

屋内電気システムセンシングを用いた電化製品が利用されているコンセントの推定手法

孔全^{1,a)} 前川 卓也¹

受付日 2014年6月30日, 採録日 2014年11月10日

概要: 本論文では, 屋内環境に敷設された電気システムを用いて電気製品が接続されているコンセントを推定する新しい手法, すなわち, 電化製品がどの位置のコンセントで利用されているか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. 配線図が既知の場合, 交流電源と電化製品が接続されているコンセント間の距離からどのコンセントに電化製品が接続されているか分かる. 本論文が提案する技術は, 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などの基盤的役割を担うと考える. たとえば, 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

Identifying Outlets at which Electrical Appliances are Used by Sensing Indoor Electrical System

QUAN KONG^{1,a)} TAKUYA MAEKAWA¹

Received: June 30, 2014, Accepted: November 10, 2014

Abstract: This paper presents a new method for estimating which outlet an electrical appliance is plugged into by using the electrical wiring installed in the building. By making use of the voltage drop caused by the wire, we can estimate the distance between the sensor and an electrical appliance plugged into an outlet on an electrical circuit. The distance can be used for determining which outlet an electrical appliance is plugged into if we have a floor plan of an environment. 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. 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 (たとえば超音波, 無線 LAN, UWB, 赤外

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 565-0871, Japan

^{a)} kong.quan@ist.osaka-u.ac.jp

線など)とユーザが持つ受信機により推定を行う[1]。行動認識および屋内位置推定技術はその用途が幅広く、たとえば、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、現代社会では我々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[2]、[3]。しかし、センサノードの導入やメンテナンスコスト、たと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[4]。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、日常行動の中で我々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。具体的には本論文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、電化製品がどのコンセントに接続されているかを推定する。このとき、電圧降下という現象を用いて、AC電源から電化製品までの電線の距離を推定することにより、コンセントの推定を行う。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(たとえば、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(たとえば、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[5](たと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、本研究における利用される電化製品がどのコンセントに接続されているか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。これを実現するための前提条件として、まず回路中に流れる電流と交流電源の電圧をモニタリングする必要がある。また、交流電源と各コンセントの間の距離から利用されているコンセントの位置を特定するため、どのように電線が配線され、どこにセンサやコンセントが配置されているかが記載されたフロアプランが必要である。これらの情報を用いて、電化製品が接続されるコンセントを推定される。

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延びる電線回路中の電化製品が接続されるコンセントの間の距離を推定する。これにより、屋内環境のフロアプランを用いて、電化製品がどのコンセントに接続されているかが分かる。センサと家電が利用するコンセント間の距離を推定するめに、本論文では電線の抵抗(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離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、センサとコンセントの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、配電盤と電化製品が接続されるコンセントの間の距離を推定する提案手法ではコンセントを特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。たとえば、ユーザは夕食を準備するために、同じ部屋で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、キャリブ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ブ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させる手法も提案しているが、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とおりである。(1) 家庭の電気システムを用いることによって電化製品がどのコンセントに接続されているか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が接続されるコンセントを推定する研究はこれまでに行われていない。本論文の以降の構成は以下のとおりである。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、電化製品が接続されるコンセントの推定手法を説明し、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 電氣的イベントセンシング

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。たとえば、文献 [3] 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。また、いくつかの研究では、電源タップの形状を模したセンサノードを用いて、電化製品の利用を認識している [7], [8]。電源タップ型センサノードは電源コンセントを備えるため、そのコンセントに接続する他の電化製品に供給される電流をセンシングできる。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位を行うことが多い。たとえば、赤外線 [9], 超音波 [10], RFID [11], UWB [12], FM ラジオ電波 [13], WiFi [14] 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、たと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 [15] 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。このシステムでは、位置補足対象に信号受信機を添付する必要があるが、システムの導入コストが大きい。一方本研究では、家庭内の電気システムを観測することで、位置補足対象（家電）の利用位置をセンサなどの受信機を添付することなく推定できる。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

図 1 は提案手法の全体的な概要を示す。本研究の目的は家電がどのコンセントで利用されているかを推定することである。この目的を実現するために、まず利用されている電化製品を認識したあと、配電盤と電化製品が接続されるコンセントの間の距離を推定する。これらの副目標を達成するため、本研究では電流センサを共通して用いる。

電化製品の利用の認識には機械学習を用いるため、あらかじめ電化製品を利用した際に得られる電流データを用意する必要がある。電化製品に複数の状態（強や弱など）がある場合は、その状態ごとに電流データを用意する。

距離の推定には、あらかじめ電化製品ごとにある程度の数の配電盤からの距離が既知であるコンセントにおいて計測したキャリブレーション用電流データが必要となる。電化製品に複数の状態がある場合は、その状態ごとに電流データを用意する。さらに、配電盤の電圧値を計測するセンサが必要となる。最後に、推定された距離に最も近い距離にあるコンセントの距離を最終的な出力とする（たとえば、配電盤から 2m と 4m の距離にコンセントがあり、電流センサからの推定距離が 3.5m の場合、3.5m に最も近い 4m を最終的な出力とする）。すなわち、どのコンセントに家電が接続されているかを決定する。そのため、配電盤から各コンセントまでの距離の情報が必要である。

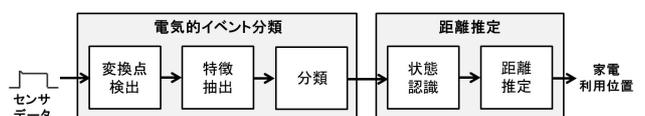


図 1 提案手法の概要

Fig. 1 Overview of our positioning method.



図 2 配電盤に設置された電流センサ

Fig. 2 Current sensor clamped around wire in electrical panel.

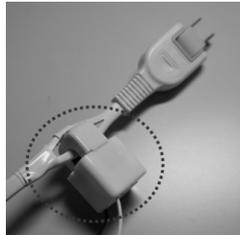


図 3 延長ケーブルに設置された電流センサ

Fig. 3 Current sensor attached to short extension cord.

3.2 電氣的イベントの分類

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 [16] や [17] を参照されたい。

3.2.1 概要

図 1 左部は電氣的イベント分類の概要を示す。電気系統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（たとえば、「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）。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。

3.2.2 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 2,000 Hz 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。

3.2.3 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

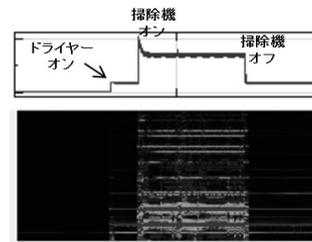


図 4 ヘアドライヤーと掃除機が利用されたときのセンサデータの例
Fig. 4 Sensor data obtained when hair-dryer and vacuum cleaner were used.

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 [18], [19] を参照されたい。

3.2.4 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とおりとした。

- 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とら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 (オフはオンの後にのみ発生する)。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。

3.2.5 特徴ベクトルの分類

特徴ベクトルを適切なクラス (たとえば、「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 [20]。

3.3 距離推定手法

上述したとおり、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持つ。たとえば、多くのヘアドライヤは「強」や「弱」の状態を持ち、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。

3.3.1 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。

3.3.2 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, ... を持つ電線 (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 状態のみを持つ電化製品のインピーダンスが $Z_1 = R_1 + jX_1$ 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。

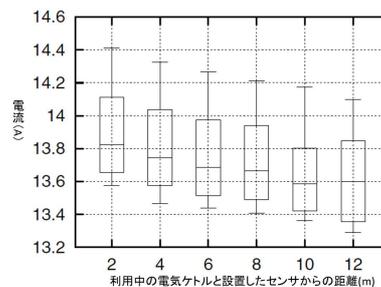


図 5 異なるコンセントで電気ケトルを利用したときの電流データの箱ひげ図

Fig. 5 Box plot showing distributions of electric kettle sensor data obtained at different distances.

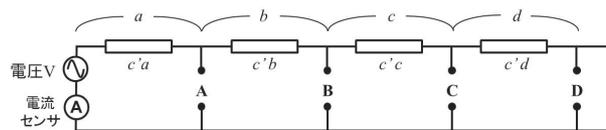


図 6 電気系統の等価回路図

Fig. 6 Example circuit of electric wire.

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 切片を表す (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。

3.3.3 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いえるため、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 とお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。

3.3.4 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。たとえば、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 が 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(たとえば、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前提として(たとえば、「ドライヤ」「ミキサ」「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 を持つ電化製品とアドミタンス Y_2 を持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、対応する線形帰帰式(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 が大きな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かを示す。 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ので、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すべ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)。

4. 評価実験

4.1 データセット

1章で述べたとおり、本提案手法が想定する多くのアプリケーションは一般家庭を想定したものであるため、家庭環境でデータを収集する。さらに、可能な限り多様な環境で手法の有効性を確認する必要がある。そのため、本論文では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。配電盤とコンセント間の距離は環境の配線図を用いて計測した。延長ケーブルに設置したセンサを用いた場合は、延長ケーブルの長さを計測することでセンサとケーブル上のコンセントとの距離を求めた。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は実験に利用した家電を示す。これらの家電は生活の中で頻繁に利用されるもので、主に抵抗成分からなる家電と、大きなリアクタンス成分 (コイルやコンデンサ) がからなる家電が含まれるように、一般的な家電の中から選択した (コイルやコンデンサを含む電化製品はヘアドライヤ、電子レンジ、ミキサ、掃除機、ノートPC、スマートフォン、テレビ、冷蔵庫など9種類、残りの7種類はリアクタンス成分なしあるいは小さい家電である)。この2つのタイプを合わせて合計16種類の電化製品を実験に用いた。文献 [3] では10種類、文献 [4] では19種類の家電を実験に用いており、16種類を用いる本研究も、関連研究に比べて十分な数の家電を利用していると考えられる。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、その環境のすべて

表 1 実験に用いた電化製品とその状態数

Table 1 Appliances and the number of their states.

ヘアドライヤ 1 (3)	ヘアドライヤ 2 (2)	ヒータ (1)
電子レンジ (1)	ミキサ (1)	掃除機 (2)
電気ケトル (1)	アイロン (1)	トースタ (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)		

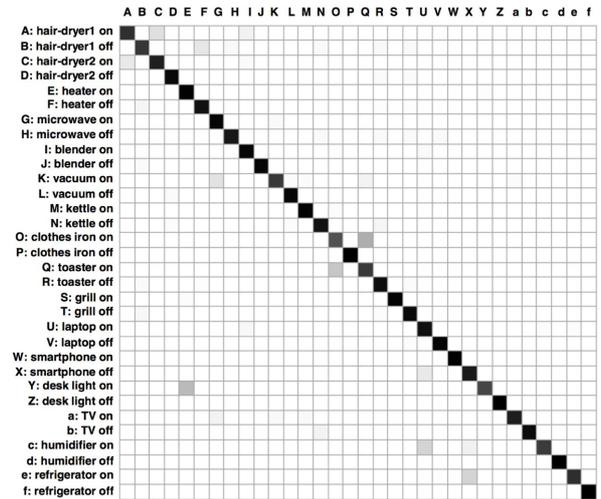


図 7 電氣的イベント分類の混同行列

Fig. 7 Visual confusion matrix for electrical event classification.

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家電のすべ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させた。最後の1つのセッションでは2つの家電を同時に稼働させた。

4.2 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。図7の混同行列は、電氣的イベントの分類結果を示す。認識結果の平均F値は92.0%であり、高い精度を達成した。分類精度が最も低かった「アイロン オン」のF値は69.2%であり、多くの「アイロン オン」イベントが「トースタ オン」に誤分類されていた。これらの電化製品は主に電熱線から構成されており、センサデータが類似していた。

4.3 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カ

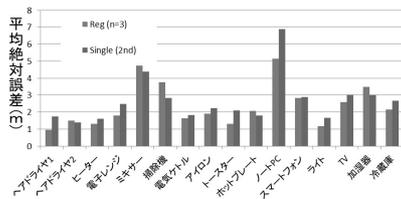


図 8 Reg (n = 3) と Single (2nd) の距離推定結果の電化製品ごとの平均絶対誤差

Fig. 8 MAEs of appliances for Reg (n = 3) and Single (2nd).

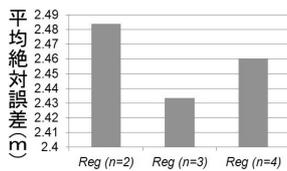


図 9 Reg 手法における事前計測するコンセントの数を変化させたときの平均絶対誤差

Fig. 9 Transitions of MAEs for Reg when we changed the number of outlets used to compute the regression lines.

所以上のコンセントでの事前収集が必要である。

- 1 カ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。

4.3.1 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 8 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 や RFID 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 [21]。ミキサの誤差が大きいが、これはミキサのモータ負荷がミキサ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持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 9 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。事前計測の回数が少ないほど、エンドユーザによる少ないコストでシステムを導入できる。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。これは、エンドユーザが事前計測を行うコンセントの位置が計測精度にどの程度影響を及ぼすかを検証するものである (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 8 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 (たとえば図 6 では 2 番目のコンセントはコ

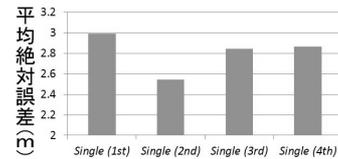


図 10 Single 手法における事前計測するコンセントの位置を変化させたときの平均絶対誤差

Fig. 10 Transitions of MAEs for Single when we changed the position of outlets.

表 2 提案手法の平均絶対誤差 (m)

Table 2 MAEs (meters) for proposed methods.

	MAEs 単独稼働	MAEs 同時稼働	MAEs 平均
Reg (n = 3)	2.43	3.35	2.89
Single (2nd)	2.84	3.24	2.89
Reg (n = 3) w/ θ adjustment	2.43	2.73	2.58
Single (n = 2) w/ θ adjustment	2.55	2.62	2.58

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 10 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)。これは、エンドユーザが事前計測を行うコンセントの位置が計測精度にどの程度影響を及ぼすかを検証するものである。図 10 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カ所のみで行っていないため、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。

4.3.2 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はるかに劣る。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 12 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

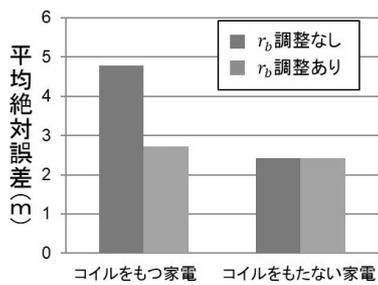


図 11 コイルを持つ家電と持たない家電における r_b を調整した効果 (Single (2nd))

Fig. 11 Effects of r_b adjustment on appliances with a large coil and those without a large coil (Single (2nd)).

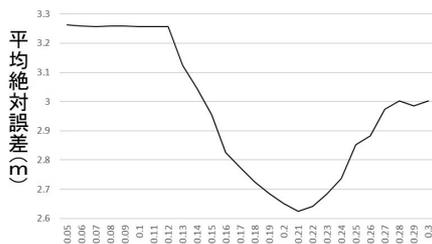


図 12 Single (2nd) 手法における複数家電を同時利用する場合に r_b を変化させたときの平均絶対誤差の推移

Fig. 12 Transitions of the MAE for Single (2nd) related to the multiple appliances situation when we changed r_b .

用したときの結果も示している。また、図 11 は大きいコイル (リアクタンス成分) を持つ家電と持たない家電に関して、 r_b の調整を行わなかった場合と行った場合の平均絶対誤差を示す。図に示すように、コイルを持つ家電に対して、 r_b の調整を行った場合の平均絶対誤差は大幅に低減されており、 r_b の調整の効果が確認できる。しかし、同時稼働の場合の平均絶対誤差は単独稼働の場合に比べてまだ大きくなっている。同時稼働する家電の数が増えるほど誤差も大きくなってしまふと考えられるため、同時稼働の誤差を低減されることは今後の重要な課題の 1 つである。今後は、リアクタンス成分の大きい家電に共通して用いている r_b を電化製品の種類ごとに用意し、単独稼働時と同様の精度を達成することを目指す。

4.3.3 コンセント間の距離の影響

表 3 は環境ごとの絶対平均誤差を示す。結果に示すように、環境 1 および 5 の誤差は環境 2, 3, 4 および 6 に比べて大きい。これは環境 1 と 5 のコンセント間の距離が大きいためと考える。前述したように、提案手法はまずセンサからの距離を推定したあとその距離に最も近い距離にあるコンセントの距離を最終的な出力とするため、コンセントの間隔が大きい環境 1 や 5 ような環境においてコンセントの識別が間違った場合、絶対平均誤差が大きくなる。

4.3.4 利用コンセントの識別

本項では提案手法による、コンセントの識別精度を検証する (推定された距離と各コンセントの配電盤からの距離

表 3 Reg 手法 (家電単独稼働) における環境ごとの平均絶対誤差 (メートル)

Table 3 MAEs (meters) of each environment for Reg (single appliance situation).

	MAEs for Reg (n = 3)
環境 1	2.95
環境 2	2.72
環境 3	1.80
環境 4	2.17
環境 5	3.45
環境 6	2.18

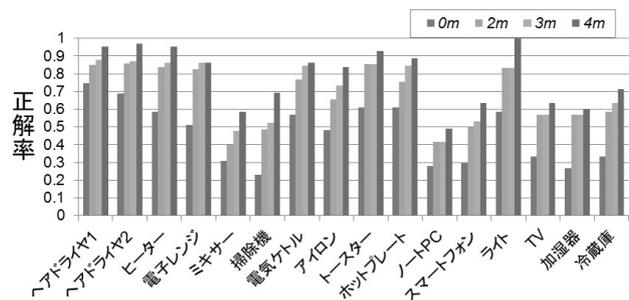


図 13 コンセント識別結果：誤差 0, 2, 3, および 4 m 以内の精度
Fig. 13 Outlet identification results: precisions within 0, 2, 3, and 4 meters.

から、どのコンセントに電化製品が接続されているかが識別できる)。図 13 は接続されているコンセントの識別精度を示す。また、誤差 2, 3 および 4 m 内の識別精度も示す。たとえば、誤差 2 m 以内の「ヘアドライヤ 1」の識別精度は約 85% になっているが、これは「ヘアドライヤ 1」の利用のうち 85% が正解のコンセントの 2 m 以内にあるコンセントとして識別されていたことを示す。すなわち、図 13 の 0 m の結果は、厳密に正しいコンセントとして識別されていた割合 (精度) を示す。図に示すように、多くの電化製品の 2 m 以内の精度は約 70%~80% を達成することができたが、0 m 以内の精度は高いものでも 70% 程度となっており、さらなる精度向上が必要であると考えられる。特にミキサーやノート PC などのセンサデータの変動が激しい家電の精度は低かったため、電流データのさらなるノイズ処理が必要であると考えられる。

5. 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がどのコンセントで利用されているかを推定する新しい手法を提案した。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か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

ると考える。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 26730047 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P. and Liu, J.: Survey of wireless indoor positioning techniques and systems, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol.37, No.6, pp.1067–1080 (2007).

[2] Tapia, E., Intille, S. and Larson, K.: Activity recognition in the home using simple and ubiquitous sensors, *Pervasive 2004*, pp.158–175 (2004).

[3] 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).

[4] 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).

[5] Beigl, M., Schmidt, A., Lauff, M. and Gellersen, H.-W.: The ubicomp browser, *4th ERCIM Workshop on User Interfaces for All* (1998).

[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] Lifton, J., Feldmeier, M., Ono, Y., Lewis, C. and Paradiso, J.: A platform for ubiquitous sensor deployment in occupational and domestic environments, *IPSN 2007*, pp.119–127 (2007).

[8] Jiang, X., Dawson-Haggerty, S., Dutta, P. and Culler, D.: Design and implementation of a high-fidelity AC metering network, *IPSN 2009*, pp.253–264 (2009).

[9] Want, R., Hopper, A., Falcão, V. and Gibbons, J.: The active badge location system, *ACM Trans. Information Systems (TOIS)*, Vol.10, No.1, pp.91–102 (1992).

[10] Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The cricket location-support system, *MobiCom 2000*, pp.32–43 (2000).

[11] Zebra Technologies: Zebra Technologies Web Site, available from <http://www.zebra.com/>.

[12] Ubisense: Ubisense Web Site, available from <http://www.ubisense.net/>.

[13] Popleteev, A., Osmani, V. and Mayora, O.: Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations, *PerCom 2012*, pp.171–179 (2012).

[14] 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).

[15] 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).

[16] 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).

[17] 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).

[18] 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).

[19] Cettolo, M. and Vescovi, M.: Efficient audio segmentation algorithms based on the BIC, *ICASSP 2003*, Vol.6, pp.537–540 (2003).

[20] Quinlan, J.R.: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann (1993).

[21] Luo, Y., Hoeber, O. and Chen, Y.: Enhancing Wi-Fi fingerprinting for indoor positioning using human-centric collaborative feedback, *Human-centric Computing and Information Sciences 2013*, p.3:2 (2013).



孔全 (学生会員)

2014年3月大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年4月より同大学院研究科博士後期課程在学中。情報処理学会2013, 2014年度国際発表奨励賞(UBI研究会)受賞。行動認識や, ホームセンシングに関する

研究に従事。



前川 卓也 (正会員)

2003年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2006年同大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2012年4月より大阪大学大学院情報科学研究科准教授。2013年8~10月スイス連邦工科大学ローザンヌ校招聘教授。博士(情報科学)。本会2010年度山下記念研究賞, 日本データベース学会2013年度上林奨励賞等受賞。ACM, IEEE, 電気学会, 日本データベース学会各会員。