

屋内電気システムの電流センシングを用いた電化製品 利用位置推定手法の提案

孔 全¹ 前川 卓也¹

概要：

本稿では、屋内の電気システムをセンシングすることにより、電化製品の屋内での利用位置を推定する手法を提案する。具体的には、電気システムを流れる電流を電流センサにより観測し、電圧降下現象を用いて交流電源から電化製品のプラグが挿入されているコンセントまでの距離を推定することで、電化製品の位置を特定する。本研究では位置の推定を電流センサのみを用いることにより実現したため、電化製品に RFID などの位置計測用タグを添付せずに、電化製品の利用場所を推定できる。家電の利用位置推定技術は、実世界現象の理解や実世界指向アプリケーションの実現のための基礎的技術になると考える。例えば、ユーザ位置や家電利用位置アウェアなサービスの提供、日常行動の認識、家電の利用を介したユーザの位置推定、家電利用位置に基づく部屋の役割（ダイニングルーム、リビングルーム、ベッドルームなど）の理解などのアプリケーションへの利用が考えられる。

キーワード：屋内位置推定, 電化製品, 電流センシング

Proposing A Method for Positioning Appliance Use in Indoor Environment based on Electrical Sensing

QUAN KONG¹ TAKUYA MAEKAWA¹

Abstract: Real-world context sensing and understanding are fundamental technologies of ubicomp applications. As we live surrounded by large numbers of electrical appliances, many studies attempt to obtain the information of *what* a user is doing related to electrical appliance usage. This study tries to estimate *where* an appliance is used by sensing residential power lines. We believe that the estimated *where* information is very useful for understanding real-world e.g., a position of a user who is using the appliance or whether or not multiple electrical appliances are located near each other for providing a service by combining collocated appliances.

Keywords: Indoor positioning, Appliance, Electric sensing

1. はじめに

1.1 背景

実世界コンテキストセンシングおよびその理解はユビキタスアプリケーションの基盤技術であるため、多くのユビキタスコンピューティング研究では、実世界コンテキスト

の認識を目的としている。特に、行動認識と屋内位置推定技術はユビキタスコンピューティング研究分野における 2 大研究領域である。行動認識は、センサデータを用いることにより人が何の行動をしているか、すなわち *what* の情報を認識する技術である。一方、屋内位置推定技術は人や日常物の *where* の情報を推定する技術である。すなわち位置推定技術を用いて、人の屋内環境での位置を推定することができる。ここで、行動認識技術にはウェアラブルセンシングと環境センシングの主に 2 つのアプローチがある。

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita, Osaka, Japan

ウェアラブルセンシングのアプローチでは、ユーザの身体に装着した加速度センサやマイクから取得したセンサデータを用いて人の日常行動を認識する [1], [11]. 環境センシングのアプローチでは、環境に設置されたユビキタスセンサ、例えば RFID タグやスイッチセンサなどを用いることにより認識する [10]. 一方、多くの位置推定技術は信号発信機能を持つビーコン (例えば超音波、無線 LAN, UWB, 赤外線など) とユーザがもつ受信機により推定を行う [10]. 行動認識および屋内位置推定技術はその用途が幅広く、例えば、高齢者介護、ライフログ、ホームオートメーションなどへの利用が期待できる。

一方、現代社会ではわれわれは多くの電化製品に囲まれて暮らしており、日常生活の中で頻繁に電化製品を使用するため、ユビキタスコンピューティングの研究分野における多くの研究では電化製品の使用状況をモニタリングすることで、人の日常行動の理解を実現する試みがなされている。すなわち、これらの研究では何の電化製品が利用されているかを推定している。また、このような電氣的イベントの認識技術はユビキタスセンシングとインフラを介したセンシングの 2 つのアプローチに分けることができる。ユビキタスセンシングのアプローチでは、小型ユビキタスセンサをそれぞれの電化製品に添付することが必要である [5], [18]. しかし、センサノードの導入やメンテナンスコスト、例えば電池交換に関するコストなどは非常に大きい。一方、インフラを介したセンシングのアプローチは電化製品に取り付けられたセンサを用いる代わりに、家庭の電気系統 (建物内の電線) にセンサを設置することによって、電氣的イベント (どの電化製品が使われているか) を認識する [13]. すなわち、このアプローチの導入およびメンテナンスコストは低いことが分かる。電氣的イベントの認識に関する技術は消費電力の分析など幅広い用途がある。また、日常行動の中でわれわれは頻繁に電化製品を使用するため、電化製品の利用の認識は日常行動の推定にも利用できる。

1.2 研究目標

上述したように、多くの研究では電化製品の what の情報を推定することを試みている。一方、本研究では、家電の where の情報を推定することを目指す。すなわち、屋内環境での電化製品の利用位置を推定することを試みる。本稿では、導入およびメンテナンスコストが低いインフラを介したセンシング手法を用いることにより家電の where の情報を推定するアプローチを提案する。具体的には家庭内の電気系統をセンシングすることで、家電が接続されているコンセントを認識する。家電利用位置の情報は実世界に行われるイベントの理解や以下のような実世界指向アプリケーションの開発に利用できると考える。

- 家電利用位置の自動的な推定により、部屋の役割 (例え

ば、どの部屋がダイニングルーム、リビングルーム、ベッドルームとして使われているなど) を理解することもできる。部屋の役割情報は人の日常行動を理解するのに非常に有用である。

- 家電を介してユーザにサービスを提供するときに (例えば、ユーザの近くに位置するスクリーンに情報を提示するなど)、超音波や Wi-Fi 位置推定など他の位置推定技術により推定されたユーザの座標からその近くにある電化製品を自動的に選択することができる。

- 複数の家電が互いに近くに配置されているか否かを知ることができる。すなわち、近傍の複数の家電が連携するようなサービスを簡単に実現できると考える [2] (例えばテレビの利用に応じて、その部屋の照明システムを制御するなど)。

- 屋内環境に多くの家電が存在する場合でも、容易に環境内の家電の位置を示すマップを作成することができる。また、家電の位置が変化しても、自動的にマップ情報を再構築することができる。

1.3 研究手法

ここでは、本研究における電化製品の利用位置を推定する手法を簡単に紹介する。インフラを介したセンシング手法に基づいて、配電盤から流れる電流をセンシングすることによって電化製品が接続するコンセントを推定する。具体的には、電線に流れる電流をモニタリングするため配電盤にセンサ (電流計) を添付し、センサと配電盤から伸びる電線回路中のコンセントに差し込まれた電化製品間の距離を推定する。これにより、どのように電線が配線され、どこにセンサが取り付けられているかが記載された屋内環境のフロアプランを用いて、センサと電化製品間の距離から電化製品の屋内環境での位置が分かる。センサと利用中の電化製品間の距離を推定するために、本稿では電線の抵抗 (リアクタンス) による電圧降下に着目する。配電盤で測定された電圧値が 100V であるとき、電圧降下により家電が接続されている配電盤からはなれたコンセントで計測した電圧は 100V より低くなる。これは、電線に抵抗などが存在するためである。電圧降下の度合いは電線の長さ (家電と配電盤間の距離) に比例する。すなわち、配電盤に設置されたセンサ (電流計) から電流を測定するとき、オームの法則 $V = IR$ によると、家電がより遠くのコンセントで使われるほど電流の減少量が大きくなる。この現象を用いることで、センサと家電間の距離を推定する。しかし、コンセントを介して電線が分岐している場合、配電盤と電化製品間の距離を推定する提案手法では電化製品の正確な位置を推定することはできない (電化製品が分岐しているどちらの電線に接続されているかを識別できない)。この問題に対処するために、本研究では分岐点 (ある電線に異なる電線が接続されているコンセント) にセンサを設

置できるようにした。

距離を推定する前段階において、どの電化製品が使用されているかを特定する必要がある。本研究では既存の研究に基づいて、電流センサデータを用いて電化製品の what の情報を推定する。また、本研究において、実用的な位置推定システムを構築するために、以下のような問題を考慮して手法を設計する必要があると考える。

- 同じ電線のコンセントに差し込まれている複数の電化製品が、同時に使用される場合がある。例えば、ユーザーは夕食を準備するために、同じ部屋での電気ケトルとミキサーを同時に起動する。このような状況に対処できるような手法を設計する必要がある。
- 導入容易なシステムを実現するために、キャリアレーションのコストを削減する必要がある。本研究では、電圧降下式を用いてそのコストを削減する。また本研究では他の環境で得られたキャリアレーションデータを再利用することで導入のコストを低減しているが、その詳細に関しては文献 [6] を参照されたい。

本研究の学術的貢献は以下の通りである。(1) 家庭の電気システムを用いることによって家電の利用位置を推定する新しい手法を提案した。(2) 実際のデータを用いて、提案手法の有効性を検証した。筆者の知る限りでは、電気システムのセンシングにより家電の位置を推定する研究はこれまでに行われていない。本稿の以降の構成は以下の通りである。まず本研究の関連研究を紹介する。次に、電流センサデータを用いた電氣的イベントの分類手法を述べる。そして、電化製品の位置推定手法を説明し、実際のセンサデータを用いて提案手法を評価する。

2. 関連研究

2.1 行動および電氣的イベントセンシング

ユビキタスコンピューティング分野の多くの研究者が「大量のセンサ」を、例えば屋内環境に RFID タグとスイッチセンサなどを設置することにより、日常行動を認識している [14], [19]。多くの研究では日用品や家電などにセンサを埋め込んだり、添付することによって比較的複雑な日常行動、例えばトイレを利用する、コーヒーを作る、皿を洗う、夕食を準備するなどを認識している。また、近年の多くの研究では環境に設置されたセンサを用いて家電の利用を検出しようと試みている。例えば、文献 [5] で提案されたシステムは、各電化製品に取り付けられた磁気センサや照度センサを搭載したユビキタスセンサノードを用いることにより家電の利用を検出する。しかし、このような手法は大量のセンサを必要とするため、メンテナンスや導入のコストが大きい。

2.2 屋内位置推定

多くの屋内位置推定研究では、何らかの信号を用いて測

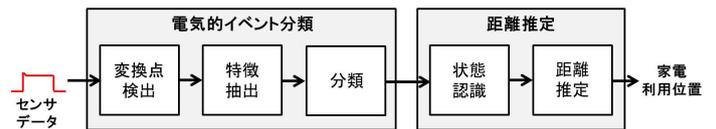


図 1 提案手法の概要。

位を行うことが多い。例えば、赤外線 [21]、超音波 [16]、RFID[22]、UWB[20]、FM ラジオ電波 [15]、WiFi[9] などを使った研究が多く行われている。特に、WiFi は無線 LAN 技術の普及とともに容易に利用できるようになってきたため、WiFi を用いた研究が多く行われている。しかし、これらの手法は基本的に発信機と受信機を必要とし、例えば位置補足対象が WiFi モジュールを備えるスマートフォンなどを持ち歩く必要がある。本研究と最も類似している研究が、文献 [12] で提案されているシステムである。提案システムでは、家庭の電気システムに低周波の信号を伝播させるモジュールをコンセントに設置し、その信号を受信可能なデバイスを携帯するユーザの位置を推定している。

3. 電氣的イベントの分類

電化製品の位置推定を行う前に、どの電化製品が利用されているかを電流センサデータを用いて分類する。この情報を用いて位置推定を行う。ここで、本研究は主に位置推定に着目しているため電氣的イベントの分類に関しては簡単に説明する。詳細に関しては文献 [8] や [7] を参照されたい。

3.1 概要

図 1 左部は電氣的イベント分類の概要を示す。電気システムを流れる電流と配電盤が供給する電圧センサデバイスから得られるとする。ここでは、電氣的イベントを検知し、そのイベントがどのクラスに対応するかを分類する。(例えば、「掃除機オン」、「掃除機オフ」、「ヘッドライヤオン」などのクラス)すなわち、電化製品のオンやオフのイベントに注目する。本研究では、電流センサデータから特徴抽出を行い、機械学習の手法によりクラス分類を行う。

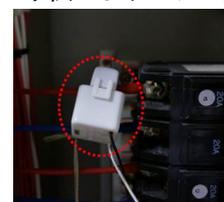


図 2 配電盤に設置された電流センサ。

3.2 センサデバイス

本研究では家庭内の電線に容易に設置できるクランプ型の電流センサ (CTL-10-CLS) を用いる。プロトタイプシステムでは、ラップトップ PC に接続されたセンサの 2000Hz でサンプリングする。図 2 は、配電盤の電線にセンサを設置したときの写真である。また、短い延長ケーブルに装着

したセンサデバイスも用意した (図 3)。これは、コンセント経由で延びる延長ケーブルと、そのコンセントの間に挿入するために開発した。これにより、電線が分岐している場合でも分岐先の電流を計測できる。また同時に、デジタルマルチメータにより交流電源の電圧の振幅も計測している。

3.3 変化点検出

まず、電流データの時系列データから変化点、すなわちオンとオフを検出する。図 4 上部は掃除機が利用されたときの電流データである。掃除機がオンになったとき、突然電流値が上昇している。そのあと、掃除機がオフになるとともに電流値が下降している。このような電流値の変化を検出する。変化点検出にはベイズ情報量規準 (BIC) を用いた。詳細は文献 [3], [4] を参照されたい。

3.4 特徴抽出

変化点が時刻 t に発見されたとする。このとき、 t を中心とする幅 1 秒の窓を設定し、そこから特徴抽出を行う。抽出する特徴は、上述の既存研究を基に以下の通りとした。

-窓における最初と最後の電流値の差: 図 4 のように電化製品がオンになると、この値が大きくなる。また、この値は電化製品の消費電力に関係する値のため、電化製品を識別するのに有用である。差を用いた理由としては、図 4 のようにヘアドライヤーが利用されたあとに掃除機が利用された場合、掃除機がオンになったときの電流値はヘアドライヤーの電流も合算されたものになるためである。差を計算することで、電化製品ごとの電流値が得られる。

-窓における最大と最小の電流値の差: この特徴は過渡電流の特徴を捉えるために用いられる。図 4 のように、掃除機には特徴的な過渡電流が見られる。

-FFT 係数: 電化製品を利用しているときの電流データにはその電化製品特有の周波数が含まれるため、FFT の各係数の値を特徴として用いる。

-電化製品の状態: ある電化製品がオフになった直後に、続けてオフになることはない。(オフはオンの後のみ発生する。) そこで時刻 t の直前の電化製品の状態 (オン状態/オフ状態) を特徴として用いる。

これらの特徴値を連結して特徴ベクトルを構築、分類を行う。

3.5 特徴ベクトルの分類

特徴ベクトルを適切なクラス (例えば、「掃除機オン」、「掃除機オフ」、「ヘアドライヤーオン」などのクラス) に分類する。本研究では C4.5 決定木を用いて分類を行う [17]。

4. 距離推定手法

上述した通り、家庭内の電線がどのように配線されてい

るか、センサが家庭内のどの位置に設置されているかは既知とする。これにより、センサから電化製品の距離が分かれば、電化製品がどの位置のコンセントに接続されているかが分かる。以降ではその距離を、電圧降下現象を利用して推定する方法について述べる。図 1 右部は距離推定手法の概要を示す。上述のイベント分類手法により、電化製品利用の開始および終了時刻が得られるとする。この開始および終了時刻の間の電流データを用いる。ここで、いくつかの電化製品は複数の状態をもつ。例えば、多くのヘアドライヤーは「強」や「弱」の状態をもち、その消費電力 (と流れる電流) は状態ごとに異なる。そのため、提案手法では (1) センサデータが安定している区間を発見し、その区間がどの状態に属するか認識したあと、(2) 状態に応じてセンサと電化製品の距離を求める。

4.1 電化製品の状態の認識

まず、信号が安定している区間を特定する。本研究ではスライディング時間窓ごとに電流データの分散を計算し、分散が閾値より小さい窓を安定している窓であるとする。そして、隣接する安定している窓を連結する。このとき、 t 検定で平均値が類似していると判定された窓のみを連結する。これにより、安定している区間が得られる。

その後、その区間がどの状態に属するか判定する。そのため、あらかじめそれぞれの状態ごとに電流データの分布を正規分布により学習しておき、最も類似している分布に対応する状態を属している状態とする。この属している状態の情報を用いて距離を推定する。

4.2 距離の推定

交流回路では、電流が電線を電源 (配電盤) から電化製品まで流れるとき、電線による抵抗とリアクタンスが発生する。これらをあわせてインピーダンス (Z) と呼び、電流と電圧との関係は $V = IZ$ となる。電線は直流回路における抵抗のような働きをし、回路を流れる電流値を低下させる。電線によって引き起こされた電圧降下は以下のような単純化した式により表される。

$$e = \frac{c \times L \times |I|}{1000\sqrt{2} \times A} = c' \times L \times |I|. \quad (1)$$

ここで、 e は電圧降下 [V]、 L は電線の長さ (片道) [m]、 I は電流 [A]、 $|I|$ は電流の振幅、 A は電線の断面積 [mm^2]、 $c' = \frac{c}{1000\sqrt{2} \times A}$ であり、 c は電線の種類に依存するパラメータである。上記の簡易式を用いて、電線のインピーダンスを $c' \times L + j0$ で表す。

図 6 は電気系統の等価回路の例を示す。この例ではコンセント A, B, C, D, ... をもつ電線 (電気系統) を示している。交流電源とコンセント A との距離は a であるため、その間の電線のインピーダンスは $c' \times a$ となる。ある 1 状態のみをもつ電化製品のインピーダンスが



図3 延長ケーブルに設置された電流センサ.

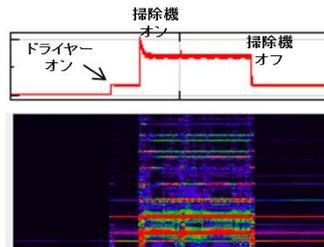


図4 ヘアドライヤーと掃除機が利用されたときのセンサデータの例.

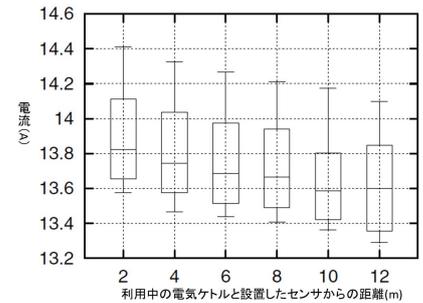


図5 異なるコンセントで電気ケトルを利用したときの電流データの箱ひげ図.

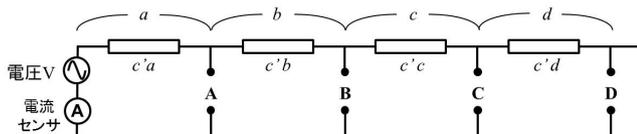


図6 電気システムの等価回路図.

$Z_1 = R_1 + jX_1$ であるとする. ここで, R_1 は抵抗, X_1 はリアクタンスである. この電化製品がセンサから x (未知とする) の距離にあるとき, 電線に流れる電流は下記のように表される.

$$I = \frac{V}{(c' \times x) + R_1 + jX_1} \quad (2)$$

ここで I は電線に流れる電流, V は電源の電圧である. 式2に示すように, I は x が大きくなるとともに低下する. R_1 , X_1 , V , および I が既知なら, x を計算することができる. しかし, R_1 , X_1 , および V と I の位相差は高価な計測機械がないと計測できない. しかし, そのような機械を家庭に導入することは困難である. 本研究ではこの問題に, 安価な電流センサを用いて対処する. (電流センサは電氣的イベントの認識の研究に多く用いられている.)

ここで単純な方法について考える. 安価な電流センサにより得られる $|I|$ は, x が大きくなるとともに低下することにのみ注目し, 回帰分析を用いて $|I|$ と x の関係を求める. 図5は, 電化製品を利用する距離 (x) を変化させたときの, x と観測された電流 ($|I|$) の関係を示している. 図に示すように, センサと電化製品の距離が大きくなるほど観測される電流が小さくなる. 電化製品 Z_1 に関して, $|I|$ と x の関係は以下のように表される.

$$\frac{|I|}{|V|} = e_1 x + f_1 \quad (3)$$

ここで, e_1 と f_1 は回帰式の傾きと Y 切片をあらわす. (複数の状態を持つ電化製品に関しては, 状態ごとに回帰式が存在する.) すなわち, x を $|I|$ から計算することができる. ここで, 各コンセントと配電盤からの距離は既知であるとしているため, 推定された距離と最も近い距離にあるコンセントの距離を最終的な距離として出力する. しかし, この単純な方法を用いるためには (回帰式を計算するためには), 複数のコンセントであらかじめ電流データを収集し

ておく必要がある.

4.3 電圧降下式を用いた距離推定

上記の単純な方法の問題を解決するため, 式2を単純化して, 1つのコンセントであらかじめ電流データを収集しておくのみで, 距離推定を行う手法を提案する. ここで, 式2から以下の式が得られる. ($Z_1 = R_1 + jX_1$)

$$Z_1 = \frac{V_a}{I_a} - (c' \times a) \quad (4)$$

V_a と I_a は, 電化製品 Z_1 をコンセント A で事前に利用したときの電圧と電流である. 一方, Z_1 が距離が未知のコンセントで利用されたとき, 以下の式が式2より得られる.

$$c' \times x = \frac{V_x}{I_x} - Z_1 \quad (5)$$

V_x と I_x の位相差は V_a と I_a の位相差と等しいと言えるため, 式4を式5に代入することで以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} c' \times x &= \frac{V_x}{I_x} - \frac{V_a}{I_a} + (c' \times a) \\ &= \frac{|V_x|}{|I_x|} e^{j\theta} - \frac{|V_a|}{|I_a|} e^{j\theta} + (c' \times a). \end{aligned}$$

ここで, 位相差 θ は安価なセンサでは計測することが難しいため, 0 と置くと以下の式が得られる.

$$x = \frac{|V_x|}{c'|I_x|} - \frac{|V_a|}{c'|I_a|} + a \quad (6)$$

この式により, 事前に1つのコンセントのみで Z_1 のセンサデータを取得しておくのみで, x を計算できる.

4.4 家電の同時利用距離推定

複数の家電が同じ回路上で使われた場合, キャリブレーション段階で得られた式3のパラメータを用いて距離を推定する手法を説明する. 複数の家電が同時に起動 (オン状態) されることはないという前提で距離を推定する. 例えば, インピーダンス Z_1 と Z_2 を持つ家電の距離を推定する場合, まず家電 Z_2 が図6のコンセント D で利用されたとする. そして, この回路上で他の家電が使われていないとする. このとき, 式3を用いて配電盤から Z_2 までの距離を推定することができる. そして, 電化製品 Z_1 をコ

ンセント A で利用すると。この場合に、並列インピーダンスの計算式に基づいて下記の式が得られる。

$$\frac{1}{Z - c' \times a} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2 + c' \times (b + c + d)}, \quad (7)$$

ここで、 Z_1 と $(Z_2 + c' \times (b + c + d))$ の部分が並列になるため、 Z は $c' \times a$ 、 Z_1 、 $c' \times (b + c + d)$ と Z_2 の合成インピーダンスとなる。そして Z_1 がどのコンセントで利用されるか分からないとき、下記の式を解くことによりそのコンセントとセンサの間の距離を推定することができる。

$$\frac{1}{Z - c' \times x} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2 + c' \times (D - x)}. \quad (8)$$

ここで、 $D = a + b + c + d$ である。また、

$$Z = R + jX = \frac{V}{I} = \frac{|V|}{|I|} e^{j\theta} = \frac{|V|}{|I|} (\cos \theta + j \sin \theta), \quad (9)$$

である。 θ は電流と電圧の位相差とする。前述したように、位相差の測定が困難であるため、式 8 を近似して用いる。すなわちセンサデータ、 $(|I|$ と $|V|)$ のみを用いて式 8 を解くことができる。ここで $|Z|$ は $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = |V|/|I|$ で表される。また $|V_{Z_1,0}|/|I_{Z_1,0}|$ を用いて、 $|Z_1|$ が計算できる、ここで $|I_{Z_1,0}|$ は配電盤と家電製品 $|Z_1|$ との間の距離がゼロのときに測定できる(すなわち、配線長による電圧降下が存在しない条件下)。しかし、 $|I_{Z_1,0}|$ を計測するのは不可能である。式 3 にある $f_1 \times |V|$ の部分は距離(式 3 における x) がゼロのときに計測された電流の大きさに対応するため、 $|Z_1| = \frac{1}{f_1}$ と仮定することができる。同様に、 $|Z_2| = \frac{1}{f_2}$ である。ここで、多くの電化製品ではその抵抗の成分がリアクタンス(コイルやコンデンサ)により十分に大きいと仮定し、 θ をゼロを仮定とすると、式 9 の近似式は下のように表される。

$$Z \simeq |V|/|I|(\cos 0 + j \sin 0) = |V|/|I| = |Z|. \quad (10)$$

これらから、式 8 に基づいて、 x を計算することができる。

$$\frac{1}{|V|/|I| - c' \times x} = \frac{1}{\frac{1}{f_1}} + \frac{1}{\frac{1}{f_2} + c' \times (D - x)}. \quad (11)$$

x は D より小さいときに、式 11 を利用することができる。配電盤からあるコンセントで利用された家電製品 $|Z_1|$ の距離が配電盤からコンセント D までの距離より長いときは、下記の式を用いる：

$$\frac{1}{|V|/|I| - c' \times D} = \frac{1}{\frac{1}{f_2}} + \frac{1}{\frac{1}{f_1} + c' \times (x - D)}. \quad (12)$$

すなわち x を求めたいとき、式 11 と 12 を解くことによって制約(例えば、式 11 で $x \leq D$) を満たす x の値を求める。3 つ以上の電化製品が回路上で利用されていた場合でも、合成インピーダンスの式を作成することで、それぞれの電化製品の距離を求めることができる。ただし、そのような場合は解析的に式を解くことが困難なため、数値計算を用いる。

以上に述べたように、ユーザは電化製品のインピーダンスに関する知識を持っていないと仮定し、 $\theta = 0$ としている。したがって、大きなコイル(またはコンデンサ)を有する電化製品の推定距離精度が低下する恐れがある。ここで、電化製品が大きなコイル(またはコンデンサ)を有しているか否かを知ることができると前提として、(例えば、「ドライヤー」「ミキサー」「掃除機」などの電化製品が大きなコイルを持っているとしている。)このような情報(大きなコイルを持っているかどうか)を用いて式 9 の θ を調整する。あるアドミタンス Y_1 をもつ電化製品とアドミタンス Y_2 をもつ他方の電化製品が回路上で利用されるとする。アドミタンスは電流と電圧の比率であり、 $Y = V/I$ ($Y = 1/Z$) で表される。ここで、電化製品 Y_1 は主に抵抗で構成されると仮定し、上述したように、 $|Z_1|$ は、対応する線形回帰式(式 3)を用いることによって求められる。また、電化製品 Y_2 が大きいコイルを持つと仮定し、 $Y_2 = G_2 + jB_2$ とする。ここで、 B_2 はサセプタンスであり、 $|B_2|$ を $r_b/|Z_2|$ と近似する。 r_b ($0 \leq r_b \leq 1$) は家電に含まれるアドミタンスにおけるコイル成分の比率であり、家電に含まれるコイルがどれくらい大きいを示す。 r_b が与えられていれば、 G_2 と B_2 が分かるため、式 8 を用いて x を求めることができる。 r_b は各家電(または家電種類)ごとに異なるため、各電化製品に対して異なる r_b の値を使用する必要がある。しかし、各電化製品の r_b の値を用意するコストは大きいため、ここでは事前に実験的に求められた単一の r_b の値を大きなコイルを有する全ての家電に使用する。 $(r_b$ の詳しい求め方は評価実験の章で説明する。)

5. 評価実験

5.1 データセット

6 つの異なる環境(研究室、廊下、教室、研究室外の踊り場、一戸建て、マンション)で評価のためのデータを収集した。環境 1, 2, 5, 6 では図 2 に示すようなセンサを配電盤に設置した。環境 3 と 4 ではフリーアクセスフロアを想定し、図 3 に示すセンサを用いた。環境 1 には 4 つのコンセントがある(センサから 5.75, 13.25, 18.85, 24.5 メートル)。環境 2 には 4 つのコンセントがある(センサから 17, 19.5, 22, 24.5 メートル)。環境 3 と 4 には 6 つのコンセントがあり(センサから 2, 4, 6, 8, 10, 12 メートル)、この環境の電線は延長ケーブルを連結したものである。環境 5 には 4 つのコンセントがあり(センサから 2, 10.5, 14.5, 19 メートル)、環境 6 には 3 つのコンセントがある(センサから 2.5, 6, 9 メートル)。

表 1 に実験に用いた電化製品を示す。それぞれの製品を用いて、それぞれの環境で 4 セッションのデータを収集した。それぞれのセッションでは、その環境の全てのコンセントで電化製品を利用した。そのうち 1 つのセッションは学習用データを取得した。すなわち、そのセッションでは

表 1 実験に用いた電化製品とその状態数.

ヘアドライヤー 1 (3)	ヘアドライヤー 2 (2)	ヒーター (1)
電子レンジ (1)	ミキサー (1)	掃除機 (2)
電気ケトル (1)	アイロン (1)	トースター (1)
ホットプレート (1)	ノート PC (n/a)	ライト (1)
スマートフォン (n/a)	TV (n/a)	加湿器 (1)
冷蔵庫 (n/a)		

家電の全ての状態で電流データを収集した。残り 2 つのセッションではその 1 つの電化製品のみを稼働した。最後の 1 つのセッションでは 2 つの家電を同時に稼働した。

5.2 イベント分類の結果

まず手短かにイベント分類の結果について説明する。評価には 'leave-one-session-out' 交差検定を用いた。すなわち、1 つのセッションのデータをテストデータとする交差検定である。認識結果の平均 F 値は 92.0% であり、高い精度を達成した。「アイロン オン」の F 値が 69.2% と低く、トースターのイベントと混同されていた。

5.3 距離推定の結果

距離推定の評価では以下の 2 つの手法を検証する。

- 回帰分析を用いた手法 (*Reg* 手法): この手法では電化製品ごとに用意した回帰式を用いて距離を推定する。2 箇所以上のコンセントでの事前収集が必要である。
- 一箇所のみでの事前収集を用いた手法 (*Single* 手法): この手法は電圧降下式を用いて距離を推定する。1 つのコンセントのみでの事前データ収集が必要である。

5.3.1 家電の単独利用の結果

まず *Reg* 手法の精度の結果に関して説明する。図 7 は、3 つのコンセントで事前計測したとき ($n = 3$) の、それぞれの電化製品の平均絶対誤差 (Mean absolute error: MAE) を示す。図に示すように、*Reg* 手法は多くの電化製品において高い精度を達成しており、その誤差の多くが 2 メートル以下である。これは、WiFi などの電波を用いた位置推定手法の誤差とほぼ同程度である。ミキサーの誤差が大きいが、これはミキサーのモータ負荷がミキサーの内容物に応じて変化する、すなわち、電流が変化するためと考えられる。また、掃除機やテレビの誤差も大きかった。これらの電化製品も状況に応じて出力 (電力消費) が変化する。提案手法はこのような離散的な出力をもたないような電化製品の扱いが不得手であることが分かる。

図 8 は回帰式を求めるために事前計測を行うコンセントの数を変えたときの誤差の推移である。図に示すとおり、 n を増やすと誤差は減少するが、誤差は数センチ程度しか変わらなかった。 ($n = 4$ のとき、環境 6 (3 つのコンセントがある環境) では 3 つのコンセントのみ用いている。)

図 7 は *Single* 手法の平均絶対誤差も示している。ただし、この結果は 2 番目のコンセントを用いて事前計測をし

たものである。(例えば図 6 では 2 番目のコンセントはコンセント **B** に対応する。) *Single* 手法は 1 つのコンセントでの事前計測のみを必要とするが、*Reg* ($n = 3$) と比べても多くの家電において誤差がほとんど変わらないことが分かる。また、平均誤差も 5cm しか変わらなかった。

図 9 は *Single* における事前計測を行うコンセントの位置を変えたときの平均絶対誤差である。(環境 6 の 4 番目の結果に関しては、3 番目のコンセントを用いている。) 図 9 に示すように、*Single* の誤差は不安定であり、事前計測を行うコンセントによって結果が大きく異なることが分かる。これは、事前計測を 1 箇所のみで行なっていないため、事前計測の際のセンサデータにエラーがあった場合、その影響を大きく受けるためと考える。

表 2 提案手法の平均絶対誤差 (m).

	MAEs 単独稼働	MAEs 同時稼働	MAEs 平均
<i>Reg</i> ($n = 3$)	2.43	3.35	2.89
<i>Single</i> (2nd)	2.84	4.25	3.54
<i>Reg</i> ($n = 3$) w/ θ adjustment	2.43	2.73	2.58
<i>Single</i> ($n = 2$) w/ θ adjustment	2.55	2.62	2.58

5.3.2 家電の同時利用の結果

表 2 は、複数の電化製品を同時に利用した場合に得られる平均絶対誤差を示す (同時稼働)。結果が示すように、 r_b の調整を行わなかった場合には、複数の電化製品の同時利用に関する平均絶対誤差は家電の単独稼働に関する結果に比べて遥かに劣る。これは大きいコイルを持つ家電製品に関する平均絶対誤差が大きかったためである。(本研究の定義では、大きいコイルやコンデンサを持つ電化製品はドライヤー、電子レンジ、ミキサー、掃除機、ノート PC、スマートフォン、テレビなどである) ここでは、 r_b の調整の効果を分析する。図 10 は r_b を変化させたときの電化製品の同時利用に関する平均絶対誤差の推移を示している。図に示すように、 r_b を調整することで推定誤差を大きく減らすことができる。 $r_b = 0.21$ を使用した場合、提案手法では最も低い平均誤差を達成していた。表 2 は $r_b = 0.21$ を使用したときの結果も示している。 r_b の調整を行った場合、同時利用に関する平均絶対誤差は r_b の調整なしに比べて遥かに低い。今後は、適切な r_b の値は電化製品の種類によって異なることを考慮する必要があると考える。例えば、掃除機では主にモータで構成されているが、ドライヤーはモータと電熱線で構成されている。今後の課題として、電化製品の種類ごとに r_b 値を用意することを考えている。

6. おわりに

本研究では、電線に流れる電流をセンシングすることにより電化製品の屋内位置を推定する新しい手法を提案し

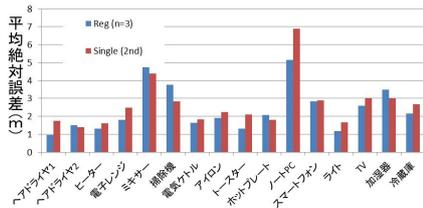


図 7 Reg (n = 3) と Single (2nd) の距離推定結果の電化製品ごとの平均絶対誤差。

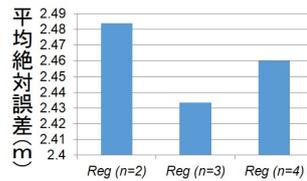


図 8 Reg 手法における事前計測するコンセントの数を変化させたときの平均絶対誤差。

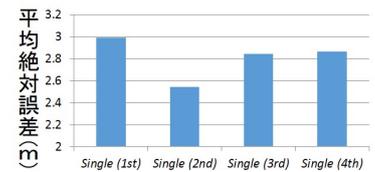


図 9 Single 手法における事前計測するコンセントの位置を変化させたときの平均絶対誤差。

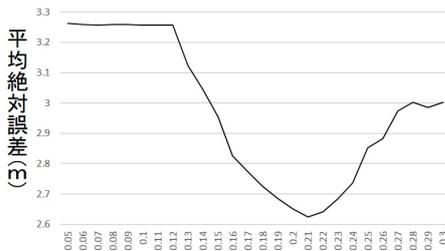


図 10 Single(2nd) 手法における複数家電を同時利用する場合に r_b を変化させたときの平均絶対誤差の推移。

た。提案手法では電線による電圧降下現象を利用して、配電盤から電線回路中のコンセントに差し込まれた電化製品との間の距離を推定する。提案手法を用いることで、どの家電がどの場所のコンセントで使われているがどうかを自動的に認識でき、その情報に基づき家電利用位置アウェアなサービスを提供することができると思う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26730047 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Bao, L. and Intille, S. S.: Activity recognition from user-annotated acceleration data, *Pervasive 2004*, pp. 1–17 (2004).
- [2] Beigl, M., Schmidt, A., Lauff, M. and Gellersen, H.-W.: The ubicompbrowser, *4th ERCIM Workshop on User Interfaces for All* (1998).
- [3] Cettolo, M. and Vesco, M.: Efficient audio segmentation algorithms based on the BIC, *ICASSP 2003*, Vol. 6, pp. 537–540 (2003).
- [4] Chen, S. and Gopalakrishnan, P.: Speaker, environment and channel change detection and clustering via the Bayesian Information Criterion, *DARPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop* (1998).
- [5] Kim, Y., Schmid, T., Charbiwala, Z. and Srivastava, M.: ViridiScope: design and implementation of a fine grained power monitoring system for homes, *UbiComp 2009*, pp. 245–254 (2009).
- [6] Kong, Q. and Maekawa, T.: Identifying Outlets at which Electrical Appliances are Used by Electrical Wire Sensing to Gain Positional Information about Appliance Use, *UbiComp 2014* (2014).
- [7] Lai, C.-F., Lin, M., Wen, Y., Ma, Y.-W. and Chen, J.-L.: Applied Lightweight Parallel Multi-Appliance Recogni-

- tion on Smart Meter, *International Conference on Computational Science and Engineering*, pp. 361–366 (2012).
- [8] Lai, Y.-X., Lai, C.-F., Huang, Y.-M. and Chao, H.-C.: Multi-appliance recognition system with hybrid SVM/GMM classifier in ubiquitous smart home, *Information Sciences*, Vol. 230, pp. 39–55 (2012).
- [9] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F. et al.: Place lab: Device positioning using radio beacons in the wild, *Pervasive 2005*, pp. 116–133 (2005).
- [10] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and Liu, J.: Survey of wireless indoor positioning techniques and systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 37, No. 6, pp. 1067–1080 (2007).
- [11] Maekawa, T. and Watanabe, S.: Unsupervised Activity Recognition with User’s Physical Characteristics Data, *Int’l Symp. on Wearable Computers*, pp. 89–96 (2011).
- [12] Patel, S., Truong, K. and Abowd, G.: Powerline positioning: A practical sub-room-level indoor location system for domestic use, *UbiComp 2006*, pp. 441–458 (2006).
- [13] Patel, S., Robertson, T., Kientz, J., Reynolds, M. and Abowd, G.: At the flick of a switch: Detecting and classifying unique electrical events on the residential power line, *UbiComp 2007*, pp. 271–288 (2007).
- [14] Philipose, M., Fishkin, K. and Perkowski, M.: Inferring activities from interactions with objects, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 3, No. 4, pp. 50–57 (2004).
- [15] Popleteev, A., Osmani, V. and Mayora, O.: Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations, *PerCom 2012*, pp. 171–179 (2012).
- [16] Priyantha, N. B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The cricket location-support system, *MobiCom 2000*, pp. 32–43 (2000).
- [17] Quinlan, J. R.: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann (1993).
- [18] Tapia, E., Intille, S. and Larson, K.: Activity recognition in the home using simple and ubiquitous sensors, *Pervasive 2004*, pp. 158–175 (2004).
- [19] Tapia, E., Intille, S. and Larson, K.: Portable wireless sensors for object usage sensing in the home: challenges and practicalities, *European Conference on Ambient Intelligence 2007*, pp. 19–37 (2007).
- [20] Ubisense: Ubisense Web Site, <http://www.ubisense.net/>.
- [21] Want, R., Hopper, A., Falcao, V. and Gibbons, J.: The active badge location system, *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, Vol. 10, No. 1, pp. 91–102 (1992).
- [22] Zebra Technologies: Zebra Technologies Web Site, <http://www.zebra.com/>.