

RFID タグ検出履歴からの タグ間距離・方向推定による物探し支援

勝泉 夏生¹ 笹川 真奈¹ 椎尾 一郎¹

概要:

屋内に貼付された多数のパッシブ RFID タグを読み取りながら、目的物に貼られたタグを探す作業を支援するシステムについて提案する。場所や物に多数のタグが貼られた環境で、ユーザは、スマートフォンとリーダーを手に物探しを行う。システムは、リーダーによりたまたま読み込まれた手近なタグから、探索目的物タグの方向と距離をスマートフォン画面に表示し、これにより探索作業を支援する。一方、探索中に得られた、タグの検出履歴とスマートフォンの移動方向を用いて、システムはタグ同士の距離と方向を推定し、そのデータベースを更新する。本論文では、タグ間の距離・方向推定手法とその有用性について述べる。

Item locating method using estimated distance and direction between a pair of passive RFID tags using detection history

1. はじめに

日常生活における物探しを支援するために、物に RFID(Radio Frequency Identification) タグを貼り、これをタグリーダーで探索する手法が多数提案され、商品化されている。RFID タグはアクティブタグとパッシブタグに分類される。アクティブタグは電池が内蔵されたタグで、電池の電力により電波を発して通信を行う。パッシブタグはリーダーからの電波を電力に変えて通信を行うタグで、安価で電池が不要である。電池の交換が不要で安価なパッシブタグは、タグをメンテナンスする負担が小さく、ランニングコストが低い。しかし、アクティブタグの通信距離数 10m 程度に対して、パッシブタグは通信距離数 10cm 程度と短い。よって、探索目的のパッシブタグの位置が未知の場合、ユーザはリーダーを持ちながらパッシブタグが検出されるまで移動し続ける必要がある。また、RFID タグを利用した物探し支援システムにおいて、多数の RFID タグの情報管理はユーザの負担になると考えられる。

筆者らは、ランニングコストの低いパッシブタグ（以下、タグ）を場所や物に貼り付け、過去の物探し行動で取得したタグの情報を利用し、物探し支援を行うシステムを提案

した [1], [2]。ユーザはスマートフォンと RFID リーダー（以下、リーダー）を手に持ち、タグを読み取りながら物探しを行う。物探し中に、同時に検知される頻度が高いタグ同士は、近くにあると考えられる。そこで、タグ同士が同時に検知される頻度から、そのタグ同士の距離を推定した。また、ユーザが読み取ったタグから探している物（以下、目的物）の間にある、タグ同士の距離を足し合わせることで、目的物のタグまでのおおよその距離を算出した。この手法によって、目的物のタグを直接リーダーで検知できなくとも、たまたま手近にあるタグの一つが読めれば、そのタグから目的物タグまでの距離を知ることができる。ユーザは、より目的物まで近いタグを探索しつつ移動することで、目的物タグに導かれる。さらに、物探し中に得られた情報を活用してタグ間距離データを自動更新するため、多数の RFID タグをユーザが管理する負担が軽減される特徴がある。この手法では、タグ間の距離に着目していた。タグ間の距離に加えて、タグ間の方向も推定すれば、目的物への距離だけでなく、方向も表示可能になり、より効率的に物探しが行えるであろう。

そこで本論文では、タグが多数貼られた屋内環境において、タグの検出履歴に加えてスマートフォンの移動方向も利用し、タグ間の距離と方向を推定する方法を提案する。タグ間の距離に関しては、先行研究では 2 次元で計算して

¹ お茶の水女子大学
Ochanomizu University, Bunkyo, Tokyo 112-8610, Japan

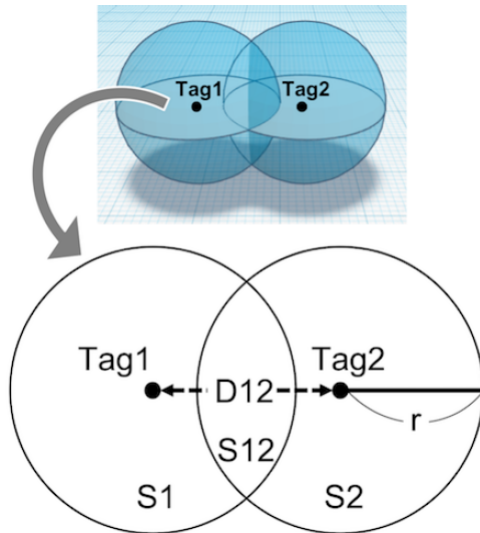


図1 タグ2点間の断面図. Tag1, Tag2の周囲に描かれた円は、それぞれのタグを検出できる範囲を示す。2つのタグ Tag1, Tag2の推定距離は、2つのタグが同時に検出される立体空間 V12(D12を軸とした S12の回転体) から算出される。

いた手法を3次元に拡張することで、より精密な距離推定を試みる。また、タグ間の方向推定に関しては、スマートフォンの方位センサと加速度センサを利用する。すなわち、ユーザがあるタグを読み取ったのち、次のタグを読み取るまでにスマートフォンが動いた方向は、あるタグから次のタグへ向かう方向であると考え、タグを読み取る間に動いたスマートフォンの方向を、タグ間の方向とした。本稿では、シミュレーション、プロトタイプ実装および実際の屋内環境での実験を実施し、本手法において推定される距離と方向の評価を行った。以下では、本手法により推定されるタグ間距離を推定距離、タグ間の方向を推定方向と表記する。

2. 推定距離・方向の算出アルゴリズム

2.1 推定距離の算出

リーダによってある2つのタグが同時検出された場合、それらのタグは同時に検出されなかったタグと比較して、互いに近い場所にあると考えられる。本システムで利用したリーダは検出可能範囲が半径約60cm程度のため、同時検出されたタグ間の距離は約120cm以内である。また、タグ同士が近くなるほど、タグを同時に検出できる範囲が大きくなる。そこで、タグを同時に検出できる立体空間の大きさから、タグ同士の推定距離を算出しようと考えた。

近くに位置する1対タグ(Tag1, Tag2)の推定距離を算出する方法を説明する。実際の Tag1, Tag2 は xyz 軸における球体の範囲内において検出が可能であるが、ここでは説明のためタグ2点間の断面図(図1)を使用する。Tag1, Tag2の周囲に描かれた円は、それぞれのタグを検出できる範囲を示す。円が重なった場所で読み取りを行えば、両

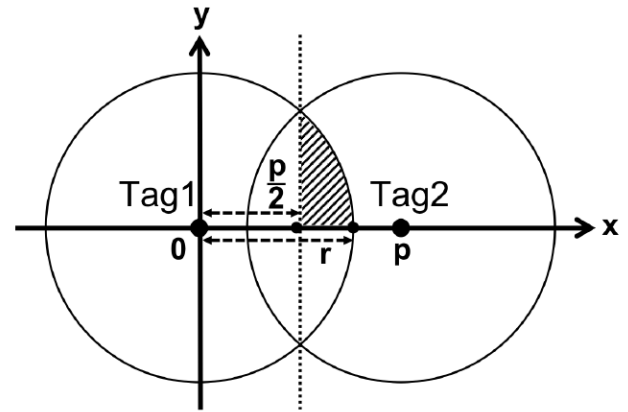


図2 タグ2点間の断面図を xy 軸上においた図。V12は斜面部を x 軸を中心に回転させたのちに2倍にした体積。

方のタグを同時に検出できる。図1において、円の半径を r 、円が重なっている面積を $S12$ 、円の中心間の距離を $D12$ とおくと、Tag1, Tag2 が同時に検出できる立体空間の大きさ $V12$ は、 $D12$ を軸として $S12$ を回転させた体積となる。ここで、図2に示すように、 $D12$ を p とおき、Tag1 を xy 軸上における $(0, 0)$ におくと、 $S12$ は中心 $(0, 0)$ 半径 r の円の $\frac{p}{2} \leq x \leq r$ の範囲(図2の斜線部)を4倍した値になる。この $S12$ を x 軸を中心として回転させると $V12$ となるため、 $V12$ は以下の式で算出できる。

$$V12 = 2 \int_{\frac{p}{2}}^r \pi(\sqrt{r^2 - x^2})^2 dx \quad (1)$$

$$= \frac{\pi}{12} (16r^3 - 12r^2p + p^3) \quad (2)$$

一方、ユーザがタグの周囲をランダムに多数回スキャンした場合、Tag1のみを検出する回数 $C1$ 、Tag2のみを検出する回数 $C2$ 、Tag1, Tag2を同時に検出する回数 $C12$ の比は、それぞれが検出できる立体空間の大きさ $V1$, $V2$, $V12$ の比と一致する。つまり $V12$ は、

$$V12 \propto \frac{C12}{(C1 + C2 + C12)} \quad (3)$$

と表せる。ここで、式(2)に式(3)を代入し、 $p(=D12)$ についての3次式を解くことで、Tag1とTag2の距離である $D12(=p)$ の近似解を、 $C1$, $C2$, $C12$ によって表すことができる。この近似解を、1対タグ間の推定距離とする。電波強度を利用して推定距離を求める手法も可能ではあるが、マルチパスが発生しやすい室内では十分な精度が得られないと考えている。そのため、本システムでは単純に、タグの電波が検知されたか否かの二値を使用している。

こうして得られた1対タグ間の推定距離から、全タグ同士の相対的な関係を示す、無向グラフ(図3)を構築する。この無向グラフのノードはタグのIDを、エッジの長さは1対タグ間の推定距離を表す。関係が不明(NULL)なタグ同士はエッジを持たない。この無向グラフ上でダイクストラ法を用い、任意のタグから目的物のタグまでの最短距離

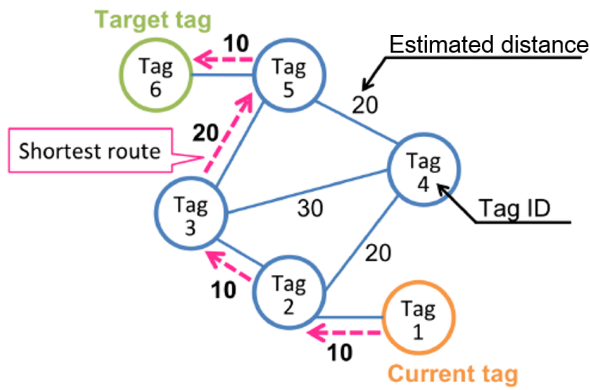


図 3 全タグ同士の推定距離の無向グラフ。エッジの長さは 1 対タグ間の推定距離を、点線の矢印はダイクストラ法によって算出された目的物のタグまでの最短経路を示している。

を算出する。これは、図 3 の点線の矢印が示す最短経路上の数値を足した値に相当する。この最短距離を任意のタグと目的物のタグとの間のおおよその距離として算出する。

2.2 推定方向の算出

ユーザがリーダを用いてあるタグを検出したのち、ユーザがリーダを移動させ、別のタグを検出した場合、その 2 つのタグはリーダの移動方向と類似した方向関係であると考えられる。そこで、タグの検出履歴とリーダの移動から、タグ同士の推定方向を算出しようと考えた。本システムでは、リーダはスマートフォンと共に移動するため、リーダの移動方向は、以下、スマートフォンの移動方向によって推定する。推定されるスマートフォンの移動方向は、軸がそれぞれ北・東・地表面に垂直で天を指す、3 軸の座標系を用いて表す。スマートフォンの移動方向と各タグ間の推定方向は 3 次元単位ベクトルとし、距離の情報は持たない。

タグの読み取りを 2 回行った場合の、具体的な推定方向の算出方法を述べる。例えば、1 回目の読み取り時に Tag1 と Tag2、2 回目に Tag2 と Tag3 が読み取れたとする。また、1 回目と 2 回目の読み取りの間に、スマートフォンが移動した方向を $\mathbf{u}$ とする。スマートフォン移動方向 $\mathbf{u}$ は、Tag1 → Tag2, Tag1 → Tag3, Tag2 → Tag3 の 3 対のタグ間方向に近い方向だと考えられる。そこで、タグ間の方向が過去に推定できていない場合は、 $\mathbf{u}$ をタグ間方向として推定し、過去に方向推定がされていたら、過去の推定方向と $\mathbf{u}$ を加重平均して、以下のように更新することにした。

t を読み取りの回数、 $t-1$ 回目の読み取りから t 回目の読み取りまでのスマートフォンの移動方向を $\mathbf{u}_t$ とする。この時、 $t-1$ 回目と t 回目に読み取れたタグの組み合わせのうち、異なる ID となった 1 対タグの推定方向をそれぞれ求める。各々の 1 対タグの、 $t-1$ 回目までの物探して算出された推定方向を $\mathbf{v}_{t-1}$ 、 w を重みとした場合、各々の 1 対タグの、 t 回目のタグの読み取りにおいて算出される推

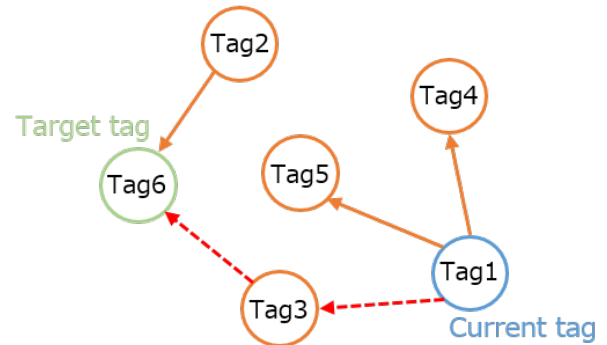


図 4 全タグ同士の推定方向の有向グラフ。エッジは 1 対タグ間の推定方向を表す 3 次元単位ベクトル。点線の矢印は、本有向グラフをエッジの重み 1 の無向グラフとみなした上で、ダイクストラ法にて求めた最短経路。経路上の推定方向を合成することで、目的のタグまでのおおよその方向を得る。

定方向 $\mathbf{v}_t$ は、以下のように計算する。

$$\mathbf{v}_t = \begin{cases} \mathbf{u}_t & (\mathbf{v}_{t-1} = \text{NULL}) \\ \frac{w\mathbf{v}_{t-1} + \mathbf{u}_t}{w+1} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

$t-1$ までの物探してタグ間の推定方向の情報が保存されていない（推定方向が NULL）場合、 $\mathbf{u}_t$ を $\mathbf{v}_{t-1}$ とする。 $\mathbf{v}_{t-1}$ が保存されている場合は、 $\mathbf{u}_t$ と $\mathbf{v}_{t-1}$ の加重平均を算出して、 $\mathbf{v}_{t-1}$ とする。重み w は、環境やタグが貼られた物の種類に応じて設定しても良い。例えば、タグが貼られた物が頻繁に動かされる場合は、最後に読み取った情報を重視するために、過去情報の重み w を小さく設定すると良いであろう。また、1 対タグが $t-1$, t 回目のタグの読み取り時の両方で検出された場合、1 対タグ間の方向関係は不明であるため、推定方向の更新を行わない。

こうして得られた 1 対タグ間の推定方向から、全タグ同士の相対的な関係を示す有向グラフ (図 4) を構築する。この有向グラフのノードはタグの ID を、エッジは 3 次元単位ベクトルを表す。関係が不明 (NULL) なタグ同士はエッジを持たない。この有向グラフをエッジの重み 1 の無向グラフとみなした上で、ダイクストラ法にて最短経路を求める。そうして、求めた最短経路上にあるタグ間のエッジである 3 次元単位ベクトルを合成し、算出された方向を、任意のタグから目的物のタグまでのおおよその方向とする。

3. プロトタイプ

3.1 システム構成

本システムの構成を図 5 に示す。本システムは、Android スマートフォン*1、サーバ*2、複数のタグ*3、リーダ*4で構成される。リーダは大きさ 148mm×51mm×30mm、重量

*1 HUAWEI, HUAWEI P20 lite

*2 Dell 社, XPS13, Windows10

*3 スマートテクノロジー, Short Dipole

*4 東北システムズ・サポート, DOTR-920J

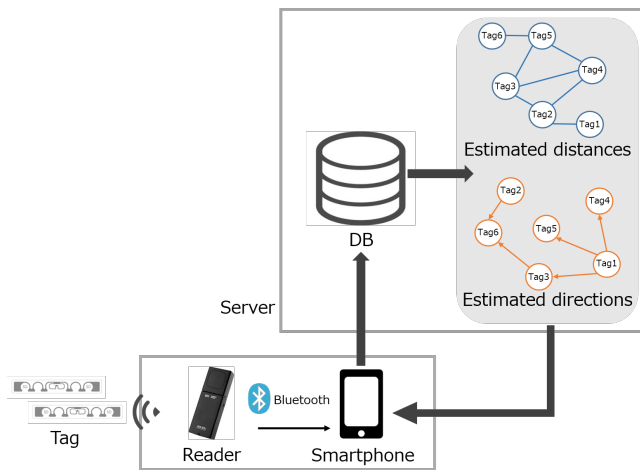


図 5 システム構成図.

170gである．安価で小型，手軽に利用できる低出力リーダでも，提案手法が実現可能であることを確認するため，送信出力を 10%に設定している．この場合，実際の環境におけるタグの読み取り可能距離は半径約 60cm 程度である．また以下では，リーダのボタンを押して周辺のタグを読み取る操作をスキャンと表記する．本システムでは，リーダとスマートフォンを貼付して一体化したため，スキャン時のリーダとスマートフォンの位置は同じとなる．

スキャンが行われると，読み取れたタグの ID と電波強度が，リーダからスマートフォンへ Bluetooth 経由で送信される．同時に，一つ前のスキャンから今行われたスキャンまでのリーダの移動方向を，スマートフォンのアプリケーションにて推定する．リーダの移動方向はスマートフォンの移動方向と一致するとし，以下では，スマートフォンの移動方向の推定方法について述べる．まず，スマートフォンの Android OS で提供されている重力センサと方位センサを使用して，線形加速度センサのデータを座標系変換する．次に，得られたデータに対し，2 重積分，正規化処理を行うことで，スマートフォンの移動方向を算出できる．

物探し終了後，ユーザがアップロードボタンを押すと，スマートフォンに蓄積された情報がサーバへ送信される．そうして，サーバ上にて 2 章の手法を用いることで，全タグ同士の推定距離の無向グラフおよび推定方向の有向グラフを構築・更新する．

物探し中，ユーザが任意のタグをスキャンすると，サーバ上に構築されたグラフを用いて推定した目的物までのおおよその距離と方向が，スマートフォン画面に数値と矢印で表示される (図 6)．ユーザは，画面の矢印に従って屋内を探索することで，目的物を見つけることができる．

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション環境

1 対タグ間の推定距離・方向を算出するアルゴリズムの妥当性を検証したシミュレーションについて述べる．

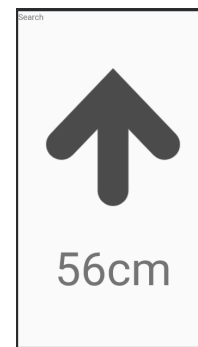


図 6 探索時のアプリケーション画面．ユーザが読み取ったタグから目的物までのおおよその距離と方向が表示される．

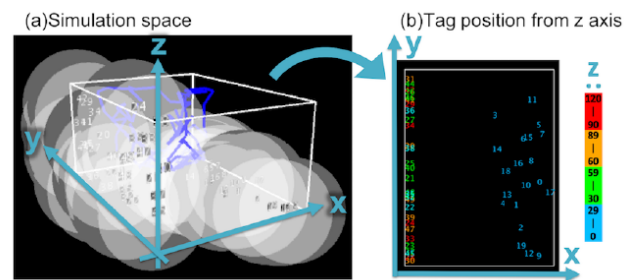


図 7 (a) シミュレーション空間．ユーザはランダムウォークをしながらスキャンを行う．数字はランダムに配置されたタグ ID の位置，白い球体は各タグの検出可能な範囲，青線はユーザがスキャンをした軌跡．(b) シミュレーション空間のタグの位置を z 軸方向から見た図．数字はタグの xy 座標上での位置，色はタグの z 座標を表す．

シミュレーションは Processing で実装された，図 7 に示す 3 次元空間で行った．シミュレーション画面上での 1px を実世界での 1cm とし，シミュレーション空間のサイズは 180px(x)×240px(y)×120px(z) とした．図 7 の各数字は 50 個のタグ ID の位置，白い球体は各タグの検出範囲 (半径 60px)，青線はユーザがスキャンをしながら移動させたリーダの軌跡を表す．z=0px に位置する平面 (80px(x)×240px(y)) をシミュレーション空間内の机上とみなしてタグを 20 個ランダム配置した．x=0px に位置する平面 (240px(y)×120px(z)) をシミュレーション空間内の棚とみなしてタグを 30 個ランダム配置した．シミュレーション空間内で，ユーザは空間の中心から 8 方向にランダムウォークし，スキャンを行う．スキャン間の長さは約 30cm とする．またスキャン時の座標と 1 つ前のスキャン時の座標から求めた単位ベクトルをリーダの移動方向とする．本シミュレーション空間内にてユーザがスキャンをすると，検出したタグ ID とタイムスタンプ，リーダの移動方向が保存される．

4.2 推定距離の算出結果

シミュレーション空間内で，ユーザが 1000 回スキャンした場合に算出される推定距離の結果を図 8 に示す．x 軸

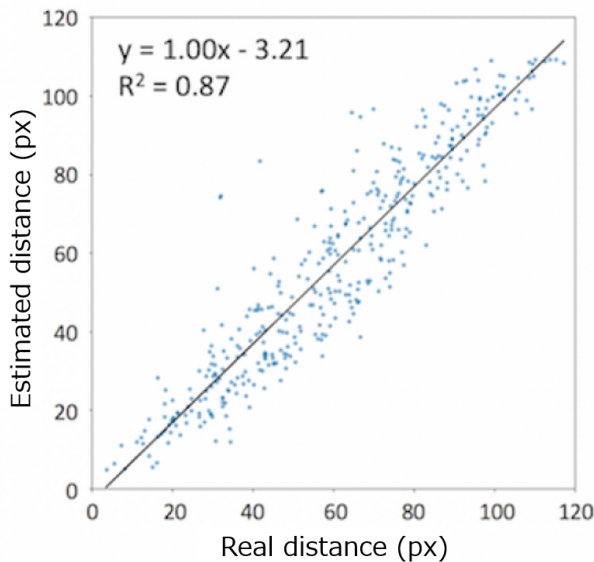


図 8 シミュレーション空間における推定距離の算出結果. x 軸はシミュレーション空間上の 1 対タグ間の実際の距離, y 軸は本システムのアルゴリズムで求めた 1 対タグ間の推定距離.

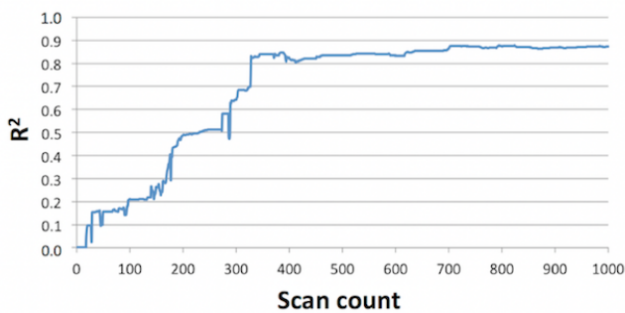


図 9 スキャン回数に対する決定係数の推移. x 軸はスキャン回数, y 軸は決定係数 R^2 .

はシミュレーション空間における 1 対タグ間の実際の距離 (px) を, y 軸は本システムのアルゴリズムで求めた 1 対タグ間の推定距離 (px) を示す. タグ対が一度でも同時検知されれば推定距離が計算できるため, 推定距離が計算できたタグの組をプロットした (図 8). プロットした点の近似直線を求めると, その回帰式は $y = 1.00x - 3.21$ となる. また, 決定係数 R^2 の値は 0.87 であり, 1 対タグ間の推定距離は実際の距離と約 9 割の比例関係にあると言える. スキャンの回数を重ねることで変動する決定係数 R^2 の推移を図 9 に示す. 決定係数 R^2 の推移を見ると, 328 回スキャンすると R^2 が 0.80 以上になり, 500 回前後で変化の勾配がゆるやかになっている. 500 回以降はスキャン回数を重ねるにつれて, 0.9 に漸近する. 以上より, 本システムにおける推定距離の算出アルゴリズムによって求められる 1 対タグ間の推定距離は, スキャンを重ね, 十分な情報量を持つ無向グラフを構築することで, 実際の距離を反映させることが可能であることを確認した.

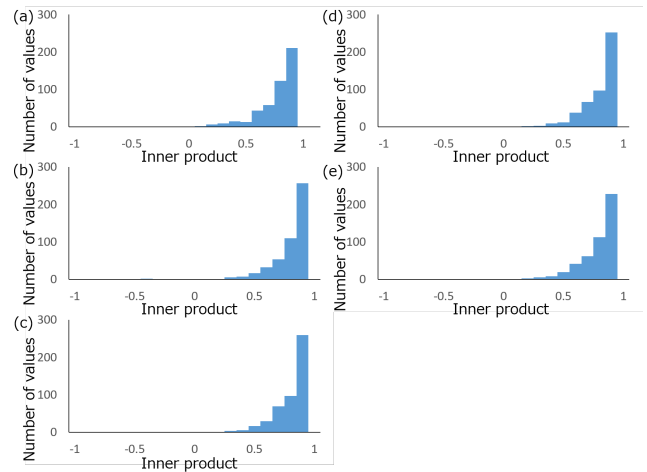


図 10 シミュレーション空間内にて重み w 毎に算出した推定方向の結果. (a) $w = 1$, (b) $w = 2$, (c) $w = 3$, (d) $w = 4$, (e) $w = 5$. x 軸は実際の方向と推定方向の内積 (階級範囲 0.1 刻み), y 軸は値数. 内積が大きいほど誤差は小さいとみなすことができる.

4.3 推定方向の算出結果

推定距離の算出シミュレーションより, 500 回のスキャンで十分な情報量の無向グラフを構築できることが確認できた. そこでシミュレーション空間内で, ユーザーが 500 回スキャンした場合に算出される推定方向を, 重み毎 (重み $w = 1 \sim 5$) に算出した. シミュレーション結果を図 10 に示す. 図 10 では, 推定方向が求められたタグ対について, 実際の方向との誤差をヒストグラムで表している. x 軸は実際の方向を示す単位ベクトルと推定方向の単位ベクトルの内積 (階級範囲 0.1 刻み) を, y 軸は各階級の値数を示す. 内積が大きいほど誤差は小さいとみなすことができる. また内積の範囲は $-1 \sim 1$ (誤差 180 度 ~ 0 度) となる. 図 10 より, どの重みにおいても, 内積の大きい範囲に値の分布が集中していることがわかる. また, 全重みの結果を見ると, 内積 0.5 以上 (誤差 45 度以下) の割合が, 最大は 97.7% (重み $w = 3$ の時), 最小は 92.9% (重み $w = 1$ の時) となった. また, 1000 回スキャンした場合は, 全ての重みにおいて, 内積 0.5 以上 (誤差 45 度以下) の割合が 95% 以上となった. そのため, 推定距離の算出アルゴリズムと同様に, 推定方向の算出アルゴリズムも, スキャンを繰り返すことで実際の方向を反映させることが可能だと確認できた.

5. 実環境における推定距離・方向の算出

5.1 実環境における推定距離の算出

実環境におけるタグの検出履歴から, 実際のタグ間の推定距離が算出できるかを検証するため, 実際の屋内環境で実験を行った. 本実験は実際の生活空間の一角 (図 11) で行い, 図 11 中の赤枠のエリア (縦 $80\text{cm} \times$ 横 240cm の机と横 $240\text{cm} \times$ 高さ 120cm の棚) を探索範囲とした. 探索

範囲内の机上に 20 個、棚に 30 個、合計 50 個のタグをランダムに貼付した。図 11 中において見られる白い長方形のシールがタグである。これらのタグは、タグ同士の間隔が約 60cm 以内であるように貼付し、かつタグ同士が重なり合わないよう留意した。また、本システムで利用したタグは金属の影響を強く受けるため、金属製の物は避けて貼付した。リーダの実際の環境における読み取り可能距離が半径約 60cm 程度であるため、探索範囲内においてスキャンすれば何らかのタグを読み取れることができる状況である。探索範囲内で 500 回スキャンを行い、2.1 章で詳述したアルゴリズムを用い、同時検出されたタグ対の推定距離を算出した。

結果を図 12 に示す。図 12(a) は、縦軸に推定距離、横軸に実際の距離を割り当てプロットした散布図である。スキャン時に同時検出され推定距離が算出されたタグ対のみをプロットしている。図 12(a) から、実際の距離が 120cm 以内にあるタグ対の実際の距離と推定距離は相関があり、タグ対の推定距離を算出する提案アルゴリズムが、シミュレーション環境のみならず、実環境においても妥当であったと判断できる。

一方で、実際の距離が 120cm 以上離れたタグ対が 120cm 以内にあると推定されるケースが多いことも、図 12(a) は示している。これは、シミュレーションでは現れなかった現象である。実環境における、おそらくはマルチパスなどの影響で、本アルゴリズムでは同時検出されない前提であったタグ対が同時検出された結果であると考えられる。1 対タグ間の推定距離を算出するアルゴリズムでは、検出距離の倍（今回の設定は 120cm）よりも離れた位置にあるタグ同士の推定距離の算出は想定していない。その結果、マルチパスなどで稀に検出される遠距離タグ対は、遠距離ではあるが 120cm 以内にあると判断されて、図 12(a) の結果となったと考えられる。将来の改良においては、マルチパスなどにより稀に検出されるタグ対を除外することで、目的物までのおおよその距離の推定精度を改善できるであろう。今回の例では例えば、実際の距離が 120cm 以上のタグ対の多くが、推定距離が 70cm 以上と算出されているため、推定距離が 70cm 以上のタグ対を除外する、などが考えられる。

次に、推定距離の収束とスキャン回数との関係を、シミュレーションと比較した。マルチパスの影響を排除するために、実際の距離が 120cm 以下であるタグ組のプロットのみを用いて、回帰直線を描き決定係数を算出した。これを図 12(a) の散布図に書き加えた。また、スキャン回数に対する決定係数の変化を、図 12(b) に示す。決定係数の推移は、シミュレーションと同様、実環境においても 500 回前には勾配がゆるやかになっており、500 回のスキャン時の決定係数の値は $R^2 = 0.61$ であった。シミュレーション結果よりも決定係数の値が小さい理由は、タグとリーダの指



図 11 推定距離の算出の実験環境の様子。赤枠内が探索範囲。

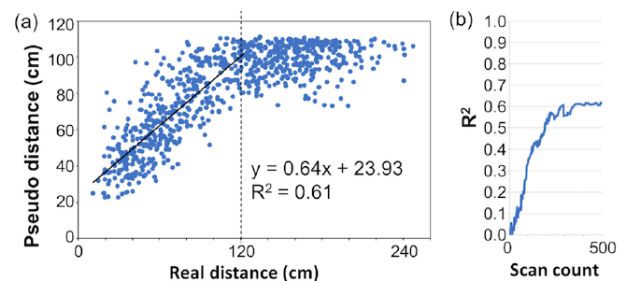


図 12 実際の探索範囲内にて 500 回スキャンした結果。(a) 同時検出されたタグ対の実際の距離と擬似距離。(b) 決定係数 (R^2) の推移。

向性、障害物、マルチパスなどの影響により、推定距離の算出アルゴリズムで仮定していた、タグの検出範囲が球状であるという前提から、多少の乖離があったためと考えられる。

5.2 実環境における推定方向の算出

実環境におけるスマートフォンの移動方向の推定から、実際のタグ間の推定方向が算出できるかを検証するため、実際の屋内環境で実験を行った。本実験は、図 13 に示す生活空間の一角 (360cm×350cm) を探索範囲とした。図 13 の青色の四角で示した通り、机や棚等に 14 枚のタグをランダムに貼付した。これらのタグは、床上 60cm から 160cm の高さに設置した。本実験における方向は、図 13 に赤い矢印で示されている、北を指す N 軸、東を指す E 軸、重力加速度に垂直で天を指す G 軸の 3 軸の座標系で表される。

実際の物探しを想定して、筆者の 1 人がタグからタグまでをランダムに 100 回移動し、スマートフォンと一体化しているリーダをタグにかざしてスキャンを行った。この結果、合計 101 回のスキャンをタグの近くで行った。今回の評価実験では、リーダの電波出力を最大出力から 20.0dBm

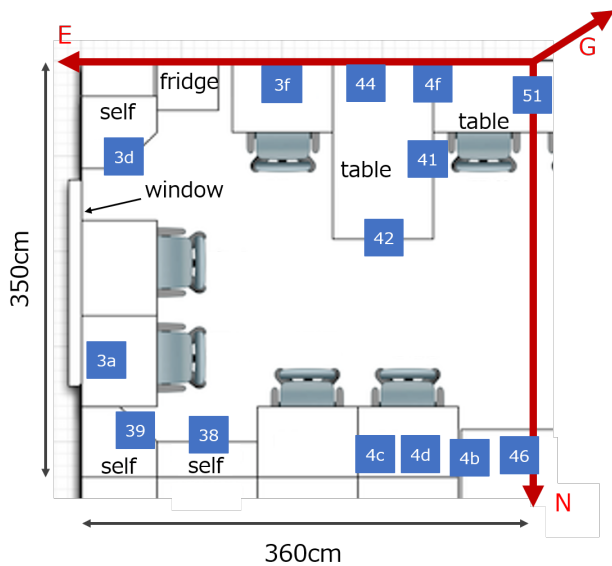


図 13 推定方向の算出の実験環境の見取り図。青色の四角はタグの位置と番号。本実験における方向は、北を指す N 軸、東を指す E 軸、重力加速度と同様に地表面に垂直で天を指す G 軸の 3 軸（赤い矢印）の座標系で表される。

に下げ、読み取り範囲が 10cm 程度になるように設定した。これにより、スマートフォンの移動方向は実際の 1 対タグ間の方向データと近似すると期待できる。実験環境内における 101 回のスキャンによって得られた、タグの検出履歴およびスマートフォンの移動方向の蓄積データを用いて、2.2 章で述べた加重平均処理を行い、タグ対の推定方向を算出した。図 14(a) に結果を示す。x 軸はタグ間の実際の方向を示す単位ベクトルと本アルゴリズムで算出された推定方向を示す単位ベクトルの内積を（階級範囲 0.1 刻み）、y 軸は各階級の値数を示す。ここでは、推定方向が算出されたタグ対のみヒストグラムとして描画している。図 14(a) から、シミュレーションと同様に内積の大きい値の範囲に値の分布が集中しており、推定方向と実際の方向との誤差が小さいタグ対が多いことがわかる。

スマートフォンの移動方向推定には誤差が含まれ、これがタグ対方向の誤差となる。今回の場合、スマートフォンを 100 回移動させたところ、実際のスマートフォンの移動方向と、推定移動方向との誤差が、90 度以上のものが 10% あった。この結果、タグ対の方向も誤って推定される可能性があるが、同じタグ対を多数観測し、推定方向を平均することで誤差は減少すると考えられる。今回の測定結果からも、平均による誤差除去の効果を確認できた。図 14(b) は、横軸をタグ対の読み取り回数、縦軸をタグ対推定方向と実際方向の内積にした散布図である。ここから、5 回以上観測されれば内積が 0.7 程度以上になり、タグ間の推定方向の更新が繰り返されるほど、実際の方向に近い結果が得られることがわかる。

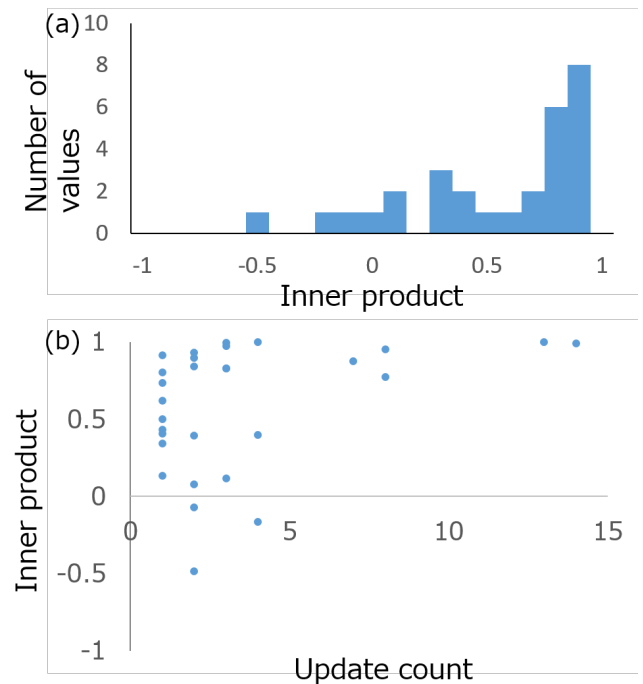


図 14 実際の探索範囲内にて 101 回スキャンした結果。(a) タグ間の実際の方向と推定方向の内積の分布。(b) 推定方向の更新回数と内積の分布。

6. 関連研究

日々の生活空間に、コンピュータやセンサを取り入れて物探しを支援する研究は多数ある [3][4] が、その中でも特に、IC タグを取り入れて物探しを支援する研究が数多くされている。例えば SearchLight[5] では、プロジェクターが搭載された可動式カメラによって物体に貼られた光学式タグを認識し、探したい物に光を照射することで物探しを支援している。また、位置計測器から取得したアクティブ RFID タグと超音波タグの位置情報をパーティクルフィルタで融合することで、探したい物の位置を推定しスポットライトを照射するシステム [6] がある。さらに、読み取った RFID タグの情報から壁面のカメラを操作し、カメラの向きから RFID タグが貼られた物の位置を推定するシステム [7] がある。これらの研究は、常に電力の供給が必要な固定のタグリーダやカメラなどを設置する必要があるため、ランニングコストが大きい。本提案は、電力が不要なパッシブタグ、物探しをする時のみ電力を必要とする小型リーダとスマートフォンのみが必要なため、これらに比べて比較的ランニングコストが小さい。

Flashlight[8] は、タグが照射されたフラッシュライトの光を受け、ライトにエンコードされた ID に対応するタグの LED が点灯する。RFID Lamps[9] では、ユーザが手持ったプロジェクタの光をタグが読み取り、読み取った情報を用いてプロジェクタからタグまでの相対的な位置を知るシステムである。Flashlight と RFID Lamps では、符号

化された光を照射してタグの位置を取得する方法である。比較的ランニングコストが小さいパッシブタグを用いた研究としては、例えば IteMinder[10] がある。これは、家具や壁に貼付された位置が既知のパッシブ RFID タグと移動する日用品に貼付されたパッシブ RFID タグを自動走行ロボットが読み取り、物の位置情報を提示している。また、家具に小型リーダを取り付け、家具と読み取ったタグの相対位置を提示するシステム [11] がある。これらの研究は、タグやリーダ、照射する光にあらかじめ位置などの情報を登録をする必要がある。本提案は、タグの位置や方向などの情報を、物探し中に得られた情報から推定するため、タグの情報をユーザが手ずから登録する負担がかからない。

7. まとめと今後の展望

本研究では、屋内に貼られた多数のパッシブタグを繰り返し読み取ることで、物探しに役立てるシステムを提案した。本システムは、複数のタグの同時検出頻度とリーダの移動方向情報を利用し、1 対タグ間の推定距離と推定方向を算出する。算出した推定距離と推定方向を元に、ユーザが読み取ったタグから目的物のタグまでのおおよその距離と方向を提示することで、物探しの効率化を目指した。また本方式では、タグの位置と方向情報を過去の物探し履歴から自動推定するので、これらの情報をユーザがシステムに登録する必要が無い。本論文では、シミュレーション環境と実環境において、1 対タグ間の推定距離・方向を算出するアルゴリズムの妥当性を確認した。今後は、目的物までのおおよその距離と方向を提示することで物探しを行うユーザ実験を行い、本システムの有用性を確認したい。

謝辞 探索用スマートフォンアプリケーション開発の一部は、本学理学部情報科学科の浦恵里加氏が担当した。本研究は JSPS 科研費 JP18K11392 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 笹川真奈, 池松香, 椎尾一郎: 貼るだけ探索: RFID タグの検出履歴を利用した物探し支援システム, WISS2016, pp. 119–124 (2016).
- [2] Sasagawa, M., Ikematsu, K. and Siio, I.: Simply tag and find: finding indoor items by using detection history of RFID tags, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, pp. 365–368 (2016).
- [3] Ueoka, T., Kawamura, T., Kono, Y. and Kidode, M.: I’ m here!: A wearable object remembrance support system, *International Conference on Mobile Human-Computer Interaction*, Springer, pp. 422–427 (2003).
- [4] Xie, D., Yan, T., Ganesan, D. and Hanson, A.: Design and implementation of a dual-camera wireless sensor network for object retrieval, *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, IEEE Computer Society, pp. 469–480 (2008).
- [5] Butz, A., Schneider, M. and Spassova, M.: Searchlight—a lightweight search function for pervasive environments, *International Conference on Pervasive Computing*, Springer, pp. 351–356 (2004).
- [6] 中田豊久, 金井秀明, 國藤進: スポットライトを用いた屋内での探し物発見支援システム, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, 情報処理学会, pp. 3962–3976 (2007).
- [7] Kamol, P., Nikolaidis, S., Ueda, R. and Arai, T.: RFID based object localization system using ceiling cameras with particle filter, *Future generation communication and networking (fgcn 2007)*, Vol. 2, IEEE, pp. 37–42 (2007).
- [8] Ma, H. and Paradiso, J. A.: The FindIT Flashlight: Responsive tagging based on optically triggered microprocessor wakeup, *International conference on Ubiquitous Computing*, Springer, pp. 160–167 (2002).
- [9] Raskar, R., Beardsley, P., van Baar, J., Wang, Y., Dietz, P., Lee, J., Leigh, D. and Willwacher, T.: RFIG lamps: interacting with a self-describing world via photo-sensing wireless tags and projectors, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 23, No. 3, ACM, pp. 406–415 (2004).
- [10] Komatsuzaki, M., Tsukada, K., Siio, I., Verronen, P., Luimula, M. and Pieskä, S.: IteMinder: finding items in a room using passive RFID tags and an autonomous robot (poster), *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*, ACM, pp. 599–600 (2011).
- [11] 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, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, Association for Computing Machinery, p. 325–334 (2013).