

# 人の移動による RFID の位相と RSSI 変化を用いた モノの属性推定

扇田 幹己<sup>1</sup> 梶田 宗吾<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

**概要：**スマートホームやオフィスなどでは、人の位置や行動、コミュニケーションを把握することに加え、その空間内におけるモノのおおよその位置や属性をシステムが理解することで、人間の社会活動や生活をより適切に支援することが可能となる。例えば、食器や食品・本や小物などの位置やそれらの移動を情報システムが把握できれば、それに基づくより精度の高い行動認識や健康生活支援といったユビキタスサービスが実現できる。近年、実店舗等で大量のモノを管理するために用いられる小型のパッシブ RFID タグを用いることでモノの存在は把握できるものの、それらの属性をシステム側で把握するためには、タグとモノとの対応関係を逐一システムに与える必要がある。しかし、空間内に溢れる実世界のモノたちを逐一システムに登録する作業はヒューマンエラーやコストの観点からも望ましくない。本研究では、RFID タグを貼付したモノの属性を自動で推定する手法を提案する。提案手法では、複数のアンテナを用いた RFID タグリーダおよびパッシブタグを用い、空間内の人の活動により生じる RFID の電波変動を特徴量とした分類を行うことで、モノ同士の空間的な近似性を導出するとともに、人によるモノの移動を位相変化で検出することで、モノが使われた時刻や移動量等（使用状況）を導出する。これらの情報から、空間内において RFID タグが貼付されたモノが何かを推定する。1 人の居住者が活動する  $21m^2$  のオフィス環境で 10 属性のモノの 1 日のデータを取得する実験を実施した結果、それらの属性について自動分類を実現できた。これにより、空間内に新たに導入されたモノがどの属性に属するかを自動把握し、ID とモノの属性対応を自動で推定できることを示した。

## 1. はじめに

モノのインターネット (IoT) の概念が浸透し、すべてのモノがネットワークに接続され、管理や制御される世界が近づきつつある。特にスマートホームやスマートオフィスなどでは、人の位置や行動、コミュニケーションに加えて、その環境の設備や空間内のモノの位置や属性を理解し、人間の社会活動や生活を支援することが重要となる。例えば、家庭において家電や家具、食料品などの日常物の位置や移動属性が情報システム側で理解できれば、それをもとにした行動認識と健康生活支援、高齢者の自然な見守りといったユビキタスサービスも実現できる。オフィスや倉庫における人とモノの位置管理は、作業行動計画や業務の最適化に繋がると期待される。

これに対し、RFID システムが技術の発展と低価格化により再び注目を集めている。RFID システムは以前より図書館等でも利用されていたが、コンビニやドラッグストア

においても、「コンビニ電子タグ 1000 億枚宣言 [1]」や「ドラッグストア スマート化宣言 [2]」が策定され、2025 年までにすべての取扱商品に RFID タグを貼付け、商品の個品管理の実現がなされようとしている。安価な RFID タグを大量に活用し、モノの管理を変える RFID システムが普及すれば、経済への好影響や新サービスの創出なども期待される。

RFID タグとリーダーを用いた家庭やオフィスにおけるモノの位置管理についてはこれまでに多数の手法が提案されているが、特に近年、リーダーやアンテナ技術の大幅な発展により、パッシブ RFID タグを用いた正確な位置推定に関する研究が増えている [3, 4]。加えて、モノや壁などの環境に貼付された RFID タグの電波変動から人の行動認識を行う手法が多数検討されてきている [5–14]。RFID システムを家庭やオフィスに導入することで、モノと情報の一元管理ができることに加えて、モノの位置管理や人の行動認識が同時に行えることへの期待は大きい。しかし、これらの研究では RFID タグが貼付されたモノとタグ ID の対応については既知とされており、実際にサービスとして運用するにはタグと物との対応付けを逐一システムに入力

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University

する必要がある。しかし、今後多数のタグがモノに付与されていく環境において、モノの導入のたびに対応づけを逐一システムに入力することは手間やコスト、ヒューマンエラーの観点から望ましくない。

本研究では、RFID タグを貼付したモノの属性を自動で推定する手法を提案する。提案手法では、複数のアンテナを用いた RFID タグリーダおよびパッシブタグを用い、空間内の人の活動により生じる RFID の電波変動を特徴量とした分類を行うことで、モノ同士の空間的な近似性を導出するとともに、人によるモノの移動を位相変化で検出することで、モノが使われた時刻や移動量等（使用状況）を導出する。これらの情報から、空間内において RFID タグが貼付されたモノが何かを推定する。

提案手法は様々なケースでの活用が考えられる。例えば高齢化社会においては家庭内における行動認識への需要がますます高まっている。RFID タグを日用品に貼付し、その動きを把握することで、より高精度な行動推定が非侵襲的に可能となる。提案手法が実現すれば、独居の高齢者が食器などの日用品を購入した際に、タグ ID とモノの対応をシステムに都度入力させることなく、自動で推定する技術が有効となる。また、家庭やオフィスにおける消耗品や食料品の在庫管理を RFID タグによって行えば、適切なタイミングでの購入推薦や自動発注も可能となる。オフィスや研究室における物品管理業務を効率化することで利益や業績の向上が期待できる。さらに、共用備品の所在が不明になることもない。ビジネスパーソンは年間 150 時間もの時間を探し物に費やしているといった報告もあり、多くの人々がモノを探すという行為に時間を奪われている。こういった多くの事例において提案手法が有効であると考えられる。

1 人の居住者が活動する  $21m^2$  のオフィス環境で 10 属性のモノの 1 日のデータを取得する実験を実施した結果、それらの属性について自動分類を実現できた。これにより、空間内に新たに導入されたモノがどの属性に属するかを自動把握し、ID とモノの属性対応を自動で推定できることを示した。

## 2. 関連研究

### 2.1 RFID タグの位置推定

RFID タグの屋内位置推定技術については多くの既存研究がある。SpotOn [15] はリーダーにおける電波受信強度 (RSSI) を距離に換算し RFID タグの位置推定を行う手法であるが、RFID タグでは RSSI と距離の関係は障害物の影響を受けやすく、高精度な位置推定は容易でない。LANDMARK [16] は、環境内にアンテナとの距離が既知の参照タグを複数配置し、それらのタグと RSSI の関係を繰り返し参照することで環境に応じた位置推定を実現している。また、Chen らは送信電力レベルが調整可能な RFID

リーダーを用い、同様のアイデアで高精度な 3 次元位置推定を実現している [17]。これらは少なくとも 3 アンテナを必要とする三角測量ベースの位置推定技術であるが、Manzoor らは AoA (Angle of Arrival) 推定に基づき、1 つのアンテナと複数の参照タグに対する位置推定を実現している [3]。しかし、いずれの位置推定技術も障害物のない理想的な屋内環境を想定している。これに対し、PinIt [4] は移動式のアンテナを用いて、対象タグと参照タグのマルチパス電波到来角を推定し、その類似性から障害物のある屋内環境での高精度な位置推定を実現している。こういった技術の実現には、近年の RFID タグリーダおよびアンテナ技術の向上が大きく寄与している。しかし、大量の参照タグを配置して移動式の到来角アンテナを用いた事前計測には相応の手間が伴い、オフィスや家庭といった人やモノの移動が比較的多い環境には適さない。また、到来角を正確に測定できるリーダーは未だ一般的ではなく、汎用性が限られるといった課題もある。

### 2.2 RFID タグによる人やモノの状況推定

RFID タグを人やモノ、環境に貼付し、それらの電波状況を把握することでそれらの様々なコンテキスト (状況) を推定する技術が提案されている。

例えば Lee らは [5] において、RSSI の分散情報に基づき救急蘇生室での医療器具の使用検知を行う技術を提案している。また、Li らは CNN を用いて 5 つの医療段階と 11 種類のアクティビティの認識を行っている [6]。IDSence [7] では日常物に RFID タグを貼付し、モノの使用情報に基づく活動認識の可能性を提案している。CBID [8] はドップラー周波数の変化を利用し、RFID タグが貼付されたモノの移動を検知している。また、Gyro [9] では 1 つのモノに複数のタグを貼付し、各タグから得られる電波の位相差からモノの回転の情報を取得している。RF-IDraw [10] では 1 つのタグからの電波を複数のアンテナで取得し、その位相差からタグの高精度なトラッキングを行うことで、バーチャルタッチスクリーンを実現している。Shangguan らは [11] でモノに複数のタグを貼付し、1 つのアンテナでモノによるジェスチャ認識を実現し、新たなコミュニケーション手段を提案している。

RFID タグを壁などの環境に貼付することで、間接的に人やモノのコンテキストを取得する手法も研究されている。Yao らは壁に貼付した RFID タグの RSSI の変動から 23 種類の人の状態や行動の識別を行っている [12]。TagFree [13] では壁や机などにランダムに配置した RFID タグからの電波の到来角の変化を利用し、7 種類の人の活動を高精度に認識している。また、RFree-ID [14] では壁に RFID タグアレイを配置し、アンテナとタグの間を通過した 10 人の人を識別している。

また、人体に貼付した複数の RFID タグから人の行動

や状態を解析する手法も研究が活発に行われている分野である。[18] [19] では腕や胴体などに貼付された RFID タグにより人の身体の動きを正確にトラッキングしており、RF-Kinect [18] では RFID により疑似的に Kinect 相当の機能を実現する手法を提案している。RF-ECG [20] では衣服の胸部付近に貼付した RFID タグにより人の心拍変動を高精度に推定している。

### 2.3 映像や LiDAR トラッキングデータにおける人の同定手法

動画像や LiDAR から得られる匿名の来訪情報あるいは軌跡情報と RFID タグを併用し、それらの人物がどのタグを所持するかを同定する手法もいくつか知られている。文献 [21] では、RFID タグを所持した歩行者がリーダーの近傍を通過した際に LiDAR から高精度匿名軌跡との対応付けを行い、その軌跡の ID を同定するアプローチを提案している。森下ら [22] は、美術館のような不特定多数の訪問者がある環境で、動画像中の人物とその訪問者が保持する RFID タグを同定する手法を提案している。また、RFID タグではなく、スマートフォンなどを所持する歩行者を動画像や LiDAR のデータにおいて同定する手法も知られており [23]、我々の研究グループにおいても LiDAR とスマートフォンの同定手法を提案している [24, 25]。これらは現実環境におけるモノの ID を同定するという観点では共通するものの、動画像や LiDAR の軌跡を用いることから、家庭やオフィス環境におけるモノの管理に適用することは難しい。

### 2.4 提案手法の位置付け

RFID タグをモノに貼付する上記の技術はいずれも RFID タグの ID とそのタグが貼付されたモノの対応は既知としている。しかし、モノが導入されるたびにその対応関係を手動で入力することは、管理コストやヒューマンエラーの存在を考慮した場合は適切でない。また、店舗等では ID と商品種別の対応を共通化して ID から直接判断可能とする可能性もあるものの、無線通信で情報を取得できる RFID システムでは個人の所有物や購入物が第三者に容易に把握される恐れがあり、プライバシー侵害や犯罪利用のリスクの観点からも望ましくない。これらに対し、提案手法では RFID タグが付与された、家庭やオフィスにおけるモノたちの属性を市販レベルの RFID リーダーと複数台のアンテナを活用して推定する方法論を提案している。人の移動により生じる RSSI の変動の類似性、およびモノが人により利用されることで得られる位相値の変化の類似性を利用し、モノを属性として分類することで、空間内で RFID タグが貼付されたモノが何かの推定を試みるこれまでにない手法であり、その点で新規性を有すると考える。また 21m<sup>2</sup> のオフィス環境を本実験専用構築し、10 属性のモノのデー

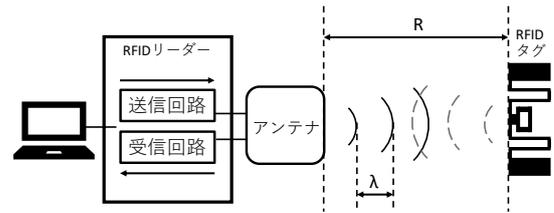


図 1: RFID システム概念図

タを取得する実験により、属性自動分類が可能であることを示し、実環境における有効性も示している。

## 3. 提案手法の概要

### 3.1 準備

RFID システムでは、リーダーアンテナが電波を送信することによって、空間内の RFID タグに問い合わせを行う。RFID タグはリーダーからの電波をアンテナで受けることで動作電力を得て、受けた信号に基づいて情報を変調し、それをリーダーアンテナに戻す。図 1 に、RFID リーダーとパッシブ RFID タグの間の電波伝搬の概念図を示す。

市販の多くの商用 RFID リーダーでは RFID アンテナが受信した信号の RSSI (dBm) と位相値を取得できる。RSSI は受信信号の信号強度であり、位相は、送信信号と受信信号との間の位相差として計算される。通常、周波数  $f$  (Hz) の RF 搬送波の場合、周波数と波長の関係は次のようになる。

$$\lambda = \frac{c}{f} (m) \quad (1)$$

ここで、 $c$  は通信媒体中の電磁波の速度であり、空気中の光の速度 ( $3 \times 10^8 m/s$ ) に等しい。RFID システムの位相モデルは伝統的に以下のように表される。

$$\theta = 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{2R}{\lambda} \right) + \theta_r + \theta_R + \theta_{TAG} \quad (2)$$

$R$  はアンテナとタグの距離であり、一度の通信で信号が通過する距離は  $2R$  である。アンテナとタグとの通信距離による位相回転に加えて、リーダーの送信回路 ( $\theta_r$ )、受信回路 ( $\theta_R$ )、タグの反射特性 ( $\theta_{TAG}$ ) によってそれぞれ追加の位相回転が起きる。一般にこれらの追加の位相回転は定数として扱われる。また、位相は周期  $2\pi$  の周期関数であるため、位相値は波長の半分の整数倍の間隔で繰り返される。RFID リーダーが取得する電波の位相推定値は全ての場合において受信信号から導出されなければならない。推定値は信号対雑音比の関数となる。リーダーからの熱雑音や、外部干渉などの他の雑音源も報告された RF 位相に影響を与える。

先に述べたように、RF 位相は周期関数であり、 $\text{mod } 2\pi$  で推定される。しかし、市販の商用 RFID リーダーの多く

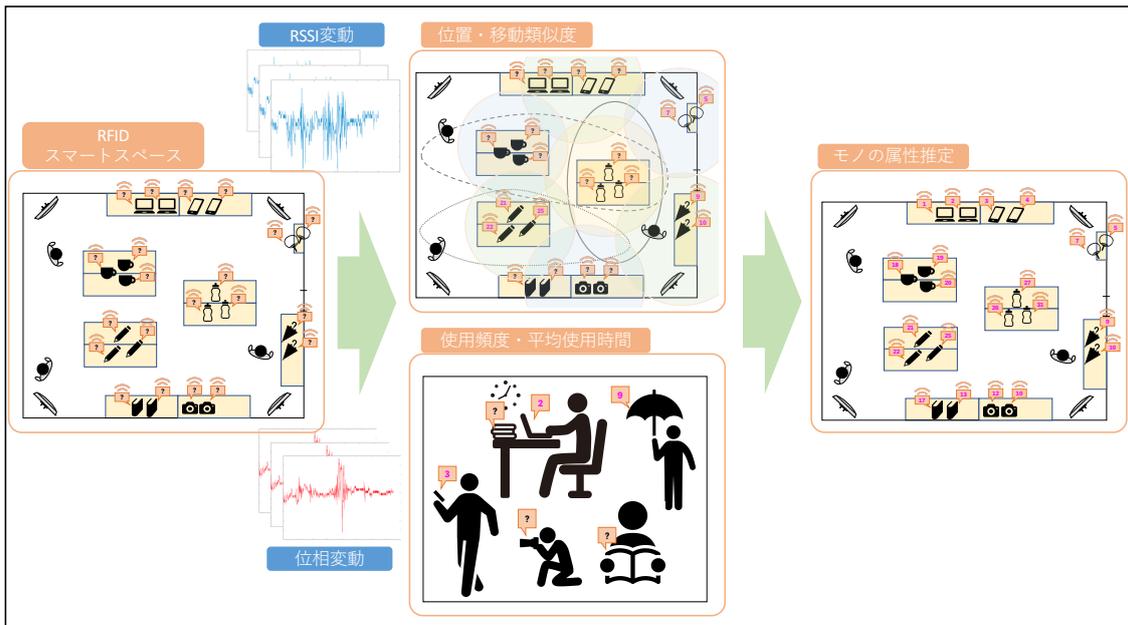


図 2: 提案システム概要図

は、受信した信号からの位相推定値にハードウェアに依存した  $\pi$  の曖昧さを持つため、推定される位相値は、真の位相 ( $\theta$ ) または真の位相  $+\pi$  radians ( $\theta + \pi$ ) の可能性がある。

### 3.2 提案手法の概要

本研究の目標であるモノの属性推定を達成するために我々が提案する手法は、同じ生活空間内であれば「同じモノは同じように使われる」という考えに基づいている。空間内に新たに導入されたモノの使われ方と、属性が既知であるモノの使われ方の類似性から、モノの属性を推定する。本論文では、モノの使われ方として、モノの使用頻度、使用 1 回あたりの平均使用時間、他のモノとの位置近接性、ならびにいくつかの固定タグを基準とした移動パターン、の組で表現し、これらの類似性を解析することで同じ属性（同じ種類のモノ）のグループ化を行う。図 2 に本システムの概要を示す。

具体的には、モノの利用により、位相値の変化が観測されたタグ  $T_i$  については、その利用回数 ( $use\_count(T_i)$  で表す) に 1 を加えるとともに、その利用総時間 ( $use\_time(T_i)$  で表す) に対し、位相が変化しつづけた時間を加える。これらにより、そのタグが何回動かされたか、どのぐらいの時間使われたかを表す。

次に、人の通過により同じような RSSI の変化が観測できたタグの組 ( $T_i, T_j$ ) について、それらの近接位置観測回数 ( $sim\_loc(T_i, T_j)$  で表す) に 1 を加える。これにより、例えば 1 日といった単位のなかで、それらのタグがどのぐらい長く近隣関係にあったかを表す。なお、位置近接性の判定には RSSI や位相による RFID タグの絶対的な位置の推定は用いない。障害物のある実環境においては、同一発

信源の電波が壁や障害物に反射し複数経路でアンテナに到達するマルチパスの影響を大きく受ける。したがって、ほぼ同位置にある複数の RFID タグに対しても、アンテナが受信する RSSI や位相値は大きく異なる値となることが多く、これまでに提案されている理想環境での RFID 位置推定手法は適用できない。実際に我々が図 3 のような机と椅子が並べられた環境で実施した RSSI 値比較実験では、同じ机の上の半径 20cm 以内に設置した複数の RFID タグから、それらの正面にあるアンテナが取得できる RSSI 値は図 4 のように 5dBm 以上も異なる値を示すことが確認された。

さらに、壁等に貼付し動かさないタグ（固定タグ） $A_j$  について、タグ  $T_i$  が位相値の変動により使われていることがわかっている時間帯に、 $A_j$  と近接していたことがわかった場合、固定タグ近接利用回数 ( $use\_loc(T_i, A_j)$  で表す) に 1 を加える。これにより、タグ  $T_i$  がどの固定タグの近くでよく使われるかがわかり、使用場所や移動パターンの特徴を把握できる。同一環境におけるモノはその種類によって使用される場所や移動が類似すると考えられる。例えば、食器は食器棚と台所と食卓の間を移動することが多く、本は本棚と本がよく読まれる場所（例えばソファや勉強机）を移動する可能性が高い。そのため、我々はこれら使用場所や移動パターンの特徴を把握し、利用する。

これらに対し、タグ  $T_i$  の特徴量ベクトルを

$$\langle use\_time(T_i), use\_count(T_i), sim\_loc(T_i, T_1), \dots, sim\_loc(T_i, T_N), use\_loc(T_i, A_1), \dots, use\_loc(T_i, A_M) \rangle \quad (3)$$

（ただし、 $N$  はモノのタグの総数、 $M$  は固定タグの総数で



図 3: RSSI データを取得した環境

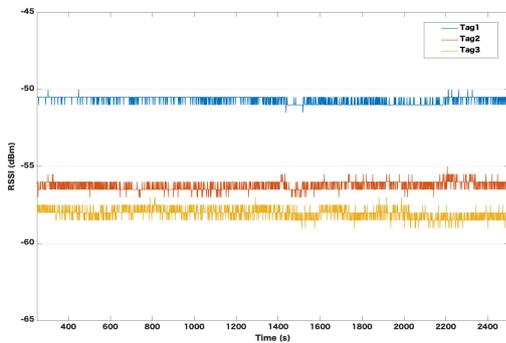


図 4: 位置が近似した 3 つの RFID タグの RSSI

あり、各要素は正規化されるものとする。詳細は後述)で表し、このベクトルの類似性でクラスタリングを行うことで、属性分類を行う。次章では、これらの変数をどのようなタイミングで増加させ、どのような処理によってタグ間の類似性を導出するかの詳細を述べる。

#### 4. 提案手法の詳細

本章では、まず 4.1 節でモノの使用検知に必要な位相値の前処理方法について述べる。これにより、タグの移動がないときでも位相値の不確実性により値が一定でない場合について、その影響を排除できる。次に 4.2 節では位相値変化によるモノの使用の検知方法 ( $use\_count(T_i)$ ,  $use\_time(T_i)$  の計算方法) について述べるとともに、4.3 節では人の通過による RSSI 変化の検出方法を述べる。4.4 節ではこの RSSI 変化の検知方法を用いて、タグ間の位置近接性を検出する方法 ( $sim\_loc(T_i, T_j)$  の計算方法) について述べるとともに、モノの使用検知方法と RSSI 変化の検知方法、ならびに各固定タグ  $A_j$  を用いてモノの移動パターンを検知する方法 ( $use\_loc(T_i, A_j)$  の計算方法) について述べる。また、これらにより得られる 4 項組を用いてモノを属性分類する手法について説明する。

#### 4.1 位相値の前処理

前章で述べたように、市販の RFID リーダーが受信信号から推定する位相値にはハードウェアに依存した  $\pi$  の曖昧さがある。図 5 に静止した RFID リーダーが受信する信号の位相値の生データのグラフを示す。位相の安定値が  $\pi$  の間隔で 2 つ出力されていることが確認できる。この位相の曖昧さを取り除くため、取得位相値の補正を行う。報告された位相値を 100 秒単位のウィンドウに分割し、各ウィンドウごとに位相値の最頻値 ( $\theta_{mode}$ ) を求める。そして、以下のルールに基づいて報告された位相値 ( $\theta$ ) を処理する。

$$\theta = \begin{cases} \theta - 2\pi & \theta \geq \theta_{mode} + \frac{3}{2}\pi \\ \theta - \pi & \theta_{mode} + \frac{3}{2}\pi > \theta \geq \theta_{mode} + \frac{1}{2}\pi \\ \theta & \theta_{mode} + \frac{1}{2}\pi > \theta \geq \theta_{mode} - \frac{1}{2}\pi \\ \theta + \pi & \theta_{mode} - \frac{1}{2}\pi > \theta \geq \theta_{mode} - \frac{3}{2}\pi \\ \theta + 2\pi & \theta_{mode} - \frac{3}{2}\pi > \theta \end{cases} \quad (4)$$

この処理により、 $\pi$  の曖昧さで不均等に報告されていた 2 つの位相値を統一する。次に、各ウィンドウごとに計算できる位相の平均値を個々の位相値から減算することによって、位相ストリームの DC オフセット (直流成分) を除去する。最後に Hampel 識別子を使用し、あるサンプルがそのサンプルの周囲 20 個のサンプルから構成されるウィンドウの中央値から標準偏差の 3 倍以上離れている場合はそのサンプルを中央値に置き換えることで、外れ値の除去を行う。

これにより、位相変化は図 6 のようになり、その範囲は  $[-\pi, \pi]$  に制限される。後述する実験により、1 つのアンテナが 1 つの RFID タグから信号を受信する頻度は 6 回/s 程度であることがわかっており、また、916.8MHz の周波数を利用した時の信号の波長はおおよそ 33cm である。つまり、この補正手法の場合、おおよそ 99cm/s の等速で RFID タグが移動すると、RFID タグは移動しているのにも関わらず、位相値は安定して同じ値が取得されることになる。しかし、我々の日常生活において、そのようにモノが動くことはほとんどないため、このような補正方法は合理的といえる。

#### 4.2 「モノの使用」の検知方法

提案手法では、RFID タグが貼付されたモノが人によって使用されているという情報を用いるため、これらを検知する手法について説明する。アンテナが取得する電波の位相値はタグとアンテナとの距離に依存し、タグが静止している場合、連続して取得できる位相値は均一に近い。しかし、タグが動くと位相値は不均一となる。我々はこの位相値の変動を検知してモノの使用を推定する。しかし、位相値は環境変化に対し敏感に反応し、アンテナと RFID タグの間を人が移動するだけで位相値に影響するため、位相値の変化が人の移動によるものか、モノの移動によるものか

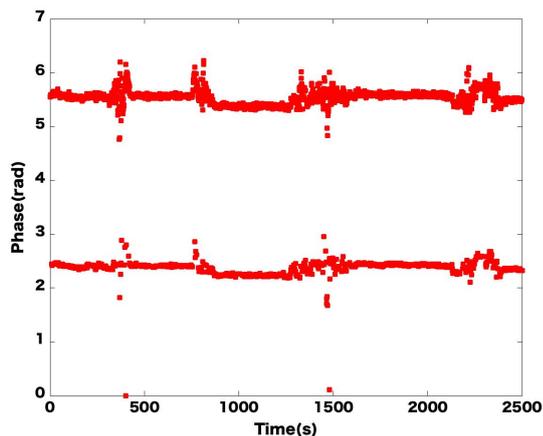


図 5: 補正前の位相データ

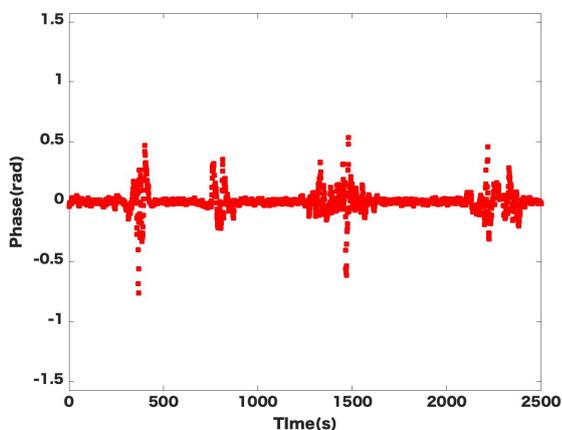


図 6: 補正後の位相データ

を判別する必要がある。

これに対し、提案手法では、領域を囲むように設置したアンテナ（一般の部屋のような矩形領域であれば四隅に設置した4アンテナ）で取得できる位相値が同時にばらつきを示した時にモノが使用されていると判定する。これはアンテナが例えば4台である場合、各アンテナとRFIDタグの4つのLoS（Line-of-Sight）が単独の人物によって同時に遮断されることはないことを用いる。また、不均一性が発生するか否かは連続して取得できる時系列の位相値データをスライディングウィンドウによって分割し、各ウィンドウ内での位相の分散値が設定した閾値を超えるか否かで判定する。本研究では事前実験の多数回の試行結果から、ウィンドウ幅として3秒、閾値として0.5を経験的に決定している。

実際に取得した位相分散値の変化を図7に示す。矢印はモノが使用された時間の真値を指している。どのアンテナもモノが使用された時間には位相値が大きく変動していることが確認できる。しかし、モノが使用された時間にのみ位相値が変動しているのは図7(d)で示されたアンテナ4だけである。他の3つのアンテナではモノの使用時以外の

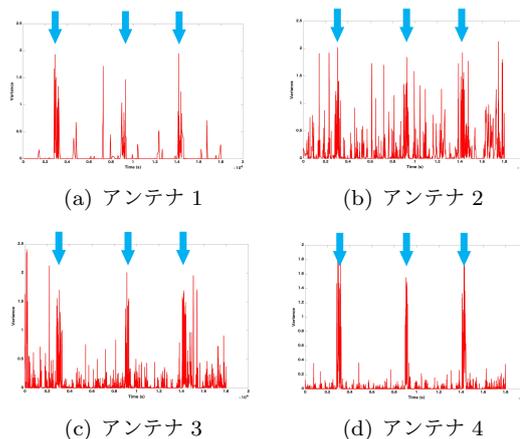


図 7: モノの使用時の各アンテナの位相分散値

時間にも位相値の分散が大きく変動する時があり、特に図7(d)で示されたアンテナ2ではほとんどの時間において位相値が大きく変動していることが確認できる。しかし、アンテナ4のようなアンテナが4つのうち1つは存在することで、人によるLoSの遮断と区別することが可能となる。

### 4.3 人の通過によるRSSI変化の検出方法

提案手法ではRFIDタグが貼付されたモノの前を人が通過したことを用いるため、これを検知する手法について説明する。RFIDタグのRSSIは環境によって取得できる絶対値は異なるものの、同一の環境条件下であれば安定した値を取る。しかし、空間内での人の行動はRFIDタグの電波伝搬に変動をもたらす。提案手法ではこの変動情報から人がRFIDタグの近くを通過したことを検出する。

人の通過を検出するため、まず屋内環境におけるアンテナ、RFIDタグ、人の行動位置とRSSI変動の関係性を調べる予備実験を行った。実験では図8のように部屋にアンテナおよびRFIDタグを配置し、定められた地点間を人が移動した時のRSSIを取得した。実験において取得されたRSSIの一例を図9と図10に示す。これらは人が地点AB間を移動した際にアンテナ1が取得したタグ1, 2, 8, 10のRSSIである。図9では人が地点AB間を移動する時、アンテナ1とタグ1, 2のLoSが遮蔽され、RSSIが大きく変動していることがわかる。しかし、図10から、人の行動とは離れた位置にあるタグ10でRSSIが安定しているにも関わらず、タグ8のRSSIはタグ1, 2と同様に大きく変動していることが確認できる。これは、アンテナ、RFIDタグ、環境によって決定されるアンテナ1とタグ8の電波伝播経路を人が遮蔽したためと考えられる。このように、アンテナとRFIDタグ、人の行動位置によっては、人の行動位置とは離れた場所にあるRFIDタグのRSSIが変動することがあり、これらは単純にアンテナとの直線位置関係だけでは決定されない。

こういった影響を考慮し、高精度に人の通過を検出するために、部屋の4隅のアンテナのうち、隣接する2アンテ

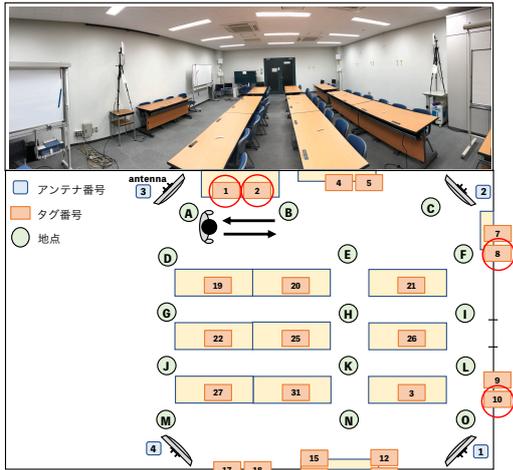


図 8: 実験環境

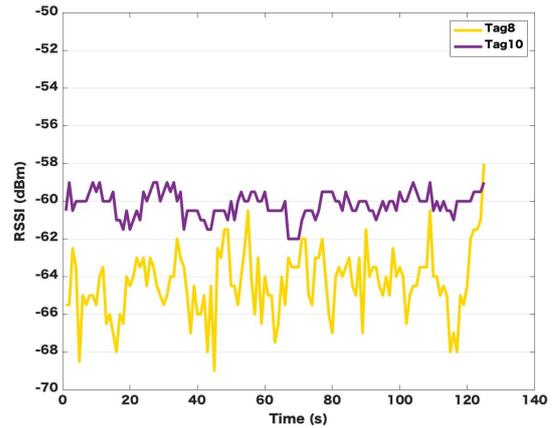


図 10: タグ 8 とタグ 10 の RSSI

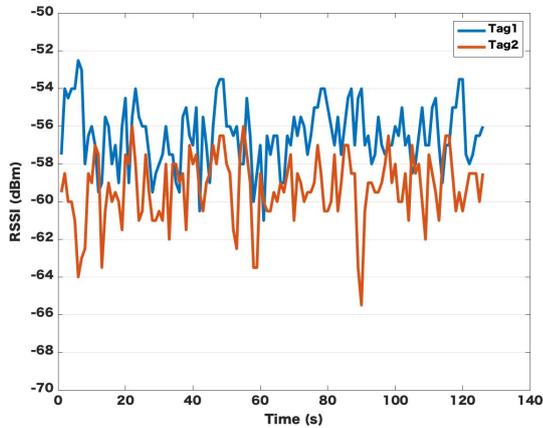


図 9: タグ 1 とタグ 2 の RSSI

ナでの RSSI がほぼ同時刻に変動した場合に、人が RFID タグの近くを通過したと判定するような検出方法を採用する。これにより、アンテナと RFID タグ間の LoS が遮断されたことによる RSSI 変動のみをとらえることができ、人体での反射などマルチパスによる RSSI 変動を LoS 遮断と誤認識することを抑制する。RSSI 変動については RSSI の移動分散により求められる分散値が閾値を超えたか否かで判定する。

なお、モノの使用検知においては固定閾値を利用したが、人の通過検出においては各ウィンドウの平均値+(標準偏差×2)の動的閾値を利用する。これは、アンテナと RFID タグの距離によって RSSI の変動の程度が異なるためである。また移動分散のウィンドウ幅は 1s, 2s, 3s, 5s, 10s を試行し、もっとも高精度であった 1s をウィンドウ幅とした。

#### 4.4 モノの属性の判定方法

本節ではまず、前節まで述べた、モノの使用検知および人の通過による RSSI の変化検出を用いて、モノの使用頻度、モノの 1 回あたりの使用時間、モノ間の位置類似度、

ならびにモノの移動パターン、を導出し、それらを利用してモノを属性推定する手法について説明する。

提案手法では、モノに貼付された全てのタグについて、式 3 で定義された特徴ベクトルをタグごとに生成し、それらの特徴ベクトルを用いたクラスタリングを実施する。各クラスター毎にその属性を決定することができれば、同一クラスターに属するモノを同じ種類のモノとして分類できる。これにより、空間内に新たに導入されたモノが何かを推定することができる。

まず、タグ  $T_i$  を例に、特徴ベクトルの生成方法について説明する。

まず、タグの組  $(T_i, T_j)$  について、観測される RSSI 変動により人の通過が同時刻に検出された場合、 $sim\_loc(T_i, T_j)$  に 1 を加える。ここでは  $T_i$  で人の通過が検出されてから  $\pm 2$  秒以内に  $T_j$  で人の通過が検出された場合、同時刻に人が通過したと判定する。これにより、近接位置観測回数を要素にもち、タグが貼付されたモノの数の要素数を持つベクトルが生成できる。ここで、人の通過の場所的な偏りの影響を除去するため、 $T_i$  と同時刻に通過が検出された、他のタグの総通過回数が 1 になるようにベクトル要素を正規化する。

次に、タグ  $T_i$  が貼付されたモノの利用回数 ( $use\_count(T_i)$ ) とその総利用時間 ( $use\_time(T_i)$ ) は以下で得られる。タグ  $T_i$  が貼付されたモノの利用回数を数える前に、まず、タグ  $T_i$  が取得する位相の分散値が設定した閾値を超えているか否かで 0 または 1 の 2 値に分類する。超えていない場合は 0、超えている場合は 1 とする。閾値を超えている場合はモノを使用していると判定することに加え、1 度閾値を超えてモノの使用が判定され、次に閾値を下回った場合、モノの使用が終了したと判定するのではなく、閾値を下回ってから 1 分間経過しても再度閾値を上回ることがなかった場合にモノの使用が終了したと判定する。逆に、閾値を下回ってから 1 分以内に再度閾値を上回った場合は、その間の 2 値データ 0 を 1 に変換する。これは、

表 1: 特徴量ベクトルの一例

	位置類似度				移動類似度		使用頻度	平均時間	
	T1	T2	T3	T4	A1	A2			
モノ	T1	-	0.8	0.2	0	0.7	0.3	0.7	1
	T2	0.7	-	0.2	0.1	0.8	0.2	1	0.4
	T2	0.1	0.2	-	0.7	0.8	0.2	0.8	0.3
	T3	0.2	0.1	0.7	-	0.9	0.1	0.1	0.5

例えばペンのようにモノは使われ方によってはモノの使用開始を示すピックアップ動作の後、定期的に動きが微小になり十分な位相変動を起こさないことがあり、そういった動作について複数の使用イベントではなく1回の使用イベントとして判定するためである。上記により訂正された位相分散値の閾値判定2値データを用いて、時系列データが0から1に遷移した時、 $use\_count(T_i)$ に1を加え、また、時系列データにおける1の回数を $use\_time(T_i)$ に加える。 $use\_count(T_i)$ および $use\_time(T_i)$ についても、その最大値を示したタグの値が1になるように正規化する。

最後に $use\_loc(T_i, A_j)$ は、タグ $T_i$ が貼付されたモノが使用されていると判定された時間帯に、通過検出によって $A_j$ と近接していたことがわかった場合、 $use\_loc(T_i, A_j)$ に1を加える。

これらを用いることで、例えば表1のような値を持つベクトルが生成できる。

最後に、生成した特徴ベクトルに対し、ユークリッド距離に基づく凝集型階層クラスタリングを適用することで、全てのタグをその類似性から属性分類する。属性推定としては、空間内に新たに導入されたものに対して、提案手法に基づき特徴ベクトルを生成し、既知のどの属性に最も近いかを確認することでそのモノの属性を推定することができる。

## 5. 属性分類実験と評価

提案手法の評価を行うため、1人の居住者が活動する21m<sup>2</sup>のオフィス環境で10属性のモノの1日のデータを取得し、本手法による属性分類を試みた。

### 5.1 実験環境

RFIDリーダーとしてImpinj社のSpeedway Recollection R420(図11(a))、RFIDタグとしてSMARTTRAC社のShortDipole(図11(b))、アンテナはマスプロ電工社のRFID平面アンテナRAF2031(図11(c))を利用した。周波数は916.8Hzで固定し、リーダーに接続された4つのアンテナが時分割多重で動作する。

これらの測定機器を、一人の居住者が活動する21m<sup>2</sup>のオフィス環境に設置した。本環境は本実験のために専用に構築したものであり、現時点で居住者はいないため、他の人物の影響を受けずに性能検証が可能である。什器等のレイアウトを図12に示す。スマートホームやスマートオ

フィス環境を模擬するため、机や椅子に加え、複数の家電を配置した。アンテナは部屋の四隅に中央を向くように配置している。また、部屋の家具など図12に黄色で示す7つの場所にアンカータグを固定した。

本実験における属性分類の対象として、図13に示す10種類のモノを用意した。また、それぞれのモノの数と貼付したRFIDタグのIDは表2のようにになっている。

実験では1人の居住者がオフィスで1日活動する間のデータを取得した。実験では被験者は基本的に自然に生活をしていただくようにしたが、提案手法による属性分類について評価するため、1時間に1回は机の上の拭き掃除をするように、また実験中に少なくとも1回ずつはRFIDタグによって管理されている本を読んでもらうように指示した。

### 5.2 評価

実施した実験に対して、提案手法を適用したことによる属性分類結果を図14に示す。図14では図13および表2で示した10属性のモノについて11個のクラスタが生成されていることがわかる。しかし、本研究において我々の目的は空間内に新たに導入されたモノの属性を推定することであり、今回実施した実験において対象とされたいずれのモノも最も類似性が高いモノは同じ属性に属するモノであることが結果から確認でき、属性推定利用目的としての分類精度は100%を達成している。

また、特徴量として用いている、モノの位置類似度( $sim\_loc(T_i, T_j)$ )、移動パターン類似度( $use\_loc(T_i, A_j)$ )、使用頻度( $use\_count(T_i)$ )、使用1回あたりの平均使用時間( $use\_time(T_i)$ )が属性分類に与える影響を示す。

図15は位置類似度のみを用いて属性分類を実施した結果である。結果では、モノのおおよその位置関係を把握し、いくつかのクラスタに分類されているが、ペットボトルとマグカップやハンガーと布巾のように基本的に同じ位置で管理されているものを分類することはできていない。

次に、位置類似度に移動パターン類似度を加えて属性分類を実施した結果を図16に示す。ここでは、固定された位置で管理されているペットボトルと、使用時に人によって移動するマグカップがクラスタとして分類されたことが確認できる。しかし、実験において被験者は基本的に部屋中央の机で作業や読書をしていたため、位置や移動パターンの類似したペンと本の分類ができておらず、また、道具類とハンガー、布巾についても分類ができていない。

続けて、位置類似度と移動パターン類似度にモノの使用頻度の特徴を加えて属性分類を実施した結果を17に示す。本実験では被験者に1時間に1回の拭き掃除を指示したため、使用頻度の特徴を加えることで道具類とハンガー、布巾の分類が実現できていることが確認できる。しかし、ハンガーと布巾や本とペンについてはこれまでの特徴が類似



(a) リーダー (b) タグ (c) アンテナ

図 11: ハードウェア



図 12: オフィスレイアウト



図 13: 推定対象物

しているため、分類が達成できていない。

そして、最後に使用 1 回あたりの平均使用時間の特徴を加えて属性分類を実施した結果がはじめに示した図 14 である。本や布巾については 1 回あたりの使用時間が比較的に長いと考えられるため、平均使用時間を用いることで本とペン、ハンガーと布巾といった属性の分類ができていたことが確認できる。

## 6. まとめと今後の課題

本研究では、技術の発展と低価格化が著しい RFID システムを利用した、屋内環境での人やモノのコンテキスト推定をはじめとする様々なサービスを実現するにあたり、手間やコストの観点から望ましくないとされる RFID タグのタグ ID とモノの対応づけを自動で実現する手法について提案し、提案手法に基づく実験と評価について述べた。提案手法では「同じモノは同じように使われる」という考え

表 2: 推定対象物の数と割り当てた ID

対象物	数	ID
本	3	1,2,3
ペットボトル	3	4,5,6
マグカップ	3	7,8,9
うちわ	2	10,11
道具	3	12,13,14
椅子	2	15,16
ハンガー	2	17,18
布巾	2	19,20
貴重品	2	21,22
ペン	2	23,24

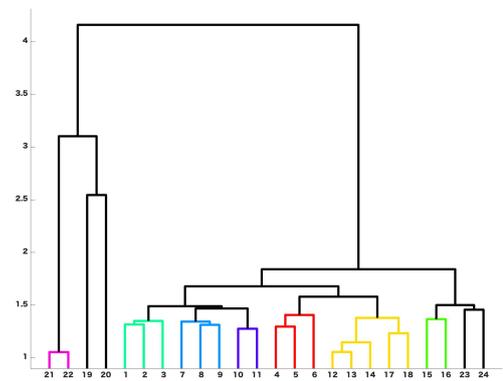


図 14: 提案手法による属性分類

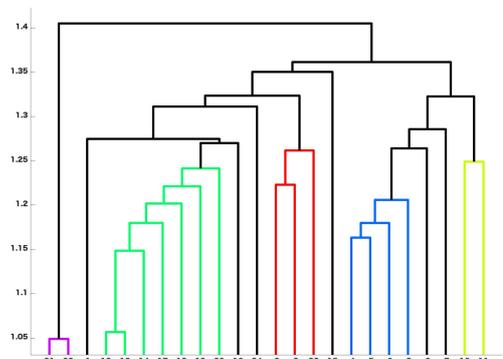


図 15: 位置類似度による分類

に基づき、人の行動が RFID タグの RSSI と位相に与える影響を解析し、モノ同士を位置、移動パターン、使用頻度、使用 1 回あたりの平均使用時間の 4 つの特徴の類似性によりモノの属性分類を行うことで、RFID タグが貼付されたモノが何であるかを自動で推定する。

提案手法の有効性を確かめるために、1 人の居住者が活動する 21m<sup>2</sup> のオフィス環境で 10 属性のモノの 1 日のデータを取得する実験を実施した。その結果、10 属性のモノについて自動分類が達成できたこと、および、モノの特徴と

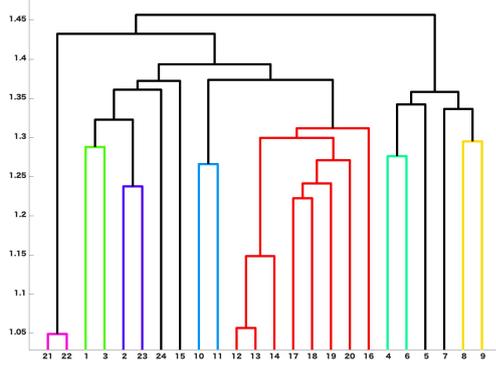


図 16: 位置類似度, 移動パターンによる分類

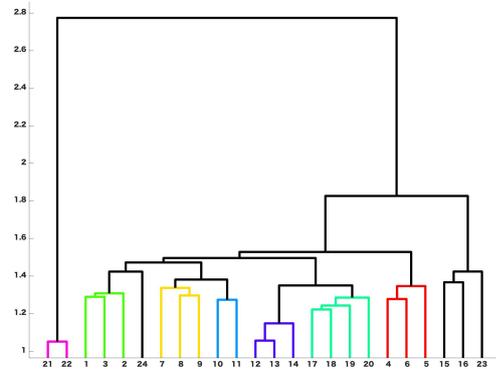


図 17: 位置類似度, 移動パターン, 使用頻度による分類

して挙げた 4 つの特徴が属性分類に対して有効に働いていることが確認できた。これにより、空間内に新たに導入されたモノがどの属性に属するかを自動で把握し、ID とモノの属性対応を自動で推定できることを示した。

なお、本論文で実施した実験では 1 日の活動データを取得したが、今後、数週間に及ぶ長時間のデータを取得し、モノが使用される時間帯や周期といった特徴についても取得し、さらに、モノが使用される時の位相変動を詳細に解析することで、モノの使用時の回転や移動量といった特徴の取得も実現し、さらに多くの属性分類を目指していく。また、データ取得環境については、オフィス環境だけでなく、家庭でのデータ取得も実施する予定であり、複数人が同時滞在する環境においてもモノの属性分類を実現する手法についても検討していきたい。

## 謝辞

本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」により得られたものです。

## 参考文献

- [1] : 「コンビニ電子タグ 1000 億枚宣言」を策定しました～サプライチェーンに内在する社会課題の解決に向けて～ (METI/経済産業省), <https://www.meti.go.jp/press/2017/04/20170418005/20170418005.html>. (Accessed on 05/12/2019).
- [2] : 「ドラッグストアスマート化宣言」を策定しました～サプライチェーンに内在する社会課題の解決に向けて～ (METI/経済産業省), <https://www.meti.go.jp/press/2017/03/20180316002/20180316002.html>. (Accessed on 05/12/2019).
- [3] Manzoor, F., Huang, Y. and Menzel, K.: Passive RFID-based Indoor Positioning System, An Algorithmic Approach, *2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications*, pp. 112–117 (online), DOI: 10.1109/RFID-TA.2010.5529871 (2010).
- [4] Wang, J. and Katabi, D.: Dude, Where's My Card?: RFID Positioning That Works with Multipath and Non-line of Sight, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 43, No. 4, pp. 51–62 (online), DOI: 10.1145/2534169.2486029 (2013).
- [5] Lee, Y. H. and Marsic, I.: Object motion detection based on passive UHF RFID tags using a hidden Markov model-based classifier, *Sensing and Bio-Sensing Research*, Vol. 21, pp. 65 – 74 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2018.10.005> (2018).
- [6] Li, X., Zhang, Y., Marsic, I., Sarcevic, A. and Burd, R. S.: Deep Learning for RFID-Based Activity Recognition, *Proceedings of the 14th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems CD-ROM, SenSys '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 164–175 (online), DOI: 10.1145/2994551.2994569 (2016).
- [7] Li, H., Ye, C. and Sample, A. P.: IDSense: A Human Object Interaction Detection System Based on Passive UHF RFID, *CHI* (2015).
- [8] Han, J., Ding, H., Qian, C., Xi, W., Wang, Z., Jiang, Z., Shangguan, L. and Zhao, J.: CBID: A Customer Behavior Identification System Using Passive Tags, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 24, No. 5, pp. 2885–2898 (online), DOI: 10.1109/TNET.2015.2501103 (2016).
- [9] Wei, T. and Zhang, X.: Gyro in the air: tracking 3D orientation of batteryless internet-of-things, pp. 55–68 (online), DOI: 10.1145/2973750.2973761 (2016).
- [10] Wang, J., Vasisht, D. and Katabi, D.: RF-IDraw: Virtual Touch Screen in the Air Using RF Signals, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 44, No. 4, pp. 235–246 (online), DOI: 10.1145/2740070.2626330 (2014).
- [11] Shangguan, L., Zhou, Z. and Jamieson, K.: Enabling Gesture-based Interactions with Objects, *Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '17*, New York, NY, USA, ACM, pp. 239–251 (online), DOI: 10.1145/3081333.3081364 (2017).
- [12] Yao, L., Sheng, Q. Z., Li, X., Gu, T., Tan, M., Wang, X., Wang, S. and Ruan, W.: Compressive Representation for Device-Free Activity Recognition with Passive RFID Signal Strength, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 17, No. 2, pp. 293–306 (online), DOI: 10.1109/TMC.2017.2706282 (2018).
- [13] Fan, X., Gong, W. and Liu, J.: TagFree Activity Identification with RFIDs, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 1, pp. 7:1–7:23 (online), DOI: 10.1145/3191739 (2018).
- [14] Zhang, Q., Li, D., Zhao, R., Wang, D., Deng, Y. and

- Chen, B.: RFree-ID: An Unobtrusive Human Identification System Irrespective of Walking Cofactors Using COTS RFID, *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)(PERCOM)*, Vol. 00, pp. 1–10 (online), DOI: 10.1109/PERCOM.2018.8444599 (2018).
- [15] Hightower, J., Borriello, G. and Want, R.: SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength (2000).
- [16] Ni, L. M., , and Patil, A. P.: LANDMARC: indoor location sensing using active RFID, *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003).*, pp. 407–415 (online), DOI: 10.1109/PERCOM.2003.1192765 (2003).
- [17] Chen, H., Ma, G., Wang, Z., Yu, J., Shi, L. and Jiang, X.: Efficient 3-dimensional localization for RFID systems using jumping probe, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 41, pp. 300 – 318 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2016.12.002> (2017).
- [18] Wang, C., Liu, J., Chen, Y., Xie, L., Liu, H. B. and Lu, S.: RF-Kinect: A Wearable RFID-based Approach Towards 3D Body Movement Tracking, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 1, pp. 41:1–41:28 (online), DOI: 10.1145/3191773 (2018).
- [19] Jin, H., Yang, Z., Kumar, S. and Hong, J. I.: Towards Wearable Everyday Body-Frame Tracking Using Passive RFIDs, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 1, No. 4, pp. 145:1–145:23 (online), DOI: 10.1145/3161199 (2018).
- [20] Wang, C., Xie, L., Wang, W., Chen, Y., Bu, Y. and Lu, S.: RF-ECG: Heart Rate Variability Assessment Based on COTS RFID Tag Array, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 2, pp. 85:1–85:26 (online), DOI: 10.1145/3214288 (2018).
- [21] Schulz, D., Fox, D. and Hightower, J.: People Tracking with Anonymous and ID-sensors Using Rao-Blackwellised Particle Filters, *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI'03*, San Francisco, CA, USA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., pp. 921–926 (online), available from (<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1630659.1630792>) (2003).
- [22] 森下壮一郎, 福田一郎, 新井義和, 山下 淳, 浅間 一 : UHF 帯 RFID を用いた動画像中の人物同定, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 6, pp. 589–597 (オンライン), DOI: 10.2493/jjspe.81.589 (2015).
- [23] Teixeira, T., Jung, D. and Savvides, A.: Tasking Networked CCTV Cameras and Mobile Phones to Identify and Localize Multiple People, *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '10*, New York, NY, USA, ACM, pp. 213–222 (online), DOI: 10.1145/1864349.1864367 (2010).
- [24] Wada, Y., Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Accurate positioning of mobile phones in a crowd using laser range scanners, *2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 430–435 (online), DOI: 10.1109/WiMOB.2013.6673395 (2013).
- [25] 高藤巧, 藤田和久, 樋口雄大, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 下條真司 : トラッキングスキャナとモーションセンサを用いた高精度屋内位置推定手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 1, pp. 353–365 (オンライン), 入手先 (<https://ci.nii.ac.jp/naid/170000130837/>) (2016).