徴量と、電力源側のスマートタップで得られる電流・電圧波形をもとに、各家電の瞬時電流波形や連続的な電力変化を推定することである。

一つの電力源に複数の家電をつないだ場合、キルヒホッフの法則により、電力源の電流波形は、この電力源につながる家電の電流波形の和となる。つまり、電力源の電流波形を家電ごとの電流波形に分離することができれば、各家電の電力を推定することができる。しかし、

事前知識なしで電力源の電流波形を分離することは困難である。そこで本研究では、連続する周期間では家電の電流波形は大きく変わらない、予め学習した様々な家電の電流波形のサンプルの線形結合で各家電の電流波形が表現できる、という二つの仮定を導入し、家電の電流波形を推定する。

2.3 電流波形の分離による各家電の電力推定

家電側のスマートタップでは、それぞれの家電の電流波形の特徴量を算出し、一定周期ごとにサーバに送信し、電力源側のスマートタップでは毎周期の電流・電圧の瞬時値の波形がえられているものとする。

各家電の電流波形の特徴量として、予め学習した様々な家電の電流波形を主成分分析したときの固有ベクトルとの内積を用いる [5]。主成分分析で求めた固有ベクトルを固有値が大きい順に K 個選択し e_1, \dots, e_K とする。また家電 n の t 番目の周期の電流波形を 20kHz (1 周期 337 回) でサンプリングしたデータをベクトルで $i_{n,t}$ と表す。このとき家電 n の特徴量を次のように算出する。

$$f_{n,t,k} = i_{n,t} \cdot e_k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (1)$$

家電側のスマートタップでは、この特徴量を一定周期ごとに算出し、サーバに送信する。

サーバでは、家電からの特徴量が得られた場合、まず、この特徴量をもとに固有ベクトルの線形結合によりもとの電流波形を復元し初期推定値 $\hat{i}_{n,t} = \sum_k^K f_{n,t,k} e_k$ とする。

次に予め学習した様々な家電の電流波形のサンプルから初期推定値に近い波形を L 個選択し、それらの線形結合として各家電の電流波形を推定する。学習サンプル S のなかで電流波形 i と l 番目に近いサンプルを $i^{(l)}$ と表すと、推定値は次式のように表される。

$$I_n(\alpha_n) = \sum_l^L \alpha_n i_n^{(l)} \quad (2)$$

このとき各家電の電流波形の和が、電力源の電流波形 i_s と近くなるように次式によって線形結合の係数を求める。

$$\alpha_1^*, \dots, \alpha_N^* = \underset{\alpha_1, \dots, \alpha_N}{\operatorname{argmin}} \left(\left| i_s - \sum_n I_n(\alpha_n) \right|^2 + \sum_n \left| \hat{i}_{n,t} - I_n(\alpha_n) \right|^2 \right) \quad (3)$$

この式の第二項は推定値が初期推定値から大きくはずれないためである。求めた係数を用いて最終的な推定値は $i_{n,t}^* = I_n(\alpha_n^*)$ と求められる。

また、家電からの特徴量 $f_{n,t,k}$ が得られない場合は、前の周期の推定値を初期推定値 $\hat{i}_{n,t} = i_{n,t-1}^*$ として式 (2)、式 (3) を適用することで推定値を求める。

3 実験結果

電子レンジと掃除機の二台の家電に対して電流波形の推定結果からそれぞれの有効電力を推定した結果を図 2 に示す。家電から 1 秒間 (60 周期) に 1 回だけ特徴量が送信されてくる場合の推定結果を示す。

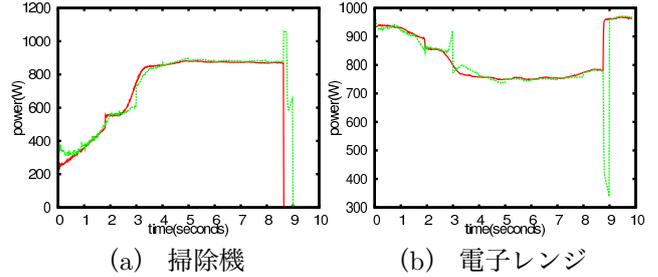


図 2 有効電力の推定結果 (実線:真値, 破線:推定値)

この結果より、電力が大きく変動した部分では誤差が大きくなるものの、大部分の電力が連続的に変動している部分では正しく推定が行えていることがわかる。

誤差が大きい部分は、家電の状態 (電源オンオフ、強弱など) が変わったため、電流波形が大きく変化するため、電源の電流波形を正しく分離できなかったためと考えらる。

4 まとめ

本研究では、電力源で計測した電流波形を分離することで、各家電の電流波形を推定し、家電ごとの電力の連続的な変動を推定する方法を提案した。実験では、電力変動が大きい部分では誤差が大きくなるものの、なだらかに変化する部分では、うまく推定できることが確認できた。今後の課題として、家電の状態変化の推定、配線のトポロジーや配線経路上の電力損失 [6] を考慮した推定などがあげられる。

参考文献

- [1] 松山：“エネルギーの情報化 (i-energy) —電力ネットワークと情報ネットワークの統合による安全・安心なエコライフの実現を目指して—”, ITU ジャーナル, **38**, 12, pp. 6–13 (2008).
- [2] 岩田, 甲斐, 島津：“省電力プラットフォーム「グリーンタップ」の提案 (1)”, 情報処理学会全国大会講演論文集, 第 71 巻, pp. 19–20 (2009).
- [3] 小西, 齊藤, 青田, 尾崎, 菅原：“電流センサに基づく家電機器の認識”, 計測自動制御学会第 25 回センシングフォーラム, pp. 88–93 (2008).
- [4] 山崎, J. Jung, Y. Kim, M. Hahn, 豊村, R. Teng, 丹, 松山：“家庭における電力センシングネットワークによるエネルギーマネジメント”, 信学技報, 第 EE2007-56 巻, pp. 71–76 (2008).
- [5] T. Kato, H. S. Cho, D. Lee, T. Toyomura and T. Yamazaki: “Appliance recognition from electric current signals for information-energy integrated network in home environments”, 7th International Conference on Smart Homes and Health Telematics (ICOST 2009), pp. 150–157 (2009).
- [6] 林, 加藤, 松山：“分散スマートタップ群を用いた協調的計測による電力フロー推定 2 —ネットワークトモグラフィによる電気配線のトポロジー推定—”, 電子情報通信学会総合大会 2010 (2010).