

パッシブRFIDタグ検知とリーダ移動の履歴からタグの空間位置を推定する物探し支援システム

笹川 真奈*¹ 伊藤 貴之*¹ 椎尾 一郎*¹

Indoor Item-Finding System using 3D Position of Passive RFID Tags Estimated by History of Tag Detection and Reader Movement

Mana Sasagawa*¹, Takayuki Itoh*¹ and Itiro Siio*¹

Abstract – We propose a novel indoor item-finding system with users' less burden using the 3D position of passive RFID (Radio Frequency Identification) tags estimated by the history of tag detection and reader movement. Our proposed system assists users in finding items by showing the distance and direction to the item they want to find when any tags pre-attached in the room are detected. We consider that our system has the following two contributions. (1)The 3D position of all tags is estimated by the history of tag detection and reader movement obtained when using our system, so users do not need to input the position manually. (2)The distance and direction to the item are shown when any tags are detected, so users can find the item without approaching the item enough to directly detect the tag attached to the item. For confirming the usefulness of our system, we conducted an experiment in which users found items in an actual living space. As a result, we confirmed that our system enables users to find items in a short time with users' less subjective burden.

Keywords : item-finding, RFID, passive tag, indoor localization, ubiquitous computing

1. はじめに

日常生活において物探しに費やされる時間は多い。Pixieの調査^[1]によると、ヒトは1年間で累計2.5日も物探しをすると推定されている。そのため、物探しの時間を軽減する様々な方法が提案されている。

例えば、無線通信する小型のタグ型デバイスを用いて、モノや位置をタグ付けし、物探しを支援する方法が普及しつつある。このようなタグ型デバイスを、以下RFID (Radio Frequency Identification) タグと呼ぶ。RFID タグとの通信機能があるリーダがRFID タグを読み取ると、そのIDと電波強度が得られる。これによりRFID タグの識別とRFID タグまでの距離を推定することができる。そこで、RFID タグを探したいモノ^[2]や家具^[3]などに貼れば、リーダを手にしたユーザに探したいモノの位置情報を提示できる。RFID タグには、電池を内蔵したアクティブRFIDタグと、リーダから電力を得て動作する無電池のパッシブRFIDタグの2種類がある。パッシブRFIDタグは、検知距離が数10cmと短い、安価で薄型軽量であり、電池交換の手間とコストが不要である。

そこで本研究では、パッシブRFIDタグのみを使用する物探し手法を採用する。パッシブRFIDタグを用いる手法において、より効率的な物探し支援を提供す

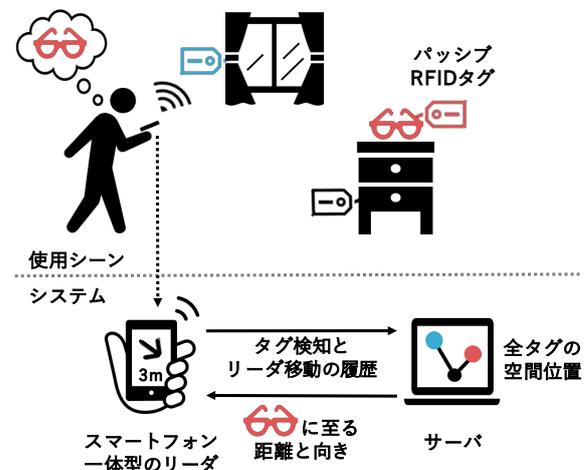


図1 本システムの概要。RFID タグとの通信機能があるリーダから得られる、パッシブRFIDタグ検知とリーダ移動の履歴から、事前に全タグの空間位置を推定する。新たな物探しにおいて、ユーザが手近にある任意のタグを読み取ると、探したいモノに至る距離と向きを表示する。

るためには、検知距離より遠くにあるパッシブRFIDタグに至るまで、ユーザを導く仕組みを実現する必要がある(課題1)。

RFIDタグを用いた物探し手法では、RFIDタグが貼られているモノや位置などの情報をシステムが把握している必要がある。そのため、従来のシステムで

*1: お茶の水女子大学
*1: Ochanomizu University

は、モノの名前や位置を測定した座標などをテキストでユーザが手入力する必要があった。安価なパッシブ RFID タグを使用した物探し手法では、安価ゆえ多数のモノに貼り付けることが可能になり、情報を手入力すべき RFID タグの数がさらに膨大になる (課題 2)。

本研究では、複数のパッシブ RFID タグ (以下、タグとする) が貼られた環境にて、スマートフォン一体型のリーダを保持したユーザの物探しを支援するシステムを提案する。提案システムの概要を図 1 に示す。提案システムは、タグ検知とリーダ移動の履歴から、力学モデルに基づき全タグの空間位置を推定する。物探しをするユーザが手近にある任意のタグを読み取ると、本システムは、探したいモノに貼られたタグ (以下、目的タグとする) が、パッシブ RFID タグゆえ短い検知距離より遠くにあろうとも、目的タグまでに至る距離と向きをユーザに提示し、探したいモノまでユーザを導く。これにより前述の課題 1 を解決する。

本研究では、タグの位置推定に、ユーザが過去に本システムを使用した際に自動的に蓄積された履歴を使用する。また、タグが貼られているモノが何かをユーザが推定できるように、本システム使用時に自動撮影された写真を活用する。過去の履歴が少ない場合であっても、ユーザが目的タグの検知距離より近くにいるか否かの情報を用いた物探し支援は提供でき、さらにその物探しの履歴は次の物探しに生かされる。そのため本システムでは、タグが貼られているモノや位置などの情報をユーザが手入力する必要がなく、身の回りにタグを貼るだけで使用開始できる。さらに、本システムは使われ続けることでより良い物探し支援を提供できるようになる。これにより前述の課題 2 を解決する。

本論文では、筆者らの論文 [4], [5] の手法を大幅に改良し、新たにユーザ実験を実施した。先行研究では、タグ検知の履歴から近接するタグ対の距離のみを推定していたため、十分な物探し支援を行えない場合があった。本論文では、タグ対の距離推定に加えて、スマートフォン一体型のリーダのセンサ情報を利用して、タグ対の方向を推定した。さらに、タグ対の推定距離と推定方向を元に力学モデルを使用することで、タグ対の距離と方向を最適に反映するような全タグの空間位置を推定した。こうして得られた結果を利用するスマートフォンアプリを実装し、屋内での物探し支援において、高価なアクティブ RFID タグを使用した最新製品 [2] と同等の性能を実現した。

2. 関連研究

RFID タグを探したいモノなどに貼り、リーダで読み取れる RFID タグの電波強度などを用いて、物探しを支援するシステムが多数提案されている。

例えば、RFID タグの位置を精度よく推定するため、複数の据え置き型のリーダを用いて物探しを支援するシステム [6]~[8] が提案されている。これらのシステムでは、超音波センサとアクティブ RFID タグのリーダ [6], ZigBee 通信機能を組み合わせたパッシブ RFID タグのリーダ [7], Bluetooth Low Energy (BLE) のリーダ [8] を複数使用し、RFID タグが貼られたモノの屋内位置を推定する。その一方で、複数のリーダを設置し管理する必要があり、設置と管理に手間とコストがかかる。

本研究では、物探しを行うユーザが 1 台の安価なリーダを携帯する方式を採用した。

2.1 アクティブ RFID タグによる位置推定

電池を内蔵したアクティブ RFID タグは、電池を内蔵しないパッシブ RFID タグに比べて、平均 3000 円程度と高価かつコイン型で大きい、検知距離が数 10m と長い。このため、日常生活においてモノやヒトの位置を推定する手段として古くから研究されている [9]。例えば、位置がわかっているアクティブ RFID タグの電波強度との差から探したいモノの位置を推定する方法 [10], [11] が提案されている。スマートフォンのような携帯型のリーダを対象とした研究も多い。例えば、アクティブ RFID タグの位置推定精度を改善するために、携帯型のリーダに指向性アンテナを組み込む研究 [12], ヒトがリーダを携帯し移動することで発生する受信電波状況の変動を利用して、複数のアクティブ RFID タグをグルーピングすることで探したいモノに近いモノを提示する研究 [13] がある。

近年では、探したいモノにアクティブ RFID タグを取り付け、物探しを支援する方法がいくつか製品化されている [2], [14], [15]。これらは、BLE または Ultra Wide Band (UWB) 通信機能のあるスマートフォンを手にしたユーザが物探しを行なう際に、探したいアクティブ RFID タグまでの距離や方向を電波強度や伝搬遅延時間などから推定し、それらを表示して物探しを支援する。また、アクティブ RFID タグに内蔵したスピーカから音を鳴らして、ユーザに位置を知らせる機能も提供している。さらに、一部の製品 [2], [15] は、GPS などによるスマートフォンの位置検出機能と連携したクラウドソーシング手法を導入することで、公共の場での置き忘れ・落とし物・盗難対策にも対応している。

筆者らは、安価でメンテナンス不要なパッシブ RFID タグのみを使用して、日常的に発生している私的な屋内空間での物探し支援を検討してきた。パッシブ RFID タグは検知距離が短く電池非搭載であるため、遠距離にあるタグが発生する音を手がかりに探す機能は実現できないものの、タグの位置推定を利用した屋内での物探し支援において、筆者らはアクティブ RFID タグ

の製品と同等の機能を目指した。

2.2 パッシブ RFID タグによる位置推定

電池を内蔵しないパッシブ RFID タグは、リーダから無線で供給される電力により機能し、平均 60 円程度と安価かつシール型で薄型軽量だが、検知距離が数 10cm と短い。複数のリーダを設置することでパッシブ RFID タグの位置を推定する試み^{[16]~[18]}や、探したいパッシブ RFID タグをユーザがリーダで直接検知できるまで探す方式^{[19], [20]}が実施されているものの、検知距離が短いため、実用的な製品としては普及していない。

一方で、事前に位置が入力された他のリーダ^[21]や他のパッシブ RFID タグ^[22]からの相対位置を手がかりとする研究がある。例えば、ユーザの行動範囲内の複数スポット (研究室や学食など)^[23]や家にある複数の電球^[24]にリーダを設置したり、棚板^[25]や家具^[3]に複数のパッシブ RFID タグを貼ったりした上で、リーダやパッシブ RFID タグの位置をユーザが事前に入力することで、探したいモノがどの位置の近くにあるかを提示するシステムがある。

本研究でも、複数のパッシブ RFID タグを活用することで、アクティブ RFID タグの製品^[2]と同等の物探し支援を、低価で提供することを目指す。しかし、複数のパッシブ RFID タグを活用するために、多数のパッシブ RFID タグの位置関係を、事前にシステムへ手入力する方式は、システム導入の障壁になる。

本研究では、リーダで得られるパッシブ RFID タグ検知とリーダ移動の履歴から、全てのパッシブ RFID タグの空間位置を推定することで、ユーザがパッシブ RFID タグの位置関係を手入力しなくてよいシステムを目指す。

3. 本システムの概要と実装

本研究では、複数のパッシブ RFID タグ (以下、タグとする) 検知とリーダ移動の履歴から、タグが貼られているモノや位置をユーザが推定できるようにすることで、設定と保守の負担が少ない物探しを支援するシステムを提案する。さらに、ユーザが手近にある任意のタグを読み取るだけで、探したいモノへ誘導できるようにすることで、効率的な物探しを実現する。

3.1 使用方法

本節ではユーザが本システムを使用して物探しを行う手順を説明する。本システムの前提として、探したいモノだけでなく他のモノにも多数、タグが事前に貼られている部屋での使用を想定している。

ユーザが物探しする時は、スマートフォン一体型である携帯型のリーダを持ち、提案システムのアプリケーション (図 2) を使用する。ユーザは最初に、スマートフォンの画面上に表示される写真一覧 (図 2 左)



図 2 提案システムのアプリケーション画面. 左: 探したいモノを選択する画面. タグ (白い長方形のシール) が貼られているモノの写真一覧を表示する. 右: 目的タグまでの距離と向きを提示する画面. 距離と上下の向きは文字列, 前後左右の向きは文字列と矢印で提示する.



図 3 提案システムの構成. 青い矢印はタグが読み取られた時, 赤い矢印は探したいモノが選択された時のシステムの動きを表す.

から探したいモノを選択する。次にユーザは手近にある任意のタグを読み取る。すると、探したいモノが検知距離よりも遠くにあっても、探したいモノに貼られたタグ (以下、目的タグとする) までの距離と向きが提示される。ユーザは動き回りながら、手近にある任意のタグの読み取りを繰り返すことで、目的タグまでの距離と向きが変わる様子を手がかりに、探したいモノへ辿り着くことができる。

3.2 試作機の構成と動作

本節では、試作機の構成と処理の流れについて説明する。それぞれの処理に関する考察と課題は、3.3 節以降で補足する。

本システムの構成を図 3 に示す。本システムは、パッシブ RFID タグ (ShortDipole, SMARTRAC 社)、スマートフォン一体型の携帯型のリーダ (ASR-030D, ア

スタリスク社), スマートフォン (iOS 14.6, iPhone X, Apple 社), サーバ (macOS 12.0.1, MacBook Pro 13-inch M1 2020, Apple 社) で構成される。

本システムで使用するタグは, 大きさが縦 15mm × 横 97mm, 重量が 0.4g のシール型である。このタグはダイポールアンテナ型であるため, 電波伝搬の指向性はトラス型と考えられる。さらに, 本システムのリーダとタグを使い, ユーザ実験を行う部屋で筆者が 100 回以上測定したところ, タグが検知できる最大の距離は約 80cm であった。そこで, 本システムのタグの理論的な検知範囲は直径 160cm のトラス型とする (図 4)。

本システムで使用するリーダは, 送信出力が 250mW(24dBm), 周波数が 920.6MHz-923.4MHz, 大きさが縦 117mm × 横 64mm × 高さ 10mm, 重量が 80g である。

ユーザがタグの読み取りをした場合, 図 3 の青い矢印で示すように, リーダは周囲にある複数のタグの ID および電波強度を取得し, スマートフォン経由でサーバへ送信する。さらに, スマートフォンは, タイムスタンプ, 前の読み取り時からリーダが移動した方向, 自動で撮影される写真を取得し, サーバへ送信する。リーダが移動した方向は, 一体化したスマートフォンが移動した方向と同じであるとみなす。スマートフォンが移動した方向は, iOS の API である ARKit¹ を用いて, スマートフォンのカメラ映像およびモーションセンサ値から推定する。

ユーザが探したいモノを選択した場合, 図 3 の赤い矢印で示すように, スマートフォンが目的タグの ID をサーバに送信する。サーバは, 目的タグの ID を受け取ると, あらかじめ推定されている全タグの空間位置 (推定方法は 4 章に詳述) を用いて, 全タグから目的タグまでの距離と向きを全て算出し, スマートフォンに送信する。この情報を受信したスマートフォンは, ユーザ周囲のタグが読み込まれるたびに, 目的タグまでの距離と向きを表示する。

本章の以下の節では, 試作機の処理に関する考察と課題を述べる。

3.3 スマートフォンの移動方向の推定

3.2 節で述べたとおり, スマートフォンの移動方向は, iOS の API である ARKit を用いて推定する。ユーザ実験を行う部屋で筆者が 100 回以上測定した結果, 方向の推定の誤差は 10 度以内であった。

この API は, 起動後の相対的な方向を検出する機能であるため, 絶対的な方位を検出するためには, 使用開始時にキャリブレーションを行う必要がある。そこで, 本システムの使用開始前に, スマートフォンを

あらかじめ決めた方位に向けてから, 使用開始する手順を取り入れた。将来, スマートフォンの絶対方位が安定して取得できる API が提供されるようになれば, キャリブレーション操作を省けると期待している。

3.4 タグとモノの紐づけ

3.1 節で説明したとおり, ユーザはスマートフォンの画面上に表示される写真一覧 (図 2 左) から探したいモノを選択する。これらの写真は, タグの読み取りと同時にスマートフォンにより自動撮影された写真である。現在の実装では, 撮影時に読み取られたタグのうち, 電波強度が最大だったタグの ID と写真が紐づけられており, 図 2 左では各 ID に紐付いた最新の写真が表示されている。

将来の改良では, タグが貼られているモノが何かをユーザが推定しやすいよう, ある写真をユーザが選択した時に, そのタグ ID に紐づけられた過去全ての写真を表示してもよいと考えている。また, 先行研究^[26]で提案されているように, タグを読み取りつつ, モノを特定しやすい明瞭な写真をユーザが意識して撮影してもよいと考えている。

3.5 タグの位置推定

本システムの使用により得られる履歴を利用した, 全タグの空間位置を推定する基本手法は, 4 章に詳述する。さらに 5 章では, 実空間におけるタグの位置推定を行い, その結果に基づき位置推定の誤差を低減する改良を行った。

履歴を用いた全タグの空間位置の推定は, サーバとして用いたラップトップコンピュータで実施した。タグが多くなるほど, 位置推定にかかる時間は多くなり, 本試作機では 400 枚のタグの空間位置の推定に 10 分程度必要である。また, 現在の実装では, 各種実験前に筆者が手作業で推定プロセスを起動する必要がある。実用化の際には位置推定の作業を, ユーザが適宜設定する時間帯, 例えば深夜などに, 自動起動するのが適切かと考えている。

3.2 節で述べたとおり, 全タグから目的タグまでの距離と向きを受信したスマートフォンは, ユーザ周囲のタグが読み込まれるたびに, 目的タグまでの距離と向きを表示する。この時, ユーザ周囲で複数のタグが読み取れた場合は, 各タグから目的タグまでの距離と向きを, 各タグの電波強度で加重平均して表示する。これにより, 移動したタグなどの位置推定精度の低いタグを読み取った場合でも, 他のタグとの平均化することにより影響を軽減できると考えている。

4. タグの位置推定手法

本章では, タグ検知とリーダ移動の履歴からタグの位置関係を推定する手順を説明する。

まず, タグ対の距離を同時検知率から推定する。こ

¹ <https://developer.apple.com/jp/documentation/arkit/>

れは、近くに位置するタグ対はリーダにより同時に検知される確率が高く、離れて位置するタグ対は同時に検知される確率が低いであろうと考えたからである。

次に、タグ対の向きを、タグ対を読み取る間にリーダが移動した方向とみなして、推定する。

そうして得られた、タグ対の距離をエッジの長さ、向きをエッジの向き、タグIDをノードとしたグラフを、力学モデルを使って最適化することで、全てのタグ対の距離と向きが最適化された全タグの空間位置を推定する。具体的には、タグを空間に配置して、推定されたタグ対の距離と方向に近いほどエネルギーが小さくなり、エネルギーの小さくなる方向へとタグに力が加わる力学モデルを設定し、このモデルの中でタグの空間位置を動かす、エネルギーが最小になるよう最適化する。

4.1 タグ対の距離推定

一对のタグの距離は、同時検知できるタグ対のみ、同時検知率から推定する。同時検知できないタグ対は、160cmより遠くに位置しているとみなして、具体的な距離は推定しない。

同時検知できるタグ対の距離は、160cm以内であるとみなし、具体的な距離 $dist$ を同時検知率 s から以下の式 (1) を使って算出する。式 (1) は、後述するシミュレーションの結果から算出した、距離を同時検知範囲の体積比から求める 9 次の回帰曲線 (図 5 の赤い線) の、体積比を同時検知率 s で置き換えた式である。

$$\begin{aligned}
 dist = & -1.4 \times 10^{-4} \times (s-100) + 1.6 \times 10^{-3} \times (s-100)^2 \\
 & -1.3 \times 10^{-2} \times (s-100)^3 - 1.2 \times 10^{-3} \times (s-100)^4 \\
 & -5.1 \times 10^{-5} \times (s-100)^5 - 1.1 \times 10^{-6} \times (s-100)^6 \\
 & -1.2 \times 10^{-8} \times (s-100)^7 - 7.2 \times 10^{-11} \times (s-100)^8 \\
 & -1.7 \times 10^{-13} \times (s-100)^9
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

同時検知率 s はタグ検知の履歴から以下の式 (2) を使って算出する。

$$\text{同時検知率 } s = \frac{\text{タグ対の同時検知回数}}{\text{各タグの検知回数の和}/2} \times 100\%
 \tag{2}$$

式 (1) の導出方法を、以下、具体例を用いて説明する。

具体例として、図 4 に示すとおり、タグ 1 の検知範囲を $V1$ (図 4 の青いトーラス)、タグ 2 の検知範囲を $V2$ (図 4 の赤いトーラス)、タグ 1 とタグ 2 の同時検知範囲を $V12$ (図 4 の青と赤のトーラスが重なっている黒い紡錘型)、タグ 1 とタグ 2 の距離を $D12$ とする。タグの検知範囲 $V1, V2$ は実態に沿った、直径 160cm 高さ 80cm のトーラス型とみなす。タグ 1 とタグ 2 の同時検知範囲 $V12$ の体積比 $R12$ は、タグの検知範囲

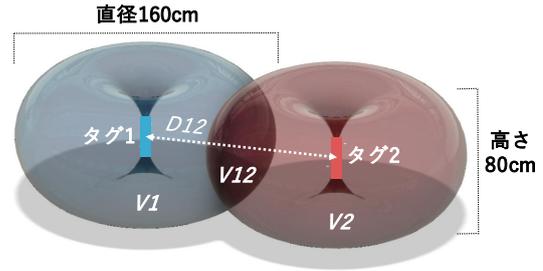


図 4 タグの検知範囲の例示. タグの検知範囲は直径 160cm 高さ 80cm のトーラス型とする. タグ 1 の検知範囲を青いトーラス $V1$, タグ 2 の検知範囲を赤いトーラス $V2$, タグ 1 とタグ 2 の同時検知範囲を $V12$ (青と赤のトーラスが重なっている黒い紡錘型)、タグ 1 とタグ 2 の距離を $D12$ とする.

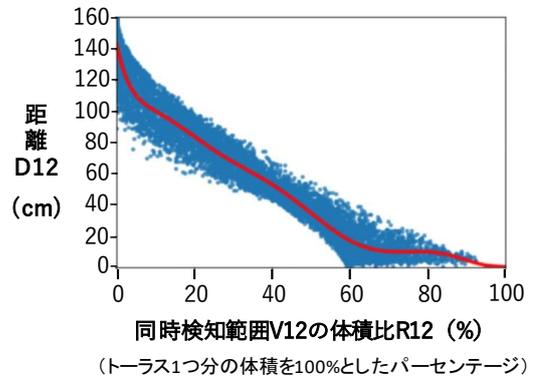


図 5 同時検知範囲 $V12$ の体積比 $R12$ と距離 $D12$ の関係をシミュレーションした上で 10000 回プロットした結果. 横軸はトーラス 1 つ分の体積を 100% としたパーセンテージ. 赤い線は 9 次の回帰曲線. 式 (1) はこの回帰曲線の $D12$ を $dist$, $R12$ を s に置き換えた式である.

$V1, V2$ の体積、つまりトーラス 1 つ分の体積を 100% とした、タグ 1 とタグ 2 の同時検知範囲 $V12$ の体積の比率とする。

まず、タグ 1 とタグ 2 の距離 $D12$ を、タグ 1 とタグ 2 の同時検知範囲 $V12$ の体積比 $R12$ から算出する式を求める。本手法では、体積比 $R12$ と距離 $D12$ の関係をシミュレーションした上で 10000 回プロットし、求めた回帰曲線を、体積比 $R12$ から距離 $D12$ を算出する式とする (図 5)。シミュレーションには AUTODESK 社の Fusion 360² を使用した。シミュレーション時は、タグの向きをランダムにした。理由は、体積比 $R12$ と距離 $D12$ の関係は、タグの向きによって異なるからである。例えば、体積比 $R12$ が 40% の時、タグ 1 とタグ 2 が平行に位置する場合は距離 $D12 = 70\text{cm}$ であるが、垂直に位置する場合は距離 $D12 = 45\text{cm}$ である。全てのタグの向きをユーザが手

² <https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/overview>

入力する、もしくはタグ検知の履歴から推定することは困難である。そのため、本手法では、タグの向きをランダムにした上でシミュレーションし、回帰曲線を求める。回帰曲線は、(体積比 R_{12} , 距離 D_{12})=(100, 0) を通るように算出する。理由は、タグ1の検知範囲 V_1 とタグ2の検知範囲 V_2 が完全に重なって、同時検知範囲 V_{12} がトラス1つ分となり、体積比 R_{12} が100% となる時、タグ1とタグ2は同じ向きとなり距離 D_{12} が0 になるからである。また、回帰曲線の次元は、1次から10次までのうち、RMSE(Root Mean Squared Error, 二乗平均平方根誤差) が最も少なかった9次とする。

次に、体積比 R_{12} を同時検知率 s で置き換える式を求める。体積比 R_{12} は、ユーザがタグの読み取りをランダムかつ多数行った場合、同時検知率 s と同値であるとみなすことができる。以下、式で具体的に説明する。体積比 R_{12} は、タグの検知範囲 V_1, V_2 の体積を100%とした、タグ1とタグ2の同時検知範囲 V_{12} の体積の比率のため、以下の式(3)で表せる。タグの検知範囲は、大きくなるほどタグを検知できる回数が多くなる。そこで、タグ1の検知回数を T_1 、タグ2の検知回数を T_2 、タグ1とタグ2の同時検知回数を T_{12} とする。すると、ユーザがタグの読み取りをランダムかつ多数行った場合、タグの検知範囲とタグの検知回数は比例するため、以下の式(3)=式(4)が成立する。式(4)は式(2)の右式と同等であるため、同時検知率 s と等しくなる。結果、体積比 R_{12} は同時検知率 s で置き換えられる。

$$\text{体積比 } R_{12} = \frac{V_{12}}{(V_1 + V_2)/2} \times 100\% \quad (3)$$

$$= \frac{T_{12}}{(T_1 + T_2)/2} \times 100\% \quad (4)$$

$$= \text{式(2)の右式} = \text{同時検知率 } s \quad (5)$$

以上のことから、タグ1とタグ2の距離 D_{12} を、タグ1とタグ2の同時検知範囲 V_{12} の体積比 R_{12} から算出する式(図5の赤い回帰曲線)を求め、その式の体積比 R_{12} を同時検知率 s で置き換える(式(5))ことで、上記の式(1)を具体的に導出できる。

4.2 タグ対の向き推定

一对のタグの向きは、タグ対を読み取る間にリーダーが移動した方向であるとみなす。また、方向の x, y, z 座標は、それぞれ南北方向(南から北方向が正)、鉛直方向(下から上方向が正)、東西方向(西から東方向が正)とした。向きの推定方法は具体的に以下のようにした。タグ検知の履歴において、ある t 回目の読み取りでタグ A、 $t+1$ 回目の読み取りでタグ B が読み取られた場合、タグ A とタグ B の向きは、 t 回目と $t+1$ 回目の読み取りの間にリーダーが移動した方向の単

位ベクトルであるとみなす。タグ A とタグ B の向きが既に算出されている場合は、過去の向きと新たに算出された向きを、適切な重みをつけて加重平均した上で単位ベクトルとする。重みは状況に応じてユーザが適切に設定する。後述する5章におけるタグ対の向きの推定時には、過去の向きと新たに算出された向きの重みは1:1とした。また、同時検知できるタグ対の向きは算出しないことにした。

4.3 全タグの空間位置の推定

全タグの空間位置は、タグ対の距離をエッジの長さ、タグ対の向きをエッジの向き、タグ ID をノードとしたグラフを、力学モデル^[27] を使って最適化することで推定する。

力学モデルとは、グラフのノードをクーロンの法則にしたがう電荷をもつ粒子、グラフのエッジをフックの法則にしたがうバネとみなし、グラフ全体が力学的エネルギーの低い安定状態である平衡状態になるよう、グラフを最適化するアルゴリズムである。本手法では、Fruchterman-Reingold アルゴリズム^[28] の一部を改良したアルゴリズムを用いてグラフを最適化する。

アルゴリズムの改良部分である、ノードおよびエッジに付与する力について説明する。

距離が推定されているタグ対のノードには、Fruchterman-Reingold アルゴリズムのとおり、バネの引力として d^2/k 、電荷をもつ粒子の斥力として k^2/d を付与する。ここで、 d はグラフにおけるノード間の現時点の距離、 k は理想の距離、つまり本手法においては、4.1節にて事前に推定されているタグ対の距離とする。

向きが推定されているタグ対のエッジには、回転力を付与する。具体的には、グラフにおける現時点のエッジの向きが、理想の向き、つまり本手法においては、4.2節にて事前に推定されているタグ対の向きへ近づくよう、エッジに対して垂直方向にノードが動く力を付与する。付与する力の大きさは、現時点のエッジの向きと理想の向きの差の角度に比例させる。

距離も向きも推定されていないタグ対は、互いに160cm以上離れた位置へ配置されるよう、互いの距離が160cmより近くなるほど大きな斥力が発生するようにする。

各ノードの初期位置は、多次元尺度推定法(MDS: Multi Dimensional Scaling)³を用いて、距離が推定されているノードは近くに、推定されていないノードは遠くに配置する。そうすることで、初期位置がランダムよりも全タグの空間位置の推定精度が上がると考えた。

³ <https://scikit-learn.org/stable/modules/manifold.html#multidimensional-scaling>



図6 5章および6章にて使用した実空間。筆者が日常生活で使用している研究室である。

5. 実空間におけるタグの位置推定

4章で説明したタグの位置推定手法の有用性を確認するために、実際にタグが貼られた部屋でタグを読み取り、得られた履歴から4章の手法でタグの位置を推定、実際の位置と比較した。その結果、位置推定に大きな誤差を生む傾向のあるタグ対の条件が判明したため、これらを除外する処理を位置推定手法に組み込んだ。

本手法の有用性確認のために使用した実空間(図6)は、筆者が日常生活で使用している研究室(横720cm×縦670cm)である。この実空間に、筆者がタグを400枚貼付した。その結果、隣接するタグは互いに160cm以内に位置した。実際の物探しにおいて、探したいモノのほとんどはユーザの手の届く場所に置かれていると考えた。そこで、貼付したタグの高さは10cmから180cmの範囲とした。タグが貼られた実空間において、実装した試作機(詳細は3章にて前述)を使って筆者がタグの読み取りを30,000回ランダムに行い、タグ検知とリーダ移動の履歴を収集した。実験に先立って、この実空間を模したコンピュータシミュレーションによりタグの読み取りを100,000回行ったところ、推定精度は30,000回手前で頭打ちとなったため、実空間でのタグの読み取りは30,000回とした。

なお、本研究における誤差の許容範囲は、タグ対の距離は約90cm以下、向きは約60度以下と考えた。これは、物探しをするヒトが手を伸ばして届く距離と、ヒトの有効視野の角度を目安に設定した。

5.1 タグ対の距離推定結果

結果(図7左)は、横軸を実距離(cm)、縦軸を推定距離(cm)として、距離を推定できたタグ対のみプロットした。プロット数、つまり、距離が推定できたタグ対は、全タグ対79,800中22,520であった。図7左の赤い線 $y = x$ にプロットが近いほど、推定精度が高いとみなすことができる。RMSE(Root Mean Squared Error, 二乗平均平方根誤差)は137.3cmとなった。

距離の誤差の平均は137.3cmと大きく、特に実距離

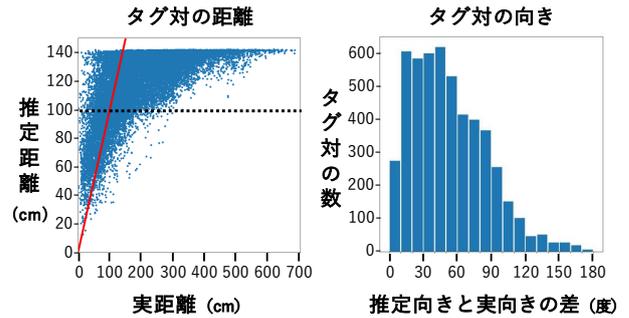


図7 タグ対の距離と向きを推定した結果。左：距離が推定できたタグ対をプロットした結果。赤い線は $y = x$ の直線を表す。黒い点線から上にプロットされた、推定距離が100cm以上のタグ対は、誤差が大きいタグ対として取り除いた。右：向きが推定できたタグ対をヒストグラムにした結果。

が160cmよりも大きいほど誤差が大きくなった。これは、マルチパスなどの影響で、160cmよりも離れたタグ対が同時に読み取れてしまうことが原因と考えられる。

5.2 タグ対の向き推定結果

結果(図7右)は、向きの算出対象となり、向きを推定できたタグ対をヒストグラムにした。横軸は誤差角度、すなわち推定向きと実向きの差の絶対値である。ヒストグラムの度数合計、つまり、向きが推定できたタグ対は、全タグ対79,800中5,077であった。このヒストグラムは、左側の度数が多いほど、誤差が小さいタグ対が多く、推定精度が高いとみなすことができる。向きの誤差の平均は52.8度となった。

5.3 誤差が大きいタグ対への対応

距離の誤差の平均は137.3cmとなり、許容範囲と考える90cmを超えた。ここで、タグ対の実距離と推定距離をプロットした図7左を見ると、推定距離が100cm以上のタグ対は、本来プロットされるべき赤い線から大幅に外れているものが多く、距離推定が著しく不正確になっていると考えた。そのため、推定距離が100cm以上であるタグ対18,334(図7左の黒い点線から上のプロット)を、距離を推定できたタグ対から除外した。この基準で誤差の大きいタグ対を除外することで、距離の誤差の平均が37.4cmと改善され、許容範囲と考える90cm以下となった。他の除外基準の適用も試みた結果、この基準が適切であると考えた。そこで、後述する全タグの空間位置の推定には、推定距離が100cmより小さいタグ対4,186の推定距離のみを使用した。今回は除外するタグ対の推定距離を固定値としたが、将来は、ユーザが状況に応じて適切に設定できるようにしたい。

向きの誤差の平均は52.8度となり、許容範囲と考える60度より小さかった。そのため、後述する全タ

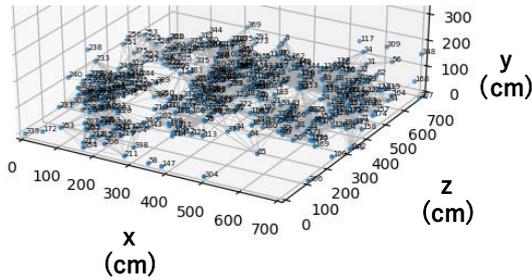


図8 推定した全タグの空間位置を3次元のグラフとして描画した結果. ノード上の数字はタグIDを表す. エッジは推定距離または推定向きがあるタグ対の間に描画した.

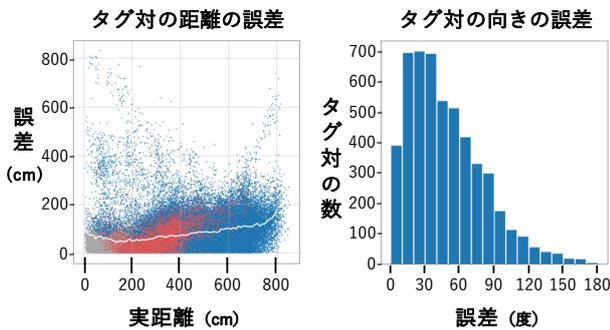


図9 全タグの空間位置を推定した結果. 左:全タグ対の距離の誤差をプロットした結果. 青いプロットは事前に距離も向きも推定されなかったタグ対, 灰のプロットは事前に距離が推定されたタグ対, 赤いプロットは事前に向きが推定されたタグ対を示す. 白い線は誤差の平均を表す. 右:全タグ対の向きの誤差をヒストグラムで表した結果.

グの空間位置の推定には, 推定されたタグ対の向きを全て使用した.

5.4 全タグの空間位置の推定結果

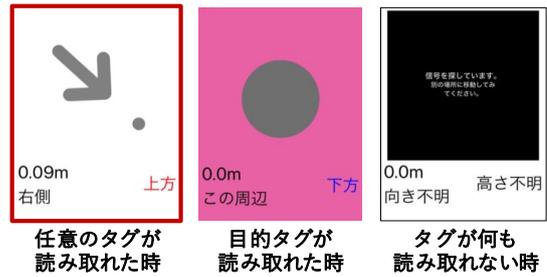
前述の推定結果から得られた, タグ対の推定距離および推定向きを用いて, 4.3節で説明した力学モデルにより全タグの空間位置を推定し, 3次元のグラフとして描画した(図8).

推定した全タグの空間位置から得られた, タグ対の距離および向きの誤差を図9に示す. 図9左は, 横軸をタグ対の実距離, 縦軸を誤差の長さ(cm)として, 全てのタグ対をプロットした. 図9右は, 横軸を誤差の角度(度), 縦軸をタグ対の数として, 全てのタグ対をヒストグラムにした. 全てのタグ対の, 距離の誤差の平均は76.3cm, 向きの誤差の平均は43.9度であった. これらは, 許容範囲と考えた90cmおよび60度より小さかった.

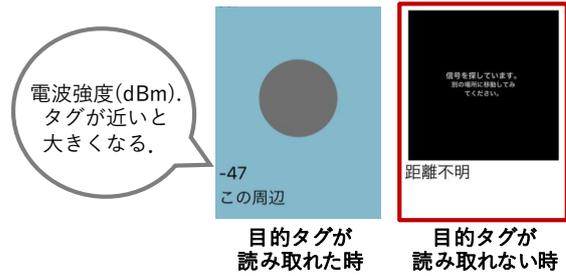
6. ユーザ実験

提案手法が既存手法と同等の物探し支援を実現できることを確かめるため, 実際の生活空間にてユーザが物探しをする実験を行った. そして, 探すモノが見つ

提案手法のアプリケーション



Pタグ手法のアプリケーション



Aタグ手法のアプリケーション

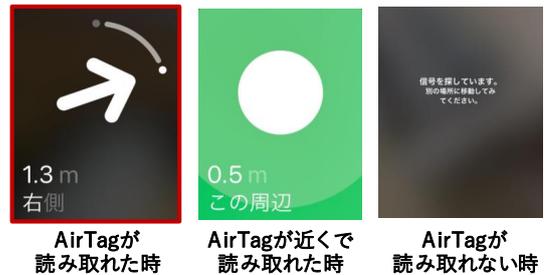


図10 各手法のアプリケーション画面. 任意のタグを読み取ると, 目的タグまでの距離や方向や遠近を提示する. 赤い枠の画面は実験中に提示されることが多かった画面.

かるまでにかかった時間とスマートフォンを動かした距離, アプリケーションの使いやすさと物探しの負担を比較した. 提案手法では5章で推定した全タグの空間位置を利用した.

実験場所は, 筆者が日常生活で使用している研究室全域(図6:5章で前述した実空間)とした. 本研究室は, 共用の部屋かつモノが多数あるため, 物探しが多発する空間である. 実験前に筆者は, 5章に前述したとおり, 本研究室にて400枚のタグを貼付し30,000回のタグの読み取りを行った. そうして得られた履歴から推定した全タグの空間位置を, あらかじめサーバへ保存した上で, 実験を行った.

6.1 比較手法

本実験では, 提案手法に対して, 既存の2手法を比較した. 以下, それぞれを提案手法, Pタグ手法, Aタグ手法と呼ぶ. これらのアプリケーション画面を, 図10に示す.

提案手法は本研究の手法である. 提案手法のアプリケーションは, 任意のタグが読み取れると, 目的タグ

パッシブ RFID タグ検知とリーダ移動の履歴からタグの空間位置を推定する物探し支援システム

までの距離 (m) と水平方向の向き (矢印) と上下方向を提示する (図 10 上段の左)。実験中はこの画面が提示されることが多かった。目的タグが直接読み取れた場合は図 10 上段の中央の画面を提示する。タグが何も読み取れなかった場合は図 10 上段の右の画面を提示する。

P タグ手法は、1つのパッシブ RFID タグを使ったシンプルな手法である。P タグ手法のアプリケーションは、目的タグが読み取れた場合のみ、電波強度 (dBm) を提示する (図 10 中段の中央)。電波強度についての説明は実験前に実験参加者へ実施した。具体的には、提示される電波強度は探すモノに近くなるほど値が大きくなり、最小は-70 程度で最大は-30 程度であることを伝えた。P タグ手法のアプリケーションは筆者が実装し、目的タグに 1m 程度ほど近づくと図 10 中段の中央の画面を提示できることを確かめた。目的タグが読み取れない場合は図 10 中段の右の画面を提示する。実験中はこの画面が提示されることが多かった。

A タグ手法はアクティブ RFID タグの製品である AirTag^[2] を 1 つ使った手法である。A タグ手法のアプリケーションは、AirTag の既存アプリケーション (探す.app⁴) を使用し、リーダの役割は iPhone 11 Pro が担った。A タグ手法のアプリケーションは、探すモノに取り付けた AirTag が読み取れた場合に、AirTag までの距離 (m) と向き (矢印) を提示する (図 10 下段の左)。実験中はこの画面が提示されることが多かった。AirTag が近く (1m 前後) で読み取れた場合は図 10 下段の中央の画面を提示する。AirTag が読み取れない場合は図 10 下段の右の画面を提示する。AirTag の既存アプリケーションには、AirTag 内蔵のスピーカから音を鳴らす機能や、AirTag が近くなるとスマートフォンを振動させる機能があるが、本実験ではそれらの機能は使わないようにした。

6.2 探すモノ

実験参加者が探すモノは、図 11 に示すヘアブラシ、メガネ、キーケースの 3 種とした。これらは、なくしやすいモノのランキング 10 位以内^[29] のモノである。これらにそれぞれ、パッシブ RFID タグ (ShortDipole) とアクティブ RFID タグ (AirTag) を取り付けたのち、9ヶ所の隠し場所 (図 12) に筆者が隠した。隠す際は、実験参加者が他のモノを動かさずとも目視で見つけられるように隠した。さらに、物探し中に実験参加者が他の探すモノを見つけないように、探すモノは物探し毎に筆者が 1 つずつ隠した。

6.3 実験参加者と実験手順

10 名の実験参加者 (23 歳から 58 歳の男性 3 名および女性 7 名) が本実験に参加した。10 名中 6 名にとっ



図 11 探すモノ。左から、ヘアブラシ、メガネ、キーケース。

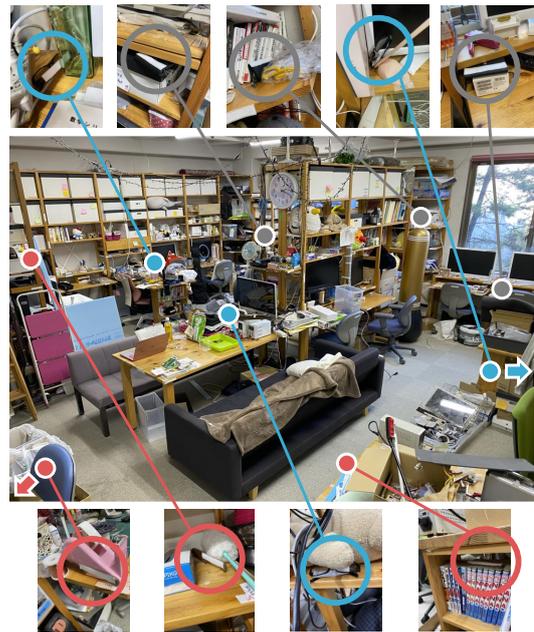


図 12 探すモノを隠した場所と隠し方。赤い丸がヘアブラシ、青い丸がメガネ、灰の丸がキーケースを隠した場所。

て、実験場所は既知の生活空間であった。実験参加者は全員、RFID タグを使用する物探しアプリを過去に使用したことはなかった。実験参加者は事前に実験に関する説明を聞き、同意してから実験に参加した。

実験参加者は、スマートフォン一体型の携帯型のリーダを手を持ち、リーダが自動でタグを読み取る毎に変化する、スマートフォンのアプリケーション画面を手がかりに物探しを行った。具体的には、3種の手法 (提案手法、P タグ手法、A タグ手法) それぞれのアプリケーション (図 10) を使い、手法毎に 3 種のモノ (図 11: ヘアブラシ、メガネ、キーケース) を見つける物探しタスクを実施した。探すモノと隠す場所とアプリケーションを使用する順番は実験参加者毎にランダムとした。

詳細の実験手順を以下に示す。

1. 筆者が実験参加者に、物探しタスクおよび各手法のアプリケーションについて説明する。

4 <https://support.apple.com/ja-jp/HT210967>

2. 実験参加者は練習として、以下の物探しタスクを各アプリケーション1回ずつ合計3回実施する。
 - a. 開始地点のドア前へ移動
 - b. アプリケーション上の”START”ボタンを押す
 - c. 探すモノを歩き回って探す
 - d. 探すモノが見つかったらアプリケーション上の”STOP”ボタンを押す
3. 練習後、実験参加者は本番として、上記の物探しタスクを各アプリケーションにつき3回、合計9回実施する。
4. 全ての物探しタスクが終わった後、実験参加者は手法ごとに以下へ答える。
 - アプリケーションの使いやすさに関するアンケート (SUS: System Usability Scale) [30]
 - 物探しの負担に関するアンケート (NASA-TLX: NASA Task Load Index) [31]
 - 自由記述の感想

探すモノをアプリケーション上で選択する行為は筆者が行い、実験参加者の物探しタスクには含めなかった。これは、探すモノの選択方法や候補数が、各アプリケーションで大きく異なり統制が困難だと筆者が考えたからである。

6.4 時間と距離の測定

探すモノが見つかるまでに、かかった時間(秒)とスマートフォンが動いた距離(m)は、前述したアプリケーション上で筆者が実装した機能を使って測定した。具体的には、前述した6.3節の実験手順2における、(b)”START”ボタンが押されてから(d)”STOP”ボタンが押されるまでの間の、時間とスマートフォンが動いた距離をアプリケーションが測定し記録した。スマートフォンが動いた距離は、iOSのAPIであるARKitを用いて、スマートフォンのカメラ映像およびモーションセンサ値から推定した。

6.5 アンケート

全ての物探しタスクが終わった後、実験参加者にアンケートの回答を依頼した(6.3節の実験手順4)。この質問紙を図13に示す。

アプリケーションの使いやすさはSUS(System Usability Scale)の日本語訳[32]を参照して作成した質問紙(図13上)を用いて評価した。SUSは10項目を5段階で評価する方法で、上から奇数番目の項目のスコアから1を引いた値と、偶数番目の項目のスコアを5から引いた値を足し、2.5をかけることで、総合スコアを得る。最高スコアは100であり、総合スコアが100に近いほど使いやすいとみなすことができる。総合スコアの平均は70と言われている[33]。

物探しの負担はNASA-TLX(NASA Task Load Index)の質問紙(図13下)を用いて評価した。NASA-TLXは、7尺度をそれぞれ100点満点で評価する方

SUSの質問紙

◆各アプリについて主観的な使いやすさを5段階で評価してください
 ◇1:とても同意しない ~ 5:とても同意する

アプリを頻繁に使用したい	1・2・3・4・5 5=とても同意する
アプリは不必要に複雑である	1・2・3・4・5 5=とても同意する
アプリは使いやすい	1・2・3・4・5 5=とても同意する
アプリ使用には技術者の支援が必要	1・2・3・4・5 5=とても同意する
さまざまな機能が上手に統合されている	1・2・3・4・5 5=とても同意する
アプリには一貫性がない	1・2・3・4・5 5=とても同意する
多くの人が使用方法を簡単に学べる	1・2・3・4・5 5=とても同意する
アプリは使いにくい	1・2・3・4・5 5=とても同意する
自信を持ってアプリを使えた	1・2・3・4・5 5=とても同意する
使用前に多くを学ぶ必要があった	1・2・3・4・5 5=とても同意する

NASA-TLXの質問紙

◆各アプリについて主観的な作業負担を100点満点で評価してください
 ◇大きい強い悪い多い高いと感じたほど100点に近い高い点数をつけてください

Mental Demand (知的・知覚的要求) どの程度の知的・知覚的活動(考える決める計算する記憶する見るといふ必要を要したか、課題はやさしかったですか難しかったですか、単純でしたが複雑でしたか、大ざっぱでよかったですか正確さが求められましたか。	/100 負担が大きい=高い点
Physical Demand (身体的要求) どの程度の身体的活動(押す引く、回す、制御する、動き回るなど)を必要としましたか、作業はラクでしたかキツかったですか、ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが、休み休みできましたか働きづめでしたか。	/100 負担が大きい=高い点
Temporal Demand (タイムプレッシャー) 仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感ほどの程度でしたか、ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか、それとも速くて余裕のないものでしたか。	/100 強い=高い点
Performance (作業成績) 作業指示者に設定された課題の目標をどの程度達成できたかと思えますか、目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか。	/100 悪い=高い点
Effort (努力) 作業成績のレベルを達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければならませんでしたか。	/100 多い=高い点
Frustration Level (フラストレーション) 作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じましたか、あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、リラックス、楽しさをどの程度感じましたか。	/100 高い=高い点
Overall Workload (全体的な負担) さまざまな負担要因、負担原因、部分部分の課題内容を総合すると、全体としてどの程度の作業負担を感じましたか。	/100 負担が大きい=高い点

図13 物探し後に実験参加者が回答した質問紙。上:アプリケーションの使いやすさを5段階で評価するSUS(System Usability Scale)の質問紙。下:物探しの負担を100点満点で評価するNASA-TLX(NASA Task Load Index)の質問紙。

法で、実験参加者は負担が大きいほど大きい点数をつけて評価する。本実験では、各尺度に重みをつけない簡便法であるR-TLX[34]を用いて評価した。

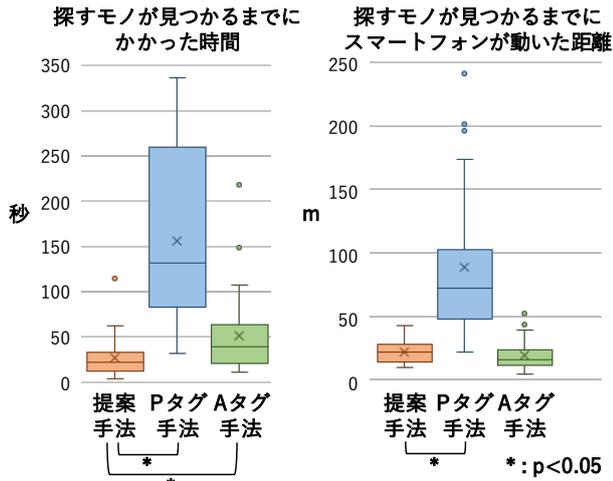


図 14 ユーザ実験で測定した値の結果. 左: 探すモノが見つかるまでにかかった時間 (秒). 右: 探すモノが見つかるまでにスマートフォンが動いた距離 (m).

6.6 実験結果

本実験で得られた測定値 (時間と距離) とアンケート結果 (SUS と R-TLX) を、手法ごとに平均した結果を箱ひげ図 (図 14, 15) で示した. さらに、提案手法と比べた場合に、有意に差があるかを確かめるため、ウィルコクソンの符号順位検定を行った. 2 群間 (提案と P タグ, 提案と A タグ) で比べ、得られたデータは全て対応があり、シャピロ・ウィルク検定の結果データに正規性がないことがわかったため、ウィルコクソンの符号順位検定を用いた^[35].

6.6.1 物探しに要した時間

探すモノが見つかるまでにかかった時間 (秒) の平均 (図 14 左) は、提案手法が 27.4 秒であった. 提案手法と P タグ手法 (平均 156.1 秒) を比べると提案手法の方が有意に短かった ($V = 0, p = 1.9 \times 10^{-9} < 0.05$). 提案手法と A タグ手法 (平均 51.9 秒) を比べると提案手法の方が有意に短かった ($V = 103, p = 0.0066 < 0.05$).

6.6.2 物探しに要した距離

探すモノが見つかるまでにスマートフォンが動いた距離 (m) の平均 (図 14 右) は、提案手法が 21.9m であった. 提案手法と P タグ手法 (平均 88.3m) を比べると提案手法の方が有意に短かった ($V = 1, p = 3.7 \times 10^{-9} < 0.05$). 提案手法と A タグ手法 (平均 19.3m) を比べると有意な差はなかった ($V = 297.5, p = 0.19 > 0.05$).

6.6.3 使いやすさのスコア

アプリケーションの使いやすさのスコア (最大 100, 100 に近いほど使いやすい) の平均 (図 15 左) は、提案手法が 87 であった. 提案手法と P タグ手法 (平均 55.8) を比べると提案手法の方が有意に高かった ($V = 55, p = 0.002 < 0.05$). 提案手法と A タグ手法 (平均 90) を比べると有意な差はなかった ($V = 0, p =$

$0.063 > 0.05$). 提案手法と A タグ手法で、質問項目ごとのスコアを比べると、実験参加者 10 名全員が 10 項目中 9 項目に同じスコアまたは A タグ手法に 1 高いスコアをつけていた. しかし、”さまざまな機能が上手に統合されている”の項目では、10 名中 2 名が提案手法の方に 1 高いスコアをつけていた.

6.6.4 物探しの負担の点数

物探しの負担の点数 (最大 100 点, 100 点に近いほど負担が大きい) の平均 (図 15 右) を尺度ごとに比べた. 具体的な平均点は表 1 に示す. さらに、P タグ手法と A タグ手法をそれぞれ提案手法と比べた検定結果を表 2 に示す. ここでは 7 尺度で検定をしているため、ボンフェローニ補正を行った.

提案手法と P タグ手法を比べると、Performance 以外の尺度の点数は、提案手法の方が有意に小さかった. 提案手法と A タグ手法を比べると、全ての尺度において提案手法と有意な差はなかった.

6.7 考察

提案手法のアプリケーションを使った実験参加者は、探すモノを問題なく見つけられた. このことから、提案手法で事前に推定した全タグの空間位置をもとに、ユーザは物探しできることが確認できたと考えられる. また、提案手法を用いることで、P タグ手法および A タグ手法よりも探すモノが有意に早く見つけられたため、本研究で短時間の物探しが実現できたと考えられる. さらに、提案手法を用いたときの主観的な負担は、P タグ手法よりも有意に少なく、A タグ手法と同程度となったため、提案手法はパッシブ RFID タグのみを使用したにも関わらず、既存のアクティブ RFID タグを使用する手法と同程度の主観的な負担で、物探し支援を実現できたと考えられる.

6.7.1 物探しに要した時間

P タグ手法は提案手法より、物探しに要した時間の平均が大幅に長かった. 実際に、P タグ手法のアプリケーションを使った実験参加者は、探すモノをほぼ目視で探しており、部屋を満遍なくランダムに動き回る様子が観察された. 原因は、P タグ手法のアプリケーションは、探すモノが 1m 程度に近づき電波強度が表示 (図 10 中段の中央) されるまでは、何も表示しない (図 10 中段の右) からだと考えられる. 実験参加者が探し始めた場所が探すモノの隠し場所に近かった場合は探すモノを比較的早く見つけられた一方で、目的タグを偶然ずっと検知できなかった実験参加者は部屋を 3 周することもあった.

A タグ手法も提案手法より、物探しに要した時間の平均が長かった. 実際に、A タグ手法のアプリケーションを使った実験参加者のうち数人が、物探し開始直後に探すモノがない方向へ動いてしまう様子が観察された. 原因は、A タグ手法のアプリケーションは矢印を

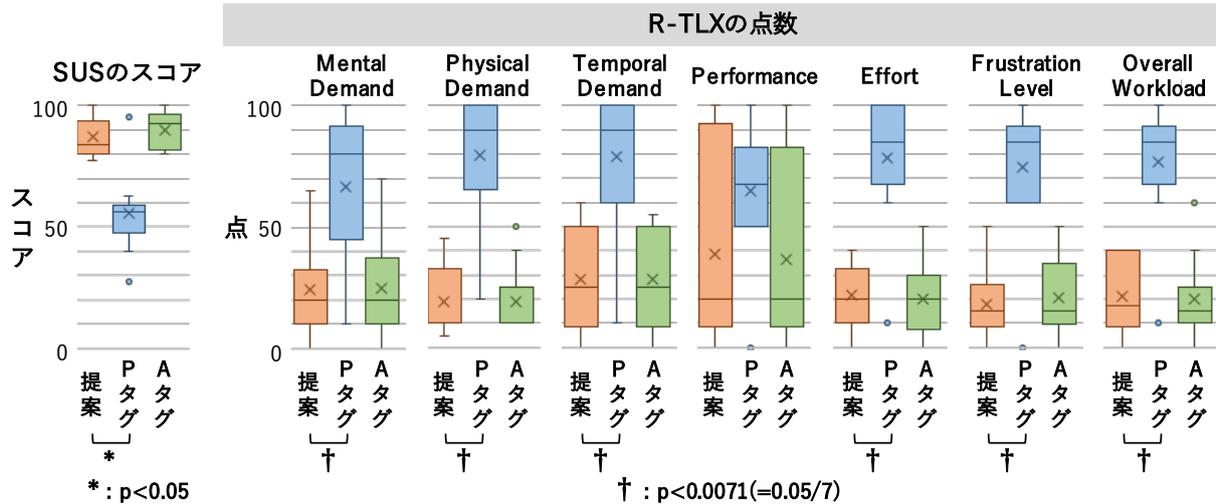


図 15 ユーザ実験のアンケート結果. 左: SUS のスコア (最大 100, 100 に近いほどアプリケーションは使いやすい). 右: R-TLX の点数 (最大 100 点, 100 点に近いほど物探しの負担が大きい).

	Mental Demand	Physical Demand	Temporal Demand	Performance	Effort	Frustration Level	Overall Workload
提案	24.5	19.0	28.5	38.5	21.5	18.0	21.0
P タグ	66.5	79.5	79.0	64.5	78.5	74.5	76.5
A タグ	25.0	19.0	28.0	36.5	20.0	20.8	20.0

表 1 R-TLX の具体的な平均点.

	Mental Demand	Physical Demand	Temporal Demand	Performance	Effort	Frustration Level	Overall Workload
P タグ	V = 0.0 p = 0.0039	V = 0.0 p = 0.0020	V = 0.0 p = 0.0020	V = 4.0 p = 0.055	V = 0.0 p = 0.0020	V = 0.0 p = 0.0039	V = 0.0 p = 0.0020
A タグ	V = 11 p = 1.0	V = 8.0 p = 1.0	V = 8.0 p = 1.0	V = 4.5 p = 0.75	V = 13 p = 0.75	V = 5.0 p = 0.56	V = 11 p = 1.0

表 2 R-TLX を提案手法と比べた検定結果. 灰色のセルは p 値が 0.0071(=0.05/7) 以下.

表示 (図 10 下段の左) するまでに物探し開始から数秒かかったためと考えられる. 一方, 提案手法のアプリケーションは, 物探し開始直後にすぐに矢印を表示 (図 10 上段の左) していたため, 実験参加者は物探し開始直後に探すモノがある方向へ動くことができていた.

A タグ手法が提案手法より, 物探しに要した時間の平均が長かったもう 1 つの理由は, A タグ手法のアプリケーションを使った実験参加者のうち数人は, 探すモノを目視で探した時間が提案手法よりも長かったからだと考えられる. 原因は, 探すモノが 1m 前後に近づいたときに, A タグ手法のアプリケーションは丸 (図 10 下段の中央) のみを表示し, 矢印が表示 (図 10 下段の左) されなくなることで, 手がかりが距離のみになるからだと考えられる. 一方, 提案手法のアプリケーションでは, 探すモノが 1m 程度に近づいたあとも, 丸 (図 10 上段の中央) と矢印 (図 10 上段の左) の

表示が不規則に切り替わっていた. これは, 提案手法は複数のタグを検知できるため, 探すモノのタグだけを継続的に検知せず, 探すモノの付近にある他のタグも不規則に検知するからだと考えられる. そのため, 提案手法のアプリケーションは, 探すモノにより近いところまで矢印で実験参加者を誘導できていた. 矢印が表示されなくなった場合に, 実験参加者が目視での物探しを多く行なったことは, 実験中に筆者が観察した実験参加者の様子に加えて, 実験後に実験参加者が自由に記述した感想からもみてとれた.

物探しに要した時間は, アプリケーションへの慣れや, 探すモノと実験参加者が探し始めた場所との距離とは相関がなかった. 一方で, 探すモノと隠し場所が同じでも, 早く見つけられる実験参加者となかなか見つけられない実験参加者がいた. そのため, 探すモノが見つかるまでにかかった時間は, 個人と隠し場所の

相性に影響されると考えられる。

6.7.2 物探しに要した距離

探すモノが見つかるまでにスマートフォンが動いた距離の平均は、P タグ手法が提案手法よりも長かった。そのため、提案手法の方が、実験参加者の身体的な負担が少ない物探しが実現できたと考えられる。

A タグ手法と提案手法は、物探しに要した時間の平均が異なるにも関わらず、動いた距離の平均は有意な差が見られなかった。理由としては、A タグ手法のアプリケーションを使った実験参加者は、探すモノの近くに移動してからは、スマートフォンをあまり動かさないまま、目視で探していたからだと考えられる。

6.7.3 使いやすさのスコア

P タグ手法は提案手法よりもスコアの平均が低かったため、P タグ手法は提案手法よりも使いにくかったと考えられる。理由は、P タグ手法のアプリケーションでは、探すモノの方向がわからず、探すモノが1m程度近くにある以外の情報が提示されないためであったことが、実験参加者の自由記述から推察される。

A タグ手法と提案手法のスコアの平均は有意な差が見られなかったため、使いやすさは同程度であったと考えられる。しかし、提案手法のアプリケーションは、製品として洗練されている A タグ手法のアプリケーションと比べると、UI の質は低いと考えられる。具体的には、画面の更新が0.5秒毎であり、距離の変化や矢印の動きが滑らかではなかった。しかしながら、スコアの平均に有意な差が見られなかった理由としては、提案手法のアプリケーションは探すモノの上下方向を表示しているため、“さまざまな機能が上手に統合されている”の項目で A タグ手法よりも高いスコアを得られたからだと考えられる。

提案手法の精度に関しては特に実験参加者からの言及がなかったため、提案手法と A タグ手法の精度の差は気にならない程度であったと考えられる。そのため、提案手法で事前に推定した全タグの空間位置を使った場合でも、実験参加者にとっては、A タグ手法、つまり製品と同等の支援が得られていたのだと考えられる。

6.7.4 物探しの負担の点数

7 尺度のうち Performance の点数は、各手法で有意な差が見られなかった。Performance は作業成績、つまり、物探しがどれほど上手くできたかを実験参加者が自己評価する尺度である。有意な差が見られなかった理由としては、探すモノを早く見つけられたにも関わらず厳しい自己評価をしている実験参加者が多かったからだと考えられる。具体的に、実験参加者が自由に記述した感想には、アプリケーションを使ったにも関わらず思ったよりも早く見つけられず悔しかった、思いのほか早く見つかった時もあったがそれは偶然であった、などの自己評価が低い記述があった。

P タグ手法の他 6 尺度の点数の平均は、提案手法と比べて大きかったため、P タグ手法は物探しの負担が大きかったと考えられる。P タグ手法のアプリケーションでは、距離や方向が提示されなかったため、実験参加者は部屋の隅々までスマートフォン一体型の携帯型のリーダを動かさなければならなかった。そのため、無駄な動きによる時間と移動のロスが多かったと感じる実験参加者が多かったからだと考えられる。

A タグ手法と提案手法は、他 6 尺度の点数の平均が有意な差が見られなかったため、物探しの負担は同程度であったと考えられる。

7. 制約

7.1 多数のタグの貼付が前提

提案手法は、事前にタグが貼られている部屋での使用を前提としている。ユーザがタグを貼る場合、タグを貼る行為はユーザの負担となってしまうが、貼ったモノは全て物探しの対象とすることができるため、タグを貼るほど利便性が向上すると考えている。

本システムを使用し始めた初期段階では、貼られたタグが極端に少ない場合が考えられる。その場合でも、ユーザは P タグ手法と同等の物探し支援が得られる。その後、貼られるタグが増えるにつれて、ユーザは実験時の提案手法に近い物探し支援を徐々に得られるようになる。提案手法は、タグ1つから使い始められて、その後タグを増やすことで性能が上がる方式である。

提案手法では、タグの密度がある程度高まるとタグ対の向きが推定できるようになる。さらにタグの密度が高まり、タグを2つ以上同時に読み取れる密度になると、タグ対の距離が推定できるようになる。そのため、貼るべきタグの数は、ユーザが受けたい物探し支援のレベル、部屋の広さ、タグとリーダの性能で決まるタグの検知範囲に応じて、ユーザが適切に決定することもできる。

7.2 タグ検知とリーダ移動の履歴の蓄積が必要

本システムを導入した直後は、タグ検知とリーダ移動の履歴の蓄積が不十分で、全タグの位置関係の推定は困難である可能性がある。しかし、その場合でも、提案手法は P タグ手法と同等の物探し支援をユーザに提供できる。本システムをユーザが使用し続け、履歴が蓄積されるにつれて、ユーザは実験時の提案手法に近い物探し支援を徐々に得られるようになる。

有用な物探し支援を提供するために必要な履歴の蓄積量は、ユーザが必要とする物探し支援のレベルに依存する。また、部屋にタグがどのように貼られているかにも依存する。例えば、実験場所の状況で、実験時の提案手法と同等の物探し支援を実現するためには、30,000 回の読み取りで得られる履歴の蓄積量が必要である。この蓄積量は、1 日の物探し時間が一般的な平

均である10分^[29]とし、1分あたり120回のタグが読み取られるとすれば、およそ1ヶ月で蓄積が実現できる量である。履歴を蓄積するためだけにタグを読み取る行為は、ユーザの負担となってしまいが、実際には、物探し行為と兼ねることができ。また、ロボット^[3]や掃除機やペットなど、部屋内を動き回る何かにリーダーを取り付け、タグの読み取りを代行させても良いであろう。

7.3 ユーザへの適切な行動指示に関する知見の不足

提案手法は、ユーザが読み取った手近にある任意のタグから、目的タグまでの距離と向きを提示する。この方式に由来する以下のような特徴的な挙動が、ユーザ実験で確認された。

タグが検知できない空間、例えば、タグが貼られている机や棚から遠い空中では、提案手法のアプリケーション画面が変化しなくなる。その場合、ユーザの位置に応じた適切な情報の提示が行えなくなってしまう。そのため、タグの読み取りはタグが貼られている空間の近くで行わなければならない。

提案手法のアプリケーション画面は、リーダーおよびスマートフォンの処理性能の制約のために、0.5秒毎に更新される。そのため、Aタグ手法のアプリケーションに比べると、反応が鈍いように感じることもある。状況によっては、目的タグの方向を示す矢印がAタグ手法ほど滑らかに動かず、小刻みにブレて表示される場合もある。

推定精度の悪いタグをたまたま読み取ってしまうと、提示される情報の精度が下がることがある。特に、上下方向の提示は精度があまりよくなかったように感じられていたことが、実験参加者の自由記述からみてとれた。理由は、タグが棚板や机の奥など、上下に障害物が多い場所に貼られていた場合に、事前の位置推定が精度よくできていなかった影響だと考えられる。そのため、ユーザは一箇所にとどまらず、スマートフォンを動かしてなるべく多くのタグを読み取り、推定精度の悪いタグの影響を軽減させることが推奨される。

8. 今後の課題

8.1 移動するタグへの対応

本稿では、まず、提案手法の有用性を確認するため、全タグが移動しないことを前提としていた。しかし、日常生活では、タグがヒトの手によって移動してしまうことが考えられる。そこで、移動するタグを含めた、全タグの位置関係を精度よく推定するために、直近のタグ検知とリーダー移動の履歴に重みをつけて、タグ対の距離と向きを推定することを考える。

具体的に、タグ対の距離を推定する時(詳細は4.1節にて前述)は、あるタグ対の同時検知率が一定以下へ

と変動した場合、そのタグ対は同時検知できなくなった、つまり160cm以上離れてしまったとみなし、同時検知率を0とする。以降そのタグ対は、再度同時検知されてから得られた履歴のみを用いて、タグ対の距離を算出する。また、タグ対の向きを推定する時(詳細は4.2節にて前述)は、過去の向きよりも新たに算出された向きの方に、重みをつけた上で算出する。

以上の対応により、より直近の履歴を使って全タグの位置関係を推定できるため、タグが移動した後の状況を早く反映できると考えられる。今後は、前述した実装を加えた上で実世界で実験を行い、日常生活にて移動したタグへの対応が可能かを確かめたい。

8.2 UIの改良

提案手法のアプリケーションでは、視覚情報を提示することで物探しを支援した。しかし、物探しは目視で行うため、視覚以外でも手がかりを得たいと、実験参加者から要望があった。今後は、音や振動も使ったUIへと改良したい。

9. まとめ

本研究は、パッシブRFIDタグ検知とリーダー移動の履歴から、全タグの空間位置を推定する物探し支援手法を実現した。これは、ヒトが過去の物探しの経験から効率的に物探しを行うのと同様な方式である。提案手法で物探しを行うユーザが、部屋中にあらかじめ貼られている任意のタグを読み取ると、探したいモノまでの距離と向きをスマートフォン画面に表示する。

本稿では、力学モデルを使用したタグの位置推定手法を実装し、実空間で検証した。そのうち、得られた全タグの空間位置を用いて、実際の生活空間で物探し実験を実施した。結果として、現状の推定精度でもユーザは問題なく物探しができることを確認した。また、本システムの使用による、短時間かつ主観的な負担が少ない物探しの実現が確認できた。

今後は、移動するタグへ対応するための実装や、音や振動などを駆使したUIへの改良を行う。さらに、日常生活にて長期間使用してもらい、さらなる有用性を確認する。

利益相反の開示

本研究は「JSPS 科研費 JP18K11392」の研究費で実施された。

参考文献

- [1] Pixie: The nation's biggest lost and found survey, by Pixie, Pixie (online), available from (<https://tinyurl.com/yxrxbsnp>) (accessed 2022-02-01).
- [2] Apple: AirTag, Apple Inc. (online), available from (<https://www.apple.com/jp/airtag/>) (accessed 2022-02-01).

- [3] Komatsuzaki, M., Tsukada, K., Siio, I., Verronen, P., Luimula, M. and Pieskã, S.: IteMinder: Finding items in a room using passive RFID tags and an autonomous robot, *Proc. UbiComp '11*, pp. 599–600 (2011).
- [4] Sasagawa, M., Ikematsu, K. and Siio, I.: Simply Tag and Find: Finding indoor items by using detection history of RFID tags, *Proc. UbiComp '16 Adjunct*, pp. 365–368 (2016).
- [5] 笹川真奈, 池松香, 椎尾一郎: RFID タグ検出履歴の蓄積を利用した物探し支援システム, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 22, No. 2, pp. 187–200 (2020).
- [6] Nakada, T., Kanai, H. and Kunifuji, S.: A support system for finding lost objects using spotlight, *Proc. Mobile HCI '05*, pp. 321–322 (2005).
- [7] Nickels, J., Knierim, P., Könings, B., Schaub, F., Wiedersheim, B., Musiol, S. and Weber, M.: Find My Stuff: Supporting physical objects search with relative positioning, *Proc. UbiComp '13*, pp. 325–334 (2013).
- [8] Schwarz, D., Schwarz, M., Stückler, J. and Behnke, S.: Cosero, Find My Keys! Object localization and retrieval using Bluetooth low energy tags, *Proc. RoboCup '14*, pp. 195–206 (2014).
- [9] Hightower, J., Borriello, G. and Want, R.: SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, *University of Washington CSE Report* (2000).
- [10] Ni, L. M., Liu, Y., Lau, Y. C. and Patil, A. P.: LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID, *Proc. PerCom'03*, pp. 407–415 (2003).
- [11] Jin, G. Y., Lu, X. Y. and Park, M. S.: An indoor localization mechanism using active RFID tag, *Proc. SUTC '06*, pp. 40–43 (2006).
- [12] Felix, H. S., Lee, B. and Saakes, D. P.: TagRadar: Locating objects using a smart phone accessory, *Proc. UbiComp '15 Adjunct*, pp. 289–292 (2015).
- [13] Tanbo, M., Nojiri, R., Kawakita, Y. and Ichikawa, H.: Active RFID attached object clustering method with new evaluation criterion for finding lost objects, *Mobile Information Systems*, Vol. 2017, p. 3637814 (2017).
- [14] Media Bridge: Stick-N-Find, Media Bridge (online), available from (<http://mbridge.jp/products/stick-n-find/index.html>) (accessed 2022-02-01).
- [15] Tile: Tile, Tile Inc. (online), available from (<https://www.thetileapp.com>) (accessed 2022-02-01).
- [16] Bouchard, K., Lapalu, J., Bouchard, B. and Bouzouane, A.: Precise passive RFID localization for service delivery in smart home, *Proc. UbiComp '12*, pp. 769–772 (2012).
- [17] Ting, S. L., Kwok, S. K., Tsang, A. H. C. and Ho, G. T. S.: The study on using passive RFID tags for indoor positioning, *International Journal of Engineering Business Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 9–15 (2011).
- [18] Bilodeau, J. S., Bouzouane, A., Bouchard, B. and Gaboury, S.: An experimental comparative study of RSSI-based positioning algorithms for passive RFID localization in smart environments, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 9, pp. 1327–1343 (2018).
- [19] Wilson, P., Prashanth, D. and Aghajan, H.: Utilizing RFID signaling scheme for localization of stationary objects and speed estimation of mobile objects, *Proc. IEEE International Conference on RFID*, pp. 94–99 (2007).
- [20] Liu, X., Corner, M. D. and Shenoy, P.: Ferret: RFID localization for pervasive multimedia, *Proc. UbiComp '06*, pp. 422–440 (2006).
- [21] Yao, K., Srinivasan, V. and Motani, M.: MAX: Human-centric search of the physical world, *Proc. SenSys '05*, pp. 166–179 (2005).
- [22] Chattopadhyay, A. and Harish, A. R.: Analysis of low range indoor location tracking techniques using passive UHF RFID tags, *2008 IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp. 351–354 (2008).
- [23] Borriello, G., Brunette, W., Hall, M., Hartung, C. and Tangney, C.: Reminding about tagged objects using passive RFIDs, *Proc. UbiComp '04*, pp. 36–53 (2004).
- [24] Gummeson, J., Mccann, J., Yang, C. J., Ranasinghe, D., Hudson, S. and Sample, A.: RFID Light Bulb: Enabling ubiquitous deployment of interactive RFID systems, *Proc. the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 2, pp. 12:1–12:16 (2017).
- [25] Park, J., Kim, Y. J. and Lee, B. K.: Passive radio-frequency identification tag-based indoor localization in multi-stacking racks for warehousing, *Applied Science*, Vol. 10, No. 10, p. 3623 (2020).
- [26] 米澤拓郎, 榊原寛, 中澤仁, 高汐一紀, 徳田英幸: Spot & Snap: DIY Smart Object Service を実現するセンサノードと日用品の関連付けインタラクション, *情報処理学会論文誌*, Vol. 48, No. 3, pp. 1381–1392 (2007).
- [27] Wikipedia: Force-directed graph drawing, Wikipedia (online), available from (https://en.wikipedia.org/wiki/Force-directed_graph_drawing) (accessed 2022-02-01).
- [28] Fruchterman, T. M. J. and Reingold, E. M.: Graph drawing by force-directed placement, *Software: Practice and Experience*, Vol. 21, No. 11, pp. 1129–1164 (1991).
- [29] Daily Mail: Lost something already today? Misplaced items cost us ten minutes a day, Daily Mail (online), available from (<https://www.dailymail.co.uk/news/article-2117987/Lost-today-Misplaced-items-cost-minutes-day.html>) (accessed 2022-02-01).
- [30] Brooke, J.: SUS - A quick and dirty usability scale, *Usability Evaluation In Industry*, pp. 189–194 (1996).
- [31] Hart, S. G.: Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 years later, *Proc. the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 50, No. 9, pp. 904–908 (2006).
- [32] 横窪安奈, 椎尾一郎: CADo: 身近な花材を利用した生け花支援システム, *情報処理学会論文誌*, Vol. 55, No. 4, pp. 1246–1255 (2014).
- [33] Bangor, A., Kortum, P. T. and Miller, J. T.: An empirical evaluation of the system usability scale, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 24, No. 6, pp. 574–594 (2008).
- [34] Byers, J. C., Bittner, A. C. and Hill, S. G.: Traditional and raw task load index (TLX) correlations: are paired comparisons necessary?, *Advances in Industrial Ergonomics and Safety*, pp. 481–485 (1989).
- [35] 石村真夫, 石村光資郎: すぐわかる統計処理の選び方, 東京図書 (2010).

(2022年2月28日受付, 5月23日再受付)

著者紹介

笹川 真奈



2017年3月お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程修了。同年4月より同研究科博士後期課程に在籍。同年4月、日本電信電話株式会社に入社(サービスエボリューション研究所)。ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。

伊藤 貴之



1992年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所研に入社。1997年3月早稲田大学にて博士(工学)。2005年5月お茶の水女子大学理学部情報科学科助教授。2011年4月同大学教授。2019年6月同大学文理融合AI・データサイエンスセンター長兼任。情報可視化, マルチメディア, インタラクション, コンピュータグラフィックスなどの研究に従事。

椎尾 一郎 (正会員)



1979年3月名古屋大学理学部物理学科卒業。1984年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年4月日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所研究員。1997年4月玉川大学工学部助教授をへて2002年4月教授。2001年4月～2002年3月ジョージア工科大学客員研究員。2005年4月～2022年3月お茶の水女子大学理学部情報科学科教授, 2022年4月同名誉教授。実世界指向インタフェース, ユビキタスコンピューティングを中心に研究。ヒューマンインタフェース学会会員, ACM 会員, 情報処理学会フェロー。工学博士。