

テクニカルノート

無線フレームの観測に基づく IoT 機器の把握支援システム

江川 悠斗^{1,a)} 谷口 義明^{2,3,b)} 井口 信和^{2,3,c)}

受付日 2020年11月27日, 採録日 2021年2月2日

概要: Wi-Fi ネットワークを介して様々な IoT 機器がインターネットに接続されているが、小規模組織や家庭では IoT 機器が適切に管理されておらず、十分なセキュリティ対策が講じられていない場合がある。管理されていない IoT 機器を管理するためには、まず、無線 LAN 内の IoT 機器を把握する必要がある。そこで本稿では、ノート PC のみを用いて無線 LAN 内の IoT 機器の把握を支援できるシステムを提案、開発する。提案システムは、まず、無線 LAN 内の無線フレームを観測することにより、無線 LAN 内に設置された IoT 機器のアドレス一覧を取得する。また、IoT 機器から送信される無線フレームの受信電波強度を利用して、システム利用者がシステム上に表示されたアドレスと実際の IoT 機器の対応付けを行う際の補助を行う。さらに、利用者が所在を把握していない IoT 機器がある場合は、その IoT 機器の設置場所に利用者を誘導する。本稿では、研究室内に設置した IoT 機器を利用した実験により、提案システムを用いて IoT 機器の把握を支援できることを示す。

キーワード: IoT 機器, 管理, 受信電波強度, ナビゲーション, 無線 LAN

IoT Device Grasp Support System Based on Observation of Wireless Frames

YUTO EGAWA^{1,a)} YOSHIKI TANIGUCHI^{2,3,b)} NOBUKAZU IGUCHI^{2,3,c)}

Received: November 27, 2020, Accepted: February 2, 2021

Abstract: A variety of IoT devices have been widely used. However, IoT devices are sometimes unmanaged and may be left without sufficient security measures. In this paper, we propose and develop an IoT device grasp support system. Our system operates on a laptop PC and obtains the list of IoT device addresses by monitoring and analyzing wireless frames. To support association between device addresses and actual IoT devices, we introduce a device association support function to our system by utilizing RSSI of wireless frames. In addition, we introduce a navigation function to find the installation location of IoT devices. We evaluate the feasibility of our proposed system through experiments where multiple IoT devices are located in a room.

Keywords: IoT device, management, RSSI, navigation, wireless LAN

1. はじめに

Wi-Fi ネットワークを介して様々な機器がインターネットに接続されている。Wi-Fi 機器は、ノート PC などのモバイル端末と AI スピーカなどの IoT 機器に分類できる。モバイル端末と比較して IoT 機器は管理されにくく [4], 十分なセキュリティ対策が行われずに放置される場合がある。たとえば、IoT 機器の設置者が機器を設置したことを

本稿は文献 [1], [2], [3] を発展させたものである。

¹ 近畿大学大学院総合理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kindai University, Higashiosaka, Osaka 577-8502, Japan

² 近畿大学理工学部情報学科
Faculty of Science and Engineering, Kindai University, Higashiosaka, Osaka 577-8502, Japan

³ 近畿大学情報学研究所
Informatics Research Institute, Kindai University, Higashiosaka, Osaka 577-8502, Japan

a) egawa0196@gmail.com

b) y-tanigu@info.kindai.ac.jp

c) iguchi@info.kindai.ac.jp

忘れてしまう場合が考えられる。また、中小企業、研究室、家庭などの小規模組織において、IoT 機器の設置者が退職、卒業などでいなくなり、管理者不在の IoT 機器が残される場合も考えられる。管理されていない IoT 機器はサイバー攻撃の被害を受けるだけでなく、他の機器に危害を与える可能性もある [5]。管理されていない IoT 機器を管理するためには、まず、無線 LAN に接続されている IoT 機器を把握する必要がある。ここで、本稿における IoT の把握とは、無線 LAN に接続されている IoT 機器がどのような機器で、どこに設置されており、どのようなアドレス (IP アドレス、MAC アドレス) を使用しているかといった情報を取得することである。IoT 機器を把握することにより、ファームウェアの更新、不要な IoT 機器の撤去などの対策を行うことができる。

無線 LAN に接続された IoT 機器を可視化するための製品はある [6], [7] が、高価である、専門知識が必要である、専用の機器の設置が必要であるなど、中小企業や家庭での使用に必ずしも適していない。また、Wi-Fi アクセスポイントには通常、アクセスポイントに接続されている Wi-Fi 機器のアドレス一覧を表示する機能があるが、管理者の IT スキルが不十分である、アクセスポイントが適切に管理されていないなどの理由により、管理者がアクセスポイントを操作できない場合がある。さらに、これらの製品やアクセスポイントでは Wi-Fi 機器のアドレス一覧を確認することはできるが、アドレスと実際の機器を対応付ける、そのアドレスを持つ機器が物理的にどの位置にあるかを把握するような用途には利用できない。

そこで本稿では、無線フレームの観測に基づき、安価に、IoT 機器の把握を支援できるシステム (以下、本システム) を提案、開発する。本システムは標準的なノート PC 上で動作するソフトウェアとして実現されている。したがって、専用の機器の設置やアクセスポイントの設定変更などの作業は不要である。また、すでに組織や家庭において保有しているノート PC がある場合、保有するノート PC に本ソフトウェアをインストールするだけで利用できる。

本システムの概要を図 1 に、GUI の一例を図 2 に示す。本システムを利用する場合、利用者はまず、図 1 の手順 (1) に示されるように、IoT 機器一覧表示機能を用いて対象とする無線 LAN 内に存在する IoT 機器のアドレス一覧を取得する。IoT 機器一覧表示機能は、本システムの動作するノート PC 上で受信可能な無線フレームを取得、解析することにより、無線 LAN 内の IoT 機器のアドレス一覧を取得し、システム上に表示する。

続いて利用者は、図 1 の手順 (2) に示されるように、表示アドレス対応付け補助機能を用いて、本システムの動作するノート PC を持ち移動しながら、所在を把握している IoT 機器とシステム上に表示されているアドレスの対応付けを行う。この機能は、利用者の移動により IoT 機器から

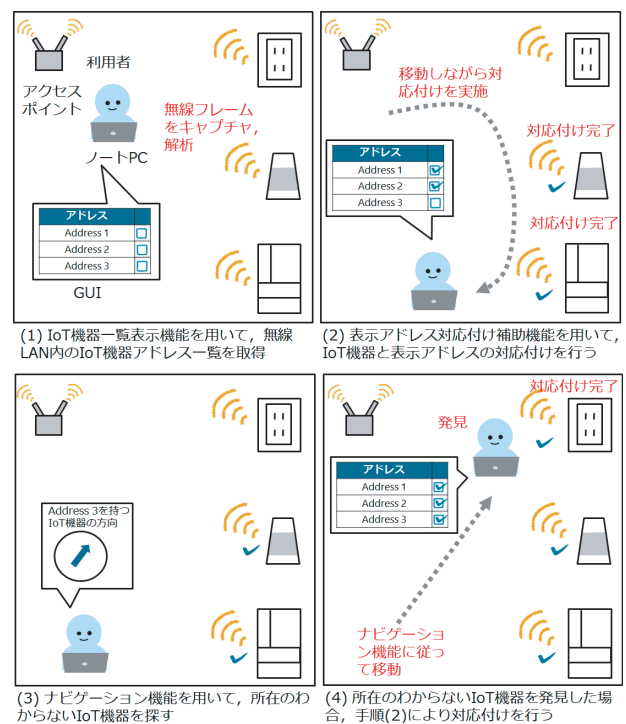


図 1 提案システムの概要
Fig. 1 Overview of proposed system.

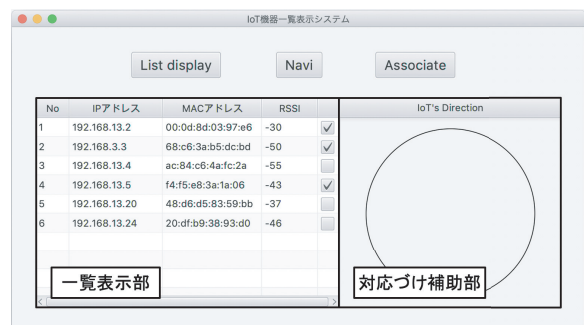


図 2 システムの GUI
Fig. 2 GUI of proposed system.

送信される無線フレームの受信電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) が変化することを利用して、対応付け作業を補助する。IoT 機器と表示アドレスの対応付けが完了した場合、利用者は GUI 上の該当のアドレスの横に表示されるチェックボックスにチェックを入れる。

対応付け完了後に、IoT 機器と対応付けの行われなかったアドレスが残る場合、利用者が所在を把握していない IoT 機器があると考えられる。図 1 の例では、手順 (2) において Address 3 の対応付けが行われていない。その場合、利用者は、図 1 の手順 (3) に示されるように、ナビゲーション機能を用いて所在を把握していない IoT 機器を探す。ナビゲーション機能の表示に従って移動し、対応付けの行われていない IoT 機器を発見した利用者は、図 1 の手順 (4) に示されるように、再度、表示アドレス対応付け補助機能を用いて対応付けを行う。このように、本システムを用い

ることにより、無線 LAN 内の IoT 機器の把握を支援できる。本稿では、研究室実験により本システムを評価する。

本稿の以降の構成は以下のとおりである。まず、2 章で関連研究について述べる。3 章で本稿で提案するシステムについて述べ、4 章で評価を行う。最後に 5 章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

無線 LAN 内の IoT 機器の管理のために無線アクセスポイントに搭載されている無線 IDPS (Intrusion Detection and Prevention System) を利用する場合がある。無線 IDPS を用いることにより、無線ネットワークのトラフィック監視や解析、疑わしい活動の特定などの実施も可能である [8]。しかし、小規模な企業や家庭では、ネットワークの管理者がいないことや安価なアクセスポイントを利用しているなどの理由により、アクセスポイントを用いた IoT 機器の管理が行えない場合がある。一方、本研究で提案するシステムでは、ノート PC のみで IoT 機器の管理を支援できる。

無線フレームの受信電波強度をナビゲーション [9] や測位 [10], [11]、混雑度推定 [12], [13] などに利用する取り組みは多数ある。たとえば、文献 [9] では複数の Wi-Fi アクセスポイントから送信される無線フレームの受信電波強度を使って利用者端末の位置を推定することを考えている。文献 [10] では、BLE ビーコンから送信される無線フレームの受信電波強度を使って、利用者端末の位置と移動方向を推定することを検討している。これら既存の研究では、多くの場合、環境中に設置された位置が既知の専用端末から送信される無線フレームを使って、利用者端末の位置を推定することを考えている。これに対して、本システムでは、IoT 端末から送信される無線フレームの受信電波強度を使って、IoT 機器の特定の補助や、利用者から見た IoT 機器の方向の推定を行う。

Wi-Fi で使用されるチャンネル状態情報 (CSI: Channel State Information) を使用すると、単純に受信電波強度を利用する場合と比較して詳細な電波伝搬状況を推定可能である。チャンネル状態情報を測位 [14] やジェスチャ認識 [15]、人数推定 [16] などの用途に利用する取り組みも多く行われている。しかしながら、チャンネル状態情報を取得するには専用のツールや対応する無線デバイスなどが必要であり、動作可能な環境に限られる。本研究では、一般的なノート PC で計測が可能な受信電波強度を用いて IoT 機器の特定補助や IoT 機器の方向の推定を行う。

3. IoT 機器把握支援システム

本章では本稿で提案するシステムについて述べる。

3.1 システム概要

本システムは、中小企業や家庭などの小規模組織におい

て、無線 LAN に接続されている IoT 機器を管理者などが把握するために用いることを想定する。本システムの概要を図 1 に、GUI を図 2 に示す。本システムは標準的なノート PC 上で動作するソフトウェアとして実現されており、専用の機器の設置やアクセスポイントの設定変更などの作業は不要である。GUI は大きく一覧表示部と対応付け補助部および本システムの 3 つの機能を選択するボタンからなる。選択できる機能は、IoT 機器一覧表示機能、表示アドレス対応付け補助機能、ナビゲーション機能である。本節ではそれぞれの機能の概要と利用法について説明し、機能の詳細は 3.2 節、3.3 節、3.4 節で述べる。

本システムの利用者 (以降、単に利用者) は、まず調査対象の無線 LAN に本システムの稼働するノート PC を接続する。その後、GUI 上の List Display ボタン (図 2) を押下することにより、IoT 機器一覧表示機能の利用を開始する。ここで、なるべく多くの機器からの無線フレームを取得するため、本作業はアクセスポイントの近くで行うことを想定する。

IoT 機器一覧表示機能は、本システムの動作するノート PC 上で受信可能な無線フレームを取得、解析することにより、無線 LAN 内の Wi-Fi 機器のアドレス一覧を取得する。また、無線フレームの観測結果に基づき、Wi-Fi 機器をモバイル端末と IoT 機器に分類する。さらに、得られた IoT 機器のアドレス一覧を GUI 上の一覧表示部に表示する。図 2 に示されるように、一覧表示部には、各 IoT 機器に対して、IP アドレス、MAC アドレス、受信電波強度、実際の IoT 機器との対応付けを行ったかどうかを表すチェックボックスが表示される。以上により、利用者は、無線 LAN 内にある IoT 機器のアドレス一覧を把握できる。

続いて利用者は、表示されたアドレスと実際の IoT 機器の対応付けを行う。ここで、IoT 機器には、ふだんから利用している、最近設置したなど利用者が所在を把握している IoT 機器と、設置したことを忘れた、設置者がいなくなったなどにより、利用者が所在を把握していない IoT 機器があると考えられる。本システムの利用においては、利用者は、まず、所在を把握している IoT 機器に対して、表示アドレスと IoT 機器の対応付けを行う。具体的には、利用者は GUI 上の Associate ボタン (図 2) を押下することにより、表示アドレス対応付け補助機能の利用を開始する。

表示アドレス対応付け補助機能を利用する場合、利用者は、所在を把握しており対応付けの完了していない IoT 機器 (以降、対象 IoT 機器) に対して近づき、その後、遠ざかるという動作を行う。表示アドレス対応付け補助機能は、IoT 機器に近づく場合にその IoT 機器から送信される無線フレームの受信電波強度が増加し、遠ざかる場合に受信電波強度が減少すること [2] を利用して、対象 IoT 機器の候補となるアドレスを推定し、そのアドレスを GUI 上でハイライト表示する。この機能を利用して、利用者は表示ア

ドレスの中の1つと対象IoT機器を対応付ける。対応付けが終わった場合、利用者は、GUI上で該当のアドレス欄の横のチェックボックスにチェックを入れる。利用者は、所在を把握しているすべてのIoT機器に対して、同じ手順で対応付けを実施する。

一方、利用者が所在を把握していないIoT機器がある場合は、対応付けの完了していないアドレスが残る。利用者は、対応付けの完了していないアドレス（以降、対象アドレス）がある場合、GUI上で該当のアドレスを選択した後、GUI上のNaviボタン（図2）を押下することにより、ナビゲーション機能の利用を開始する。

ナビゲーション機能を利用する場合、利用者は、その場でノートPCを持ったままゆっくり回転する。ナビゲーション機能は、対象アドレスを持つIoT機器とノートPCの間に利用者が割り込むと受信電波強度が低くなること[2]を利用して、対象アドレスを持つIoT機器の方向を推定し、推定方向をGUI上の対応付け補助部（図2）に表示する。その後、利用者は表示された方向に向かって移動し、所在を把握していないIoT機器を探す。所在を把握していないIoT機器を発見できなかった場合、利用者は必要に応じてナビゲーション機能の利用を繰り返す。所在を把握していないIoT機器を発見した場合は、前述の表示アドレス対応付け補助機能を利用して、表示アドレスと発見したIoT機器の対応付けを行う。

本システムを用いて以上の作業を行うことにより、無線LAN内のIoT機器の把握を支援できる。次節以降では、それぞれの機能の詳細について述べる。

3.2 IoT機器一覧表示機能

IoT機器一覧表示機能は、本システムの動作するノートPC上で受信可能な無線フレームを取得、解析することにより、無線LAN内のIoT機器のアドレス一覧を取得し、システム上に表示する機能である。利用者は、調査対象の無線LANに本システムの稼働するノートPCを接続し、GUI上のList Displayボタンを押下することにより、この機能を利用する。以降、アドレス取得、IoT機器抽出、一覧表示の順に本機能の説明を行う。

3.2.1 アドレス取得

本機能の利用が開始されると、本システムは、自身の無線NICで受信可能な無線フレームおよびその受信電波強度を取得する。実装システムでは、コマンドライン型のネットワークアナライザソフトウェアであるtshark[17]を用いて無線フレームと受信電波強度の取得を行った。なお、受信電波強度には外れ値が含まれる場合があるが、実装システムでは、同じWi-Fi機器から送信された無線フレームの受信電波強度に5dBm以上の変化があった場合、その値を外れ値として除去している。

本システムは、まず、取得した無線フレームのうち、調査対象の無線LAN内で送受信される無線フレームを取り出し、そこに含まれる宛先MACアドレスおよび送信元MACアドレスから無線LAN内のWi-Fi機器のMACアドレス一覧を取得する。続いて、ネットワークの範囲（例：192.168.0.0/24）に対してpingコマンドを実行した後、arpコマンドを実行しARPテーブルを取得することにより、MACアドレスに対応するIPアドレスを取得する。

3.2.2 IoT機器抽出

続いて、本システムは、各アドレスを持つWi-Fi機器をモバイル端末とIoT機器に分類し、IoT機器のみを抽出する。なお、分類手法を検討するために、本研究では事前に予備実験を行った。予備実験では本稿の4.1節で述べる実験で使用したのと同じモバイル端末14台とIoT機器6台を用いた。各Wi-Fi機器から送受信される無線フレームを10分間計測し、モバイル端末とIoT機器から送受信される無線フレームの特徴を調査した。モバイル端末については、使用中の場合と不使用中の場合それぞれの場合の計測を行った。計測データを10秒の区間ごとに区切り、それぞれの区間で送受信される無線フレーム数の標準偏差、すべての区間で無線フレームの送受信が行われているかどうか、含まれる無線フレームの種類を調査した。その結果、モバイル端末とIoT機器が送受信する無線フレームには表1のような特徴があることが分かった。これらの結果に基づき、本システムでは、以降で説明するような分類手法を用い、Wi-Fi機器をモバイル端末とIoT機器に分類する。

まず、前節の処理により抽出されたWi-Fi機器を d_i

表1 Wi-Fi機器の分類手法検討のための予備実験結果

Table 1 Preliminary experimental results for Wi-Fi device classification.

Wi-Fi 機器	フレーム数の標準偏差	つねにフレーム送受信を行うか	フレームの種類の特徴
モバイル端末 (使用中)	800–2,000	すべての区間で送受信を行っている	様々なフレームから構成される
モバイル端末 (不使用中)	5–30	送受信を行っていない区間がある	QoS Null フレームと Null フレームの割合が他カテゴリと比較して大きい
IoT 機器	5–350	すべての区間で送受信を行っているものと送受信を行っていない区間があるものがある	様々なフレームから構成される

($1 \leq i \leq N$) と表記する. N は検出された Wi-Fi 機器の総数である. 本システムでは, まず, 固定時間 Δ ごとに時間を区切り, Wi-Fi 機器で送受信される無線フレーム数を計算する. なお, 実装システムでは $\Delta = 10\text{s}$ を使用した. また, j 番目の区間において Wi-Fi 機器 d_i から送受信される無線フレーム数を $f_{i,j}$ とし, 全区間における送受信フレーム数の標準偏差 σ_i を計算する. さらに, Wi-Fi 機器 d_i の送受信フレーム総数に対する特定の制御フレームの総数の比率である制御フレーム比 r_i を計算する. 実装システムでは, 比率を計算するための制御フレームとして QoS Null フレームと Null Function フレームを使用した.

本システムは, これらの値を用いて, 以下の順番で, Wi-Fi 機器を分類する.

- (1) 無線フレーム数の標準偏差が $K \leq \sigma_i$ を満たす場合, Wi-Fi 機器 d_i をモバイル端末として分類する. ここで K はしきい値である. 実装システムでは予備実験に基づいて $K = 400$ を使用した. この処理により, 表 1 のうち使用中のモバイル端末を分類できる.
- (2) すべての区間において送受信フレーム数が $0 < f_{i,j}$ を満たす場合, Wi-Fi 機器 d_i を IoT 機器として分類する. この処理により, 表 1 に示される IoT 機器のうちすべての区間で無線フレームの送受信を行っているものを分類できる.
- (3) 制御フレーム比が $R < r_i$ を満たす場合, Wi-Fi 機器 d_i をモバイル端末として分類する. ここで R ($0 < R < 1$) はしきい値である. 実装システムでは予備実験に基づいて $R = 0.1$ を使用した. この処理により, 表 1 のうち不使用中のモバイル端末を分類できる.
- (4) 以上のいずれの条件も満たさない場合は IoT 機器として分類する. この処理は, 表 1 に示される IoT 機器のうち無線フレームの送受信を行っていない区間のあるものの分類に相当する.

なお, 手順 (3) の処理に必要な計算量が手順 (2) と比較し

て大きいと考えられるため, 計算量の簡略化のために手順 (2) を導入している.

3.2.3 一覧表示

最後に, 本システムは, IoT 機器として分類された機器の一覧を GUI の一覧表示部 (図 2) に表示する. 一覧表示部には, 各 IoT 機器に対して, IP アドレス, MAC アドレス, その IoT 機器から送信される無線フレームの受信電波強度, 実際の IoT 機器との対応付けを行ったかどうかを表すチェックボックスが表示される. 以上により, 利用者は, 無線 LAN 内にある IoT 機器のアドレス一覧を把握できる.

3.3 表示アドレス対応付け補助機能

表示アドレス対応付け補助機能は, 利用者が所在を把握しており対応付けの完了していない IoT 機器 (対象 IoT 機器) と表示アドレスの対応付けを補助する機能である. 本機能は, IoT 機器に近づく場合にその IoT 機器から送信される無線フレームの受信電波強度が増加し, 遠ざかる場合に受信電波強度が減少することを利用する. 表示アドレス対応付け補助機能の動作例を図 3 に示す. この図では, 対象 IoT 機器 A と, GUI 上の一覧表示部に表示された表示アドレスの対応付けを行う場合を例示している.

まず, 利用者は, 図 3(a) に示されるように, 対象 IoT 機器から離れた位置で GUI 上の Associate ボタン (図 2) を押下することにより, 表示アドレス対応付け補助機能の利用を開始する. 初期状態では対応付け完了のチェックの入っていないアドレスすべてが候補アドレスとしてハイライト表示される. また, Associate ボタンを押下すると, GUI 上の対応付け補助部に Approach ボタンと Leave ボタンが表示される. さらに, 表示アドレス対応付け補助機能が開始されると, 本システムは, 対応付け完了のチェックの入っていない IoT 機器に対して一定間隔で ICMP Echo Request メッセージを送信する. このことにより, IoT 機器が定期的に ICMP Echo Reply メッセージを送信するよ

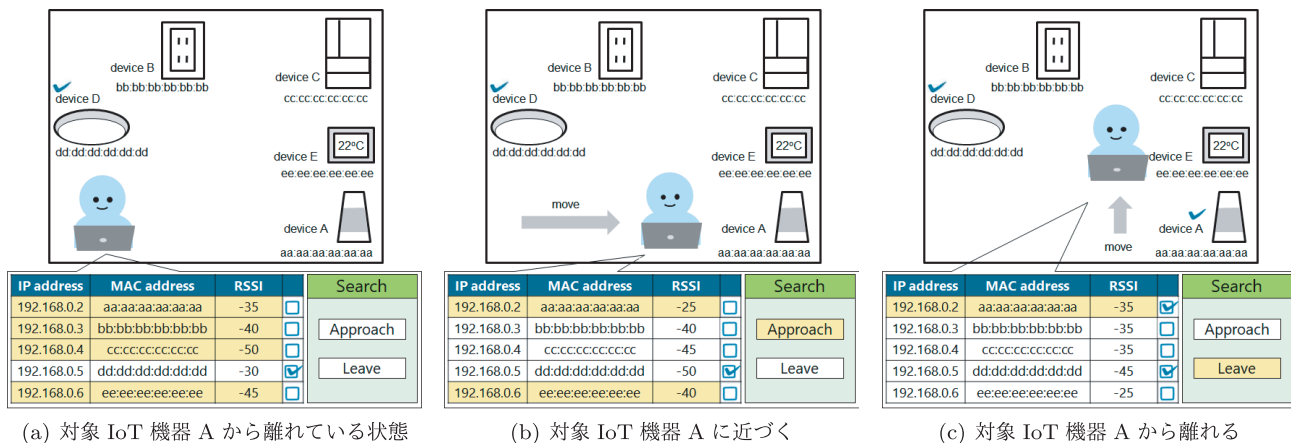


図 3 表示アドレス対応付け補助機能の動作例

Fig. 3 Overview of the device association support function.

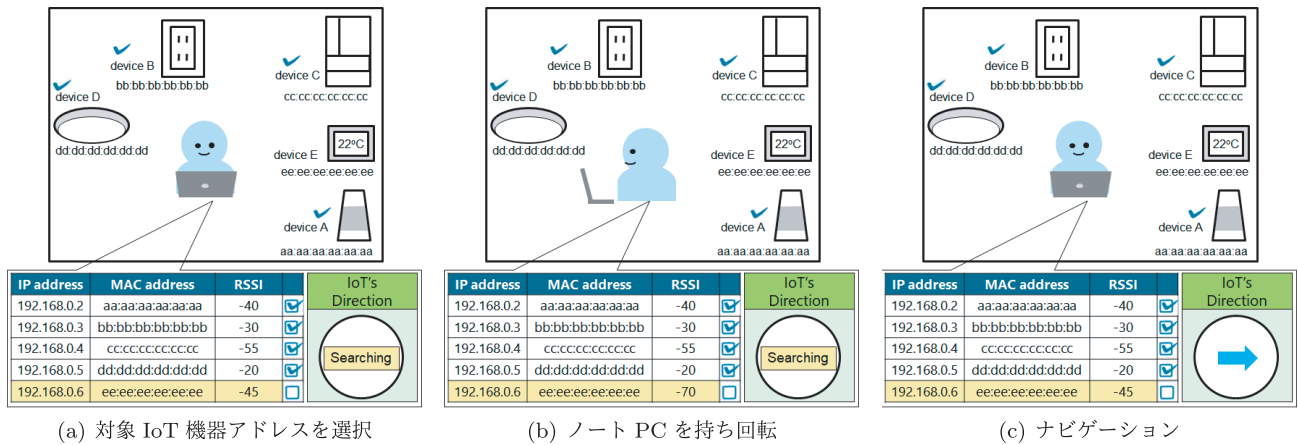


図 4 ナビゲーション機能の動作例
Fig. 4 Overview of the navigation function.

うにする。なお、実装システムでは ICMP Echo Request メッセージの送信間隔を 250 ms としている。

その後、利用者は、GUI 上の Approach ボタンを押下して、対象 IoT 機器に向かって移動する。このとき、本システムは、候補アドレスのうち、受信電波強度が増加するアドレスを対応付けの候補アドレスとして再度設定し、ハイライト表示する (図 3(b))。続いて、利用者は、対象 IoT 機器の近くに到達すると、Leave ボタンを押下して対象 IoT 機器から離れる。このとき、本システムは、候補アドレスのうち受信電波強度が減少するアドレスを候補アドレスとして再度設定し、ハイライト表示する。図 3(c) の場合、候補アドレスが 1 つに絞られている。候補となるアドレスが複数残る場合、利用者は必要に応じて Approach ボタンを押すところから手順を繰り返し、候補アドレスを絞り込む。この機能を利用して、利用者は表示アドレスの中の 1 つと対象 IoT 機器を対応付ける。対応付けが終わった場合、利用者は、GUI 上で該当のアドレス欄の横のチェックボックスにチェックを入れる。

利用者は、所在を把握しているすべての IoT 機器に対して、同じ手順で対応付けを実施する。ここで、利用者が所在を把握していない IoT 機器がある場合は、対応付けの完了していないアドレスが GUI 上の一覧表示部に残る。このような利用者が所在を把握していない IoT 機器とアドレスを対応付けるための補助機能を次節で述べる。

3.4 ナビゲーション機能

ナビゲーション機能は、利用者が所在を把握していない IoT 機器の設置場所に利用者を誘導する機能である。前節までの作業を実施し対応付けの完了していないアドレス (以降、対象アドレス) がある場合に、対象アドレスに対して、ナビゲーション機能を利用する。本機能では、対象アドレスを持つ IoT 機器とノート PC の間に利用者が割り込むと受信電波強度が低くなることを利用して、対象アドレスを持つ IoT 機器の方向を推定する。ナビゲーション機能

の動作例を図 4 に示す。この図では、利用者は 5 台の IoT 機器のうち IoT 機器 A~D の対応付けをすでに完了しており、MAC アドレス ee:ee:ee:ee:ee:ee を持つ IoT 機器 E の設置場所が不明な場合を例示している。

利用者は、図 4(a) に示されるように、GUI 上の一覧表示部に表示されているアドレス一覧から対象アドレスを選択する。アドレスを選択すると、その項目がハイライト表示される。対象アドレスがハイライト表示された状態で GUI 上の Navi ボタン (図 2) を押下することにより、ナビゲーション機能の利用を開始する。ナビゲーション機能が開始されると、表示アドレス対応付け補助機能と同様、本システムは、対象アドレスを持つ IoT 機器に対して一定間隔で ICMP Echo Request メッセージを送信する。このことにより、IoT 機器が定期的に ICMP Echo Reply メッセージを送信するようにする。

その後、利用者は、その場でノート PC を持ったままゆっくり 1 回転する (図 4(b))。このとき、対象アドレスを持つ IoT 機器とノート PC の間に利用者が割り込むと受信電波強度が低くなる。図 4(b) の例では、利用者が IoT 機器 E と逆の方向を向いたときに、IoT 機器 E から受信した無線フレームの受信電波強度が低下する。システムは、利用者の回転終了後、最も受信電波強度が低くなったときに利用者が向いていた方向と逆の方向を IoT 機器の方向として推定する。推定方向は GUI 上の対応付け補助部 (図 2) に 8 方向のいずれかで表示される (図 4(c))。システムで対象アドレスを持つ IoT 機器の推定方向が表示されると、利用者は指定された方向に向かって移動し、所在を把握していない IoT 機器を探す。所在を把握していない IoT 機器を発見した場合は、前述の表示アドレス対応付け補助機能を利用して、表示アドレスと IoT 機器の対応付けを行う。

一方、利用者が IoT 機器を発見できずに通り過ぎる場合や、システムの推定した IoT 機器の方向が誤っている場合が考えられる。その場合、利用者の移動にともない、対象アドレスを持つ IoT 機器から送信される無線フレームの受

信電波強度が低くなる。本システムは、一定期間連続して受信電波強度が減少した場合、再度ナビゲーションを行うように利用者に通知を行う。実装システムではこの期間を3秒に設定している。再ナビゲーションが通知された場合、利用者はその場で停止し、再度ナビゲーション機能の操作を行う。なお、利用者は壁など移動不可能な場所に到達し、そこでIoT機器を発見できなかった場合も、同様にその地点で再度ナビゲーション機能の操作を行う。

4. 実験評価

本システムの評価実験を行った。本稿では、本システムの主要な機能である、IoT機器一覧表示機能においてWi-Fi機器からIoT機器を分類、抽出する機能の評価結果とナビゲーション機能の評価結果について述べる。

4.1 IoT機器抽出精度の評価

まず、IoT機器一覧表示機能において、Wi-Fi機器からIoT機器を分類、抽出する際の性能を評価するための実験を行った。実験は、近畿大学東大阪キャンパス38号館3階の研究室で行った。実験では、1台の無線アクセスポイント (Buffalo AirStation WMR-433-BK/N)、6台のIoT機器 (Google Chromecast, Tp-Link スマートプラグ, Czrd Smartプラグ, Google Home, Google Home Mini, T&D 温度ロガー)、14台のモバイル端末 (2台のMacBook PC, 3台のWindows ノート PC, 3台のAndroid スマートフォン, 5台のAndroid タブレット, iPhone) を使用した。提案システムを動作させるノートPCとしてはMacBook Air (Sierra, Core i5 1.6 GHz, 4GB メモリ) を使用した。

また、表2に示すように、4つの実験環境を準備した。それぞれの実験環境で、無線LANに接続されるWi-Fi機器の数が異なる。実験環境1では、無線LANに6台のIoT機器と14台モバイル端末、合計20台のWi-Fi機器が接続されている。実験環境2から4ではWi-Fi機器のうち一部を使用している。各実験環境について、IoT機器一覧表示機能を10分間動作させ、取得した無線フレームからWi-Fi機器をIoT機器とモバイル端末に分類した。本評価の評価指標としては適合率 (Precision) と再現率 (Recall) を用いた。適合率は、IoT機器と分類したアドレスのうち実際にIoT機器のアドレスであったものの割合であり、再現率は、実際にIoT機器のアドレスであるもののうちIoT機器

表2 IoT機器抽出精度

Table 2 The precision and recall for IoT device classification.

実験環境 (使用した Wi-Fi 機器)	適合率	再現率
1 (IoT 機器 6 台, モバイル端末 14 台)	0.85	1.00
2 (IoT 機器 6 台, モバイル端末 9 台)	0.90	1.00
3 (IoT 機器 3 台, モバイル端末 7 台)	0.88	1.00
4 (IoT 機器 2 台, モバイル端末 3 台)	1.00	1.00

と分類できたアドレスの割合である。

表2に10回の実験結果の平均を示す。実験環境1から3では、モバイル端末をIoT機器として分類する場合があった。そのため、適合率が1未満となっている。一方、すべての実験環境においてIoT機器をIoT機器として分類できており、その結果、再現率は1であった。したがって、Wi-Fi機器の中からIoT機器を抽出するという目的は達成できているといえる。なお、モバイル端末をIoT機器として抽出する場合があるが、利用者が表示アドレスと機器の対応付けを行う際に、該当のアドレスを持つWi-Fi機器がモバイル端末であることが分かるため影響は限定的である。

なお、3.2.2項で述べたIoT機器分類手法を提案するために用いたIoT機器と、本節で実験評価に用いたIoT機器は同一である。本稿では、IoT機器としてスマートプラグ、スマートスピーカ、メディアストリーミングデバイス、温度ロガーを用いており、同じ種類のIoT機器に対しては、ある程度の精度で分類が可能であると考えられる。一方で、IoT機器の種類は年々増加しており、実験に用いた機器と異なる種類のIoT機器が正しく分類されるかどうかの検証や、必要に応じて手法の改良が必要となる可能性がある。これらの検証については今後の課題とする。

4.2 ナビゲーション機能における方向推定精度の基礎評価

次に、ナビゲーション機能におけるIoT機器の方向推定精度を評価するための実験を行った。実験を行った部屋のレイアウトとIoT機器設置場所を図5に示す。IoT機器としてはスマートプラグ (Czrd Mini Smart Socket Model XS-SSA01) を使用した。ナビゲーション機能は、利用者が所在を把握していないIoT機器に対して利用する機能であるため、スマートプラグは、壁際に設置した机の奥の下と、分かりにくい場所に設置した。実験用のアクセスポイントとしてはBuffalo WAPM-1266Rを使用した。

このような環境で、利用者がナビゲーション機能を用いてIoT機器の方向を正しく推定できるかどうかを検証する実験を行った。実験では、実験者が図5に示される計測位置で8方向のうちの1つを初期方向として立ち、ノートPCを約1mの高さで持ちながらスマートプラグのアドレスに対してナビゲーション機能を用いる。なお、ノート

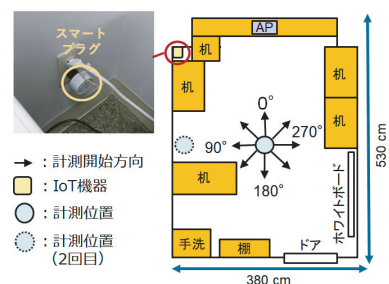


図5 方向推定精度評価のための実験環境

Fig. 5 Environment for evaluation of direction estimation.

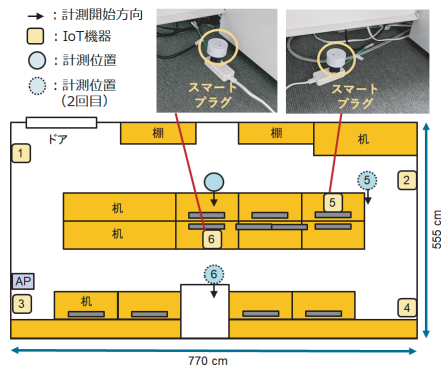


図 6 ナビゲーション機能評価のための実験環境

Fig. 6 Environment for evaluation of navigation method.

PC から見てスマートプラグは非直視環境となる。実験者の初期方向として、 0° – 315° までの 8 方向と 8 方向の中からランダムに選んだ 4 方向 (45° , 135° , 225° , 270°) の合計 12 通りを選択し、12 回の実験を実施した。ここで、提案システムでは、IoT 機器の設置された方向を 8 方向のいずれかで推定する。評価においては、ナビゲーション機能が推定した方向を中心として 45° の範囲に該当の IoT 機器があれば、方向の推定が正しいとした。

実験の結果、12 回中 11 回スマートプラグのある方向を正しく推定できた。したがって、方向の推定精度は 92% である。12 回中 1 回だけスマートプラグの方向推定を誤った場合があったが、この場合、実験者は表示された方向に向かって壁際の位置 (図 5 中、2 回目計測位置で示される位置) まで移動した。壁際で再度ナビゲーション機能を利用したところ、2 回目のナビゲーションでスマートプラグの方向を正しく推定することができた。したがって、推定される方向が間違っていたとしても、2 回目以降のナビゲーションで正しく方向を推定できれば、いずれ対象の IoT 機器の方向を正しく推定可能であることが分かる。

4.3 ナビゲーション機能の評価

続いて、ナビゲーション機能を使って、様々な場所に設置される IoT 機器に利用者を誘導できるかどうかを評価するための実験を行った。実験を行った部屋のレイアウトと IoT 機器設置場所を図 6 に示す。IoT 機器としては前節で述べた実験と同じスマートプラグを用いた。

実験では、図 6 に示される計測位置、方向で実験者がノート PC を持った状態で、スマートプラグのアドレスに対してナビゲーション機能を利用した。スマートプラグの位置としては、地点 1 から地点 6 までの 6 つの位置を用い、6 回の実験を実施した。なお、地点 1 から地点 4 のスマートプラグは壁際のコンセントに接続しており直視環境にある。地点 5、地点 6 のスマートプラグは机の下に設置しており、初期計測位置からは非直視環境となる。

表 3 に、それぞれの地点に設置したスマートプラグに対するナビゲーションの結果を示す。直視環境下にある地点

表 3 方向推定結果

Table 3 Result of direction estimation.

IoT 機器の設置位置	1 回目の推定方向および正誤	2 回目の推定方向および正誤
地点 1	右 (正しい)	—
地点 2	左 (正しい)	—
地点 3	右前 (正しい)	—
地点 4	左前 (正しい)	—
地点 5	左 (誤り)	右前 (正しい)
地点 6	前 (正しい)	後ろ (正しい)

1 から地点 4 のスマートプラグに対しては、それぞれ 1 回ナビゲーション機能を利用するだけで正しい方向が推定され、また、推定された方向に該当のスマートプラグがあることを実験者が目視で確認できた。非直視環境下にある地点 5、地点 6 のスマートプラグに対しては、ナビゲーション機能を 2 回用いることにより、実験者がスマートプラグを目視で確認できた。これら地点 5、地点 6 のスマートプラグに対する結果について、以下で詳しく説明する。

地点 5 のスマートプラグに対する 1 回目の方向推定結果は左であった。そのため、実験者は初期計測位置、方向から見て左に移動した。実験者の移動中にスマートプラグから送信される無線フレームの受信電波強度が減少したため、システムから再ナビゲーションを促す通知が表示された。そのため、実験者は図 6 中の 2 回目計測位置 5 で、図中に示される計測方向を向き、再度ナビゲーション機能を利用した。その後、実験者はナビゲーション機能により推定された方向である右前を向き、地点 5 のスマートプラグを目視で確認した。

一方、地点 6 のスマートプラグに対する 1 回目の方向推定結果は前であった。推定方向は正しいが、初期計測位置から地点 6 のスマートプラグを目視で確認できないため、実験者は、図 6 中の 2 回目計測位置 6 で示される壁際の地点まで移動した。壁に到達したため、図中に示される計測方向を向き、再度ナビゲーション機能を利用したところ、2 回目の方向推定結果は後ろであった。実験者は後ろを向き、地点 6 のスマートプラグを目視で確認した。

以上の結果より、ナビゲーション機能を用いることにより、対象 IoT 機器の位置に利用者を誘導できるといえる。しかしながら、本稿における実験はすべて同一の実験者により実施されており、実験者が事前に IoT 機器の設置場所を知っている状態で実験を実施した。そのため、今後、IoT 機器の設置場所を知らない実験者協力者を対象として実験を行う必要がある。

5. おわりに

本稿では、標準的なノート PC のみを用いて IoT 機器の把握を支援できるシステムを提案、開発した。提案システムでは、まず、無線 LAN 内の無線フレームを観測すること

により、無線 LAN 内に設置された IoT 機器のアドレス一覧を取得する。また、IoT 機器から送信される無線フレームの受信電波強度を利用して、システム上に表示されたアドレスと実際の IoT 機器の対応付けを補助する。さらに、システム利用者が所在を把握していない IoT 機器がある場合は、その IoT 機器の設置場所に利用者を誘導する。研究室内に設置した IoT 機器を利用した実験により、本システムを用いることで、IoT 機器を高い精度で分類できること、利用者を IoT 機器の位置に誘導できることを示した。

今後の課題として、研究室の構造や設置されている IoT 機器を把握していない実験協力者による実験を実施する必要がある。また、天井に設置する、隣接して設置するなど、IoT 機器の設置場所を様々に変えた場合の評価も必要である。さらに、IoT 機器をいくつかのカテゴリに自動的に分類するようシステムを拡張することも検討している。

謝辞 本研究の一部は科学研究費 (19K11934) および令和 2 年度近畿大学学内研究助成金 (SR08) の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Egawa, Y., Taniguchi, Y. and Iguchi, N.: A system for visualizing IoT device list based on captured frames in wireless LAN, *Proc. IEEE ICCE-TW 2019*, pp.577–578 (2019).
- [2] Egawa, Y., Taniguchi, Y. and Iguchi, N.: A study on function for grasping location of device in an IoT device list visualization system, *Proc. ICIT 2019*, pp.357–361 (2019).
- [3] 江川悠斗, 谷口義明, 井口信和: IoT 機器一覧表示システムにおける受信電波強度を利用したナビゲーション機能の開発, 情報処理学会インターネットと運用技術シンポジウム 2020 論文集, pp.56–62 (2020).
- [4] 松井俊浩: IoT Security READY!! IoT のセキュリティの特性と人材育成 (2017), 入手先 (http://www.idec.or.jp/renkei/whats_new/6.iot.s.iwasaki.gakuen.pdf).
- [5] 半田富己男, 矢野義博: IoT エッジ端末をボットネットワークから防ぐ認証プラットフォームの提案, 情報処理学会研究報告, Vol.2017-DPS-170, No.26, pp.1–3 (2017).
- [6] 株式会社ソリトンシステムズ: CounterACT, 入手先 (<https://www.soliton.co.jp/products/category/product/network/counteract/>) (参照 2019-07-26).
- [7] 日本電気株式会社: IoT Device Security Manager, 入手先 (<https://jpn.nec.com/iot/platform/security/whitelist/>) (参照 2021-01-21).
- [8] 情報処理推進機構: 侵入検知および侵入防止システム (IDPS) に関するガイド (2007), 入手先 (<https://www.ipa.go.jp/files/000025364.pdf>).
- [9] 高橋光紀, 平石広典: 電波強度による位置推定機能を利用した校内ナビゲーションシステムの設計, 情報処理学会第 74 回全国大会講演論文集, No.1, pp.459–460 (2012).
- [10] 古館達也, 堀川三好, 菅原光政: 歩行者を対象とした屋内測位手法の提案, 情報処理学会第 77 回全国大会講演論文集, No.1, pp.313–314 (2015).
- [11] 上原 誠, 木村優志, 小林秀幸: ディープラーニングを用いた RSSI からの屋内位置推定, 情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集, No.1, pp.339–340 (2020).
- [12] 松本直也, 川崎慈英, 鈴木 誠, 猿渡俊介, 渡辺 尚: RSSI

を用いた混雑度推定システムに関する検討, 情報処理学会マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, pp.369–376 (2018).

- [13] Yoshida, T. and Taniguchi, Y.: Estimating the number of people using existing WiFi access point in indoor environment, *Proc. ECCS 2015*, pp.46–53 (2015).
- [14] 福島 健, 岩崎裕輔, 村上 遼, 猿渡俊介, 渡辺 尚: CSI を用いた位置測位手法に関する初期的検討, 情報処理学会マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, pp.819–827 (2018).
- [15] 宮代理弘, 宮下芳明: 3 次元 CNN を利用した Wi-Fi CSI によるジェスチャ認識, 情報処理学会研究報告, Vol.2019-HCI-182, No.29, pp.1–8 (2019).
- [16] 水谷優秀, 内山 彰, 東野輝夫, 村上友規, ヒランタ アベセカラ: モバイル端末の Wi-Fi チャンネル状態情報を用いた人数推定の基礎検討, 情報処理学会第 81 回全国大会講演論文集, pp.75–56 (2019).
- [17] wireshark: tshark, available from (<https://www.wireshark.org/>).



江川 悠斗 (学生会員)

2019 年近畿大学理工学部卒業。同年同大学大学院総合理工学研究科博士前期課程入学, 現在に至る。IoT 機器の把握支援に関する研究に従事。



谷口 義明 (正会員)

2008 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了, 博士 (情報科学)。大阪大学サイバーメディアセンター助教, 近畿大学理工学部講師を経て, 2018 年より同准教授。センサネットワーク技術およびその応用に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 電気学会各会員。本会シニア会員。



井口 信和 (正会員)

1988 年三重大学大学院修士課程修了。同年 (株) 豊田自動織機製作所入社。1992 年和歌山県工業技術センター研究員。2001 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了, 博士 (工学)。2002 年近畿大学理工学部助教授。2008 年同大学教授。2015 年近畿大学総合情報基盤センター長を兼務。ネットワーク運用管理支援, 情報ネットワーク応用, 教育システム開発に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, 教育システム情報学会, 農業情報学会各会員。本会シニア会員。