

# Wi-Fi電波を用いたイメージングによる 対象識別法の検討

森田 幸歩<sup>1</sup> 前田 透<sup>1</sup> 中川 善博<sup>1</sup> 内山 彰<sup>1,2</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

**概要：**近年、メンテナンスが不要である行動認識手法として、Wi-Fi電波によるセンシング（ワイヤレスセンシング）が注目を集めている。ワイヤレスセンシングは、人やモノの動きに伴う電波変動を利用して行動を認識するもので、充電や電池交換に伴うメンテナンスが不要であることに加え、広く普及しているWi-Fi設備を利用できるため、導入コストが削減できるという利点がある。しかし、ワイヤレスセンシングは対象が複数ある場合それらの識別が困難という課題を持つ。この課題に対し、本研究では既存設備であるWi-Fiを利用した人やモノの識別法の設計を目標としている。Wi-Fi電波を利用した人やモノの認識方法としてWisisionと呼ばれるWi-Fiイメージング手法が存在する。Wi-Fiイメージングでは、到来方向ごとの電波強度をカメラのように可視化することで物体の認識ができる。本稿では、対象識別の実現のため、シミュレーションおよび実機実験によりWi-Fiイメージング性能を調査するとともに、それに基づく物体検出アルゴリズムの検討を行った。その結果、1波長×1波長以上の導体がある場合、その検出が可能になったことがわかった。また、複数の導体を区別するためには、導体間に少なくとも波長の2倍程度の距離が必要になったことが分かった。

## 1. はじめに

近年、人の状況に応じた様々なサービスを提供するため、人の行動を認識する研究が盛んに行われている。行動認識を実現する手段としては、カメラ映像を利用した手法[1]や、ウェアラブルセンサを用いた手法[2]が多数提案されている。しかし、プライバシーの問題からカメラの利用は家庭などにおいて困難である。また、ウェアラブルセンサを利用した場合には、装着に手間がかかることや充電、バッテリー交換といったメンテナンスの手間が必要となる。人感センサなどの設置型センサを用いて、プライバシーに配慮しながら家庭内での行動を認識する研究[3]も数多く行われているが、多くの場合、ウェアラブルセンサと同様にバッテリー交換の手間が必要となる。このような課題を解決可能な行動認識手法として、Wi-Fi電波によるセンシング（ワイヤレスセンシング）が注目を集めている。ワイヤレスセンシングは、人やモノの動きに伴う電波変動を利用して行動を認識するもので、充電やバッテリー交換に伴うメンテナンスが不要であることに加え、広く普及しているWi-Fi設備を利用できるため、導入コストが削減できるという利点がある。

Wi-Fiを利用したセンシングでは、Channel State Infor-

mation (CSI) を利用した状況認識手法[4]が多く提案されている。これらは、人の動作により周囲に電波変動が発生することを利用し、CSIによって取得可能なWi-Fi電波の位相および振幅に基づき、行動や混雑などの状況認識を実現している。しかし、これらのワイヤレスセンシングは人やモノなどの対象が複数ある場合、それらの識別が困難という課題を持つ。この課題を解決する手法としてRFIDを利用した手法[5]も存在するが、RFIDリーダーを追加で設置する必要がある。これらの課題に対し、本研究では既存設備であるWi-Fiを利用した人やモノの識別法の設計を目標としている。

Wi-Fi電波を利用した人やモノの認識を実現するための基礎技術として、Wisision[6]と呼ばれるWi-Fiイメージング手法が存在する。Wi-Fiイメージングでは、到来方向ごとの電波強度をカメラのように可視化することで物体の大きな形状を捉えられる。しかし、Wisisionでは人やモノ、金属物体が存在する場合にその位置を捉えられることは示されているが、個々の人やモノを識別する方法は検討されていない。Wi-Fiイメージングは波長に応じた空間分解能を持つため、大きなモノの大きさや形状は識別が可能である。しかし、イメージングの解像度は決して高くないため、ほとんどの人やモノは大きさや形状が類似することとなり、それらの識別は非常に困難である。これに対して、

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

<sup>2</sup> JST さきがけ

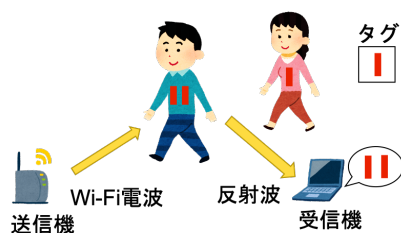


図 1 Wi-Fi 電波による対象識別

我々の研究グループでは、電波に対して明確な影響を与える金属を用いて反射波に固有のパターンを作り出すことで、対象識別の実現を目指している。具体的には、図 1 のようにタグを作成し、識別対象となる人やモノに付与することで明確な電波反射特性を持たせる。これによって、Wi-Fi イメージング結果に特有のパターンを生じさせ、対象を識別することが可能と考えている。

そこで本稿では、1 次元アンテナアレイを用いて Wi-Fi イメージングを実装し、実機実験により基礎評価を行った。さらに、その結果に基づき、イメージング結果から金属の配置を識別するためのタグ検出アルゴリズムを設計した。提案アルゴリズムでは、まず送信アンテナの位置が既知であることを利用して、イメージング結果に含まれる送信アンテナからの直接波の影響を除去する。さらに、周囲に存在する家具などの静的な反射物体の影響を除去するためにタグが存在しない場合に取得しておいたイメージング結果との差分を取る。その後、閾値を超えるピークを検出することで、タグを検出する。

実機を用いた基礎評価の結果より、1 波長  $\times$  1 波長以上の反射面がある場合、タグの認識が可能であることが明らかとなった。さらに、反射物体が複数ある場合、アンテナと物体の位置関係によっては、物体間に波長の 2 倍程度の距離がないと複数の物体を分離できないことがわかった。さらに、電磁界シミュレーションを用いて実機実験との比較を行った結果、壁や床による反射の影響を考慮したタグ検出アルゴリズムの設計が必要となることがわかった。

## 2. 関連研究

### 2.1 電波を利用したセンシング

電波を利用したセンシングには人の行動認識、人や物の位置推定などの用途がある。例えば、Wi-Fi の CSI を利用した手法では、サブキャリアごとの位相および振幅に基づき、様々な行動を認識できることが報告されている [4], [7]。また、RFID を利用したセンシングも近年では盛んに研究が行われている。RFID タグはリーダからの電波により給電され、電波を反射することで通信を行うことにより、ID などのデータをリーダに送信する。このため、電池交換に伴うメンテナンスの手間がかからないというワイヤレスセンシングの利点は保持したまま、電波を反射しているタグ

の識別が実現できるという点で、Wi-Fi によるワイヤレスセンシングと比べて姿勢や心拍などのより詳細な動きの認識が可能である [8]。Wi-Fi を用いたワイヤレスセンシングでは新たな設備の導入が不要というメリットがあるが、複数の人による影響を分離できないという課題がある。一方で、RFID を用いたワイヤレスセンシングでは、複数の人による影響を分離できるが、センシングのために新たな設備を導入する必要がある、導入コストの面で課題がある。

本研究においては、広く普及し、既存の設備でデータ取得が可能な Wi-Fi を使用する。

### 2.2 物体識別

空間情報を処理することができる物体識別はセキュリティや材料識別、位置推定など様々な用途に応用されている。物体識別には RFID タグを用いて物体ごとに ID 付けを行うアプローチや空間情報をキャプチャすることで物体を識別する空間イメージングのアプローチが存在する。空間イメージングには、カメラ [9] や RF 信号 [10], [11] など様々なアプローチが採用されている。

RF 信号は暗い環境でも機能する点、非金属材料を貫通できる利点がある。そして RF 信号の中でも、既存の設備を利用してデータ取得が可能な Wi-Fi 空間イメージングの研究が行われている [6], [12]。RF 信号を用いた空間イメージングでは、物質ごとに電波の反射の仕方が異なる性質を利用している。受信アンテナに対する到来方向ごとの電波強度を観測することで方向ごとの物体の情報といった空間情報を取得する。

本研究では、金属物体の数や形などの配置パターンを変えることによりタグを作成、識別することを目的とする。

## 3. Wi-Fi イメージング手法

### 3.1 概要

Wislon では、受信アンテナに到来する電波の強度を方位角・仰角ごとの方向別に算出する。受信信号には直接波や金属物体の反射波など様々な角度からの信号が含まれている。これらを方向別に分離するため、受信アンテナを複数用いることで生じる位相差を利用する。なお、Wislon では受信アンテナを 2 次元平面上に配置することで方位角および仰角ごとの信号強度の算出を行っているが、簡単のため本研究ではアンテナを一直線上に配置し、方位角のみについて考える。

### 3.2 イメージングアルゴリズム

今、方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  から受信アンテナに到達する信号  $S(\psi, \alpha)$  を考える。図 2 に示すように x-y 平面上のアンテナアレイを考える。アンテナ  $A_{00}$  を位置の基準（原点）とし、隣り合うアンテナは距離  $d$  だけ離れている。x 軸と y 軸に平行な方向にそれぞれ  $N$  本と  $M$  本のアンテナがある

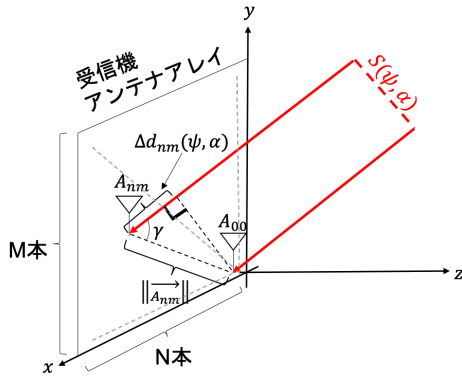


図 2 2次元アンテナアレイ

とする。

以上のようなアンテナアレイがあるとき、方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  から到来する電波に着目すると、アンテナ  $A_{00}$  と  $A_{nm}$  の間の位相差は、電波の伝搬経路の差から求めることができる。

まず、波長  $\lambda$  の波が距離  $\Delta d$  を伝わる時に生じる位相差は  $e^{j\frac{2\pi\Delta d}{\lambda}}$  で表せる。したがって、図 2 に示すように信号  $S(\psi, \alpha)$  がアンテナ  $A_{00}$  と  $A_{nm}$  に到達するまでの距離の差を  $\Delta d_{nm}(\psi, \alpha)$  とすると、 $A_{00}$  と  $A_{nm}$  の位相差は式 (1) で表せる。

$$e^{j\frac{2\pi\Delta d_{nm}(\psi, \alpha)}{\lambda}} \quad (1)$$

また、図 2 より三角関数を用いて以下の式が得られる。

$$\Delta d_{nm}(\psi, \alpha) = \|\vec{A_{nm}}\| \cos(\gamma) \quad (2)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{S(\psi, \alpha)} \cdot \vec{A_{nm}}}{\|\vec{S(\psi, \alpha)}\| \|\vec{A_{nm}}\|} \quad (3)$$

ここで、 $\vec{A_{nm}}$  は原点からアンテナ  $A_{nm}$  へのベクトル、 $\vec{S(\psi, \alpha)}$  は方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  からアンテナアレイ平面に到来する信号のベクトル、演算子  $(\cdot)$  はベクトルの内積を表している。アンテナ  $A_{nm}$  は座標  $(nd, md, 0)$  にあるので  $\vec{A_{nm}}$  は次のように表せる。

$$\vec{A_{nm}} = [nd, md, 0]^T \quad (4)$$

同様に、信号  $S(\psi, \alpha)$  はアンテナアレイ平面に対して方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  の方向から到来するため、信号  $S(\psi, \alpha)$  に対応する単位ベクトルは次のように表せる。

$$\frac{\vec{S(\psi, \alpha)}}{\|\vec{S(\psi, \alpha)}\|} = [\cos \alpha \cos \psi, \sin \alpha, \cos \alpha \sin \psi]^T \quad (5)$$

以上の式より、式 (1) のアンテナ  $A_{00}A_{nm}$  間の位相差は以下のように書き換えられる。

$$e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(nd \cos \alpha \cos \psi + md \sin \alpha)} \quad (6)$$

ここで、方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  から到来する信号の基底関数を次の行列で定義できる。基底関数は座標  $(nd, md, 0)$  にあるアンテナ  $A_{nm}$  と基準アンテナ  $A_{00}$  との位相差を表す。

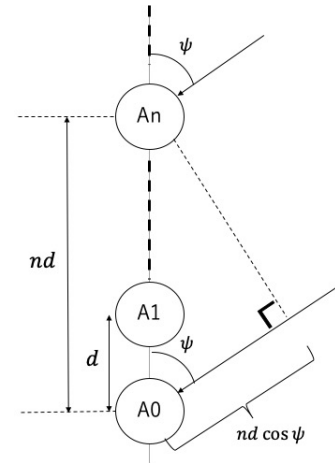


図 3 1次元アンテナアレイ

$$B_{\psi, \alpha} = [e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(nd \cos \alpha \cos \psi + md \sin \alpha)}]_{n, m} \quad (7)$$

式 (7) より、方位角と仰角によって基底関数に変化することが分かる。これは、信号の到来方向ごとに受信アンテナ間の位相差が異なることを示しており、これを利用して到来方向ごとの信号強度を算出することができる。具体的には、方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  から到来する信号強度は次の式で得られる。

$$I(\psi, \alpha) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} x(n, m) B_{\psi, \alpha}(n, m) \\ = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} x(n, m) e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}(n(\cos \alpha \cos \psi) + m(\sin \alpha))} \quad (8)$$

ここで、 $x(n, m)$  はアンテナ  $A_{nm}$  で受信した信号の複素表現であり、 $B_{\psi, \alpha}$  は方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  に対応する基底関数である。式 (8) では基底関数で表される位相差に応じて各アンテナの受信信号の位相を調整することで、受信信号を到来方向  $\psi, \alpha$  のみに対応する信号に分離した後に、合成している。最終的に、 $I(\psi, \alpha)$  の絶対値を取ることで方位角  $\psi$ 、仰角  $\alpha$  から到来する信号の強度を得ることができる。

### 3.3 1次元アンテナアレイによるイメージング

3.2 節では 2 次元アンテナアレイを用いた場合のイメージングアルゴリズムを述べたが、本研究では簡単のため 1 次元のアンテナアレイを用いる。図 3 に示すように受信アンテナを一直線上に配置した場合、このアンテナアレイに対して到来する信号の仰角が変化しても位相差は生じないため、方位角に対してのみ、方向別の電波強度を算出することができる。方位角  $\psi$  から受信機に到達する信号を  $S(\psi)$  とすると、信号  $S(\psi)$  がアンテナ  $A_0$  と  $A_n$  に到達するまでの距離の差は  $nd \cos \psi$  であるので、信号  $S(\psi)$  の  $A_0A_n$  間の位相差は次の式で表せる。

$$e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(nd \cos \psi)} \quad (9)$$

以上より、2 次元の場合と同様に考えて方位角  $\psi$  から到

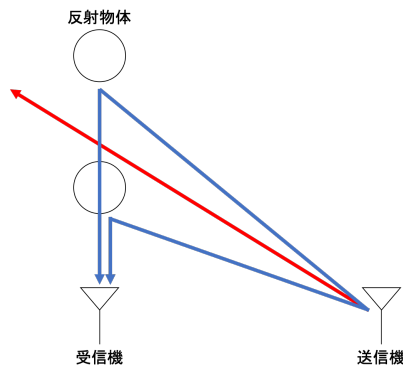


図 4 ビームフォーミングによる距離の推定

来る信号強度は次の式で得られる。

$$I(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) B_{\psi}(n) \\ = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (nd \cos \psi)} \quad (10)$$

ここで、 $x(n)$  はアンテナ  $A_n$  で受信した信号の複素表現であり、 $B_{\psi}$  は方位角  $\psi$  に対応する基底関数行列である。よって、 $I(\psi)$  の絶対値を取ることで到来する方位角ごとの信号強度を得ることができる。

### 3.4 深度ごとのイメージング

上記のアルゴリズムでは方位角および仰角に対応する強度値は算出可能だが、受信機と反射物体間の距離の推定や、同一方向にある複数の物体の区別はできない。この問題に対して、送信機で角度を変化させながらビームフォーミングを行うことで、電波照射方向に存在する物体のイメージングを行うことができる。すなわち、受信アンテナアレイからの深度（距離）ごとにイメージングを行うことができる。これによって、電波照射方向を変化させて空間を走査し、異なる深度（距離）にある同一方向の複数物体を認識するとともに、それらの深度も推定することが可能となる。

例えば図 4 に示される青い線のように、送信機からの信号が反射物体に向いている場合は受信機で強い反射波を観測できるが、赤い線のように物体に向いていないときは強い反射波は観測されない。このようにして、深度を変えたイメージングを実現できる。

## 4. タグ検出アルゴリズム

### 4.1 事前実験

送信アンテナを受信アンテナアレイから約  $50^\circ$  の方向に配置し、3 章のイメージング手法を用いて算出した結果を図 5 に示す。横軸が到来方向、縦軸が方向ごとに算出した信号強度を示している。結果から、他の角度に対して  $50^\circ$  方向の強度が非常に大きく検出されており、正しく強度の算出ができていないことが確認できた。

しかし、図 5 のように送信アンテナ方向以外にも小さな

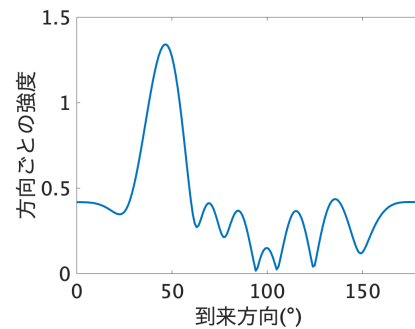


図 5 イメージングの例

複数のピークが確認できる。これは、式 (10) 内の余弦の周期性の影響により発生するものである。これらは送信波の電波強度が強いために起こることから、金属タグ（以降、タグ）を検出する際にはこれら直接波の影響を除去する必要がある。また、現実環境では家具などの電波に影響を与える物体が既に存在しているため、これらの影響を除外することも必要となる。さらに、人体や金属製のモノといった元々電波に影響を与える物体に対して、さらにタグを付与した場合に、元の物体の影響を除外しつつ、付与したタグの影響だけを抽出する方法も設計する必要がある。以降では、これらの課題の基礎検討として、送信アンテナからの直接波の影響を除去する方法を考案し、それに基づくタグ検出アルゴリズムを設計する。

### 4.2 送信アンテナからの直接波の除去

送信アンテナからの直接波の影響は、送信アンテナ方向だけでなく余弦の周期性による影響も存在する。そのため、タグの影響がない場合を背景とし、差分を取得することで直接波によるこれらの影響を除去する。背景情報の取得方法は 2 つ考えられる。

1 つ目は、タグがない状況でイメージングを行い、その結果を背景情報として使用する方法（実背景差分法）である。2 つ目は、送信アンテナの方向からの電波を受信した場合の理想的なイメージング結果を事前に計算で求める方法（理想背景差分法）である。送信アンテナの方向がわかっている場合、式 (9) の  $\psi$  にアンテナの方向を代入することで、送信アンテナのみを考慮した場合のアンテナ間の位相差が得られる。したがって、その位相差を式 (10) に代入することにより送信アンテナのみの影響を受けた場合の理想的なイメージング結果を求めることができる。よって、送信アンテナ方向の強度を基準として理想値と実測値で等しくなるよう正規化し、それらの差分を求めることでタグの検出を行うことが可能である。

図 6 にタグがない場合のイメージング結果（実背景）および理想的なイメージング結果（理想背景）を示す。送信アンテナを約  $20^\circ$  の方向に、タグとして銅板を約  $45^\circ$  の方向に配置しており、青線が銅板がある場合、赤線が実背景、



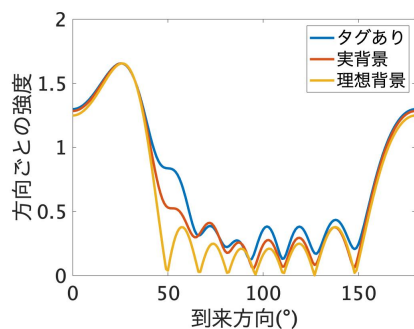


図 6 実背景と理想背景の比較

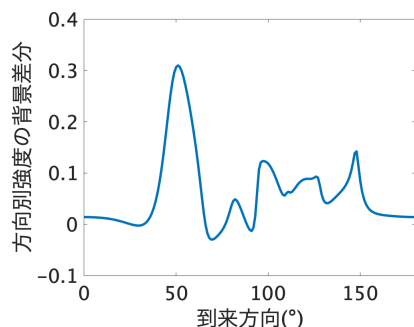


図 7 実背景差分の結果

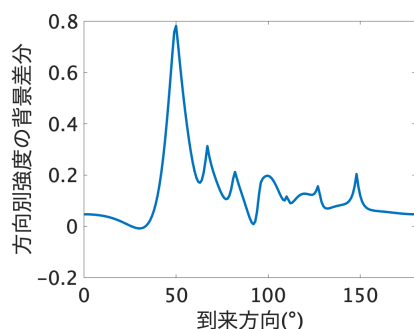


図 8 理想背景差分の結果

黄線が理想背景を示している．これに対して，実測値による背景差分を取った結果を図 7 に示す．また，理想値による背景差分を取った結果を図 8 に示す．

どちらの方法でもタグの方向にピークが表れており，直接波の除去は可能なことがわかる．しかし，背景情報に実測値を用いた場合はピークの値が約 0.3 であるのに対して，理想値を用いた場合は約 0.8 となっており，理想背景差分法がより有効と考えられる．この結果より，以降では理想背景差分法を適用する．

### 4.3 タグの検出

4.2 節で述べた手法により送信アンテナからの直接波の影響を除去した後，閾値を超えるピークを検出することによりタグの検出を行う．反射波は距離が離れば減衰するため，閾値はタグと受信アンテナの距離や位置関係に応じて設定する必要があると考えられる．本研究では閾値は経

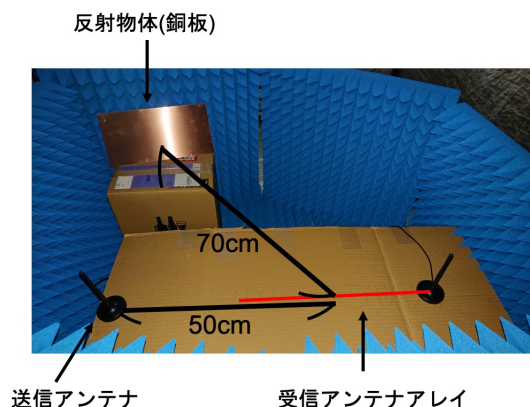


図 9 実験環境

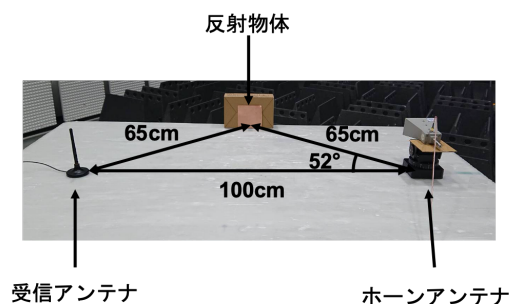


図 10 素材実験環境

験的に決定した値を用いているが，今後，状況に応じた閾値の設定方法もしくは閾値以外での検出方法を考えていく必要がある．

## 5. 実機実験による性能評価

### 5.1 評価環境

物体検出性能を評価するため，図 9 に示す電波シールドテント内で実機実験を行った．シールドテント内の壁は電波を反射する素材であり，壁などの電波反射物体の影響を軽減するため電波吸収材で囲んで実験している．電波の送受信には Ettus Research 社製の USRP X310 を使用し，2.45GHz を中心とした 1kHz の正弦波を送信する．送信アンテナには無指向性のモノポールアンテナを使用する．受信アンテナは同じモノポールアンテナを用いた  $8 \times 1$  のアンテナアレイを使い，隣り合うアンテナ間の距離は半波長（約 6.1cm）とする．なお，今回の実験ではアンテナアレイは 8 本のアンテナを使用する代わりに，1 本のアンテナを半波長ずつ位置をずらして 8 回計測を行った．受信アンテナアレイの中心から反射物体および送信アンテナの距離はそれぞれ 70cm, 50cm とする．物体検出の実験ではこの距離は固定とし，アンテナアレイに対する反射物体および送信アンテナの角度を変えて実験を行う．

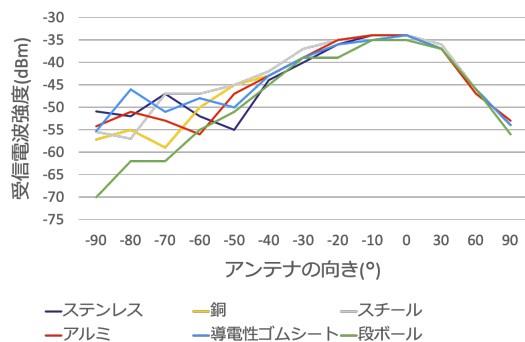


図 11 反射物体の素材による受信電波強度の違い

## 5.2 評価結果

### 5.2.1 素材の影響

タグ検出性能の評価を行う前に反射物体として使用する素材の検討を行う。導電性素材 5 種類（ステンレス，銅，スチール，アルミ，導電性ゴムシート）と非導電性素材 1 種類（ダンボール）を用いて反射波の強度の違いを調べる。実験環境を図 10 に示す。ここでは反射による影響を調べるため，送信アンテナに指向性を持つホーンアンテナを用いて電波を送信する向きを変え，受信電波強度が素材によってどのくらい変化するかを調べる。ホーンアンテナの向きは受信アンテナの方向を  $0^\circ$  とし，左回りを正として  $-90^\circ$  から  $0^\circ$  までの範囲は  $10^\circ$  ごとに， $0^\circ$  から  $90^\circ$  の範囲は  $30^\circ$  ごとに送信方向を変化させて受信電波強度の測定を行った。

結果を図 11 に示す。アンテナの向きが  $-40^\circ$  から  $90^\circ$  であるときの受信電波強度に素材による違いがほぼ見られないのは，ホーンアンテナからの直接波が受信アンテナに到達しているためだと考えられる。したがって，物体による反射の影響は，アンテナの向きが  $-90^\circ$  から  $-50^\circ$  のときに確認できる。図 11 より，非導電性物質であるダンボールだけ強度が弱いことが確認できるが，他の 5 つの導電性物質に関しては素材による明確な違いは見られなかった。したがって，導電性物質であれば素材による反射波への大きな違いはないため，以降の実験では反射物体に銅板を使用する。

### 5.2.2 物体の大きさと検出性能

まず，検出可能な物体の大きさを評価するため，送受信アンテナおよび物体の位置を固定し，銅板の大きさを変えて実験を行う。送信アンテナを受信アンテナアレイから約  $20^\circ$  の方向，銅板を約  $45^\circ$  の方向に配置している。これらの位置関係を図 12 に示す。まず銅板の高さを 15cm に固定し，幅を 5 段階（30cm，22.5cm，15cm，7.5cm，3.75cm）に変えて銅板の検出を行った。

背景差分を取った結果を図 13 に示す。赤線は閾値 0.5 を示している。また，閾値を超える値がある場合のピークの値とそのときの方向を表 1 に示す。なお，表中の「-」は閾値を超える値がないことを示している。以上の結果より，

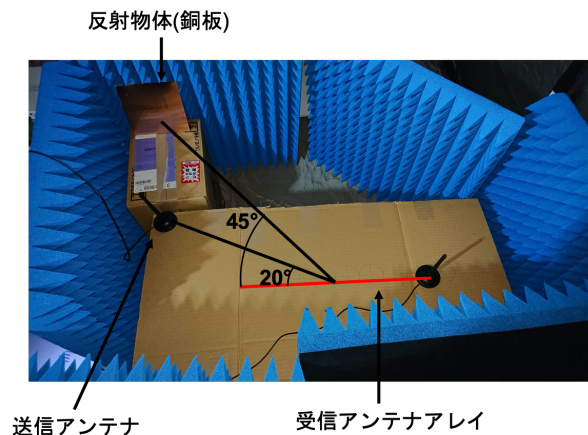


図 12 送受信アンテナおよび銅板の位置関係

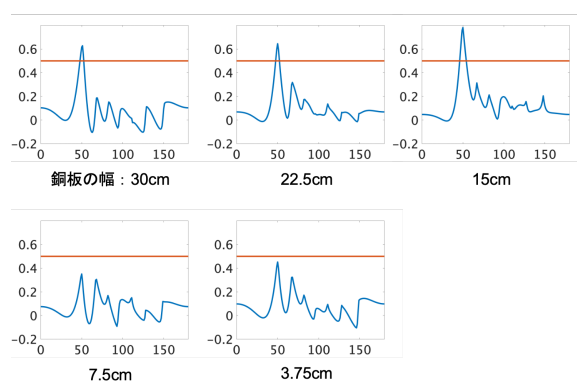


図 13 銅板の幅変化時の物体検出結果

表 1 銅板の幅変化時のピーク値

銅板の幅 (cm)	30	22.5	15	7.5	3.75
閾値 (0.5) を超えるピーク値	0.6281	0.6452	0.7821	-	-
ピーク値をとる方向	$51^\circ$	$50^\circ$	$50^\circ$	-	-

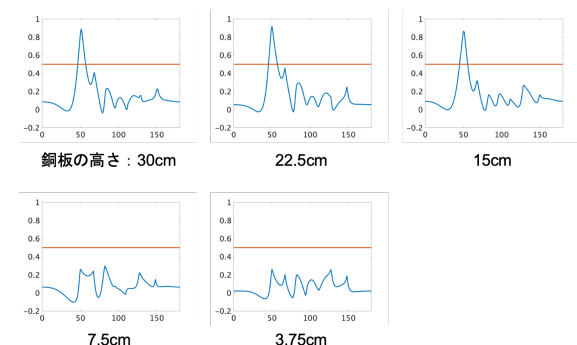


図 14 銅板の高さ変化時の物体検出結果

銅板の幅が 15cm 以上のとき， $45^\circ$  付近で閾値を超えるピークが存在していることがわかる。

また，同様に幅を 15cm に固定して高さを 5 段階（30cm，22.5cm，15cm，7.5cm，3.75cm）に変えた場合の結果を図 14 と表 2 に示す。これらの結果より，高さを変えた場合

表 2 銅板の高さ変化時のピーク値

銅板の高さ (cm)	30	22.5	15	7.5	3.75
閾値 (0.5) を 超えるピーク値	0.8906	0.9187	0.8648	-	-
ピーク値をとる方向	51°	50°	50°	-	-

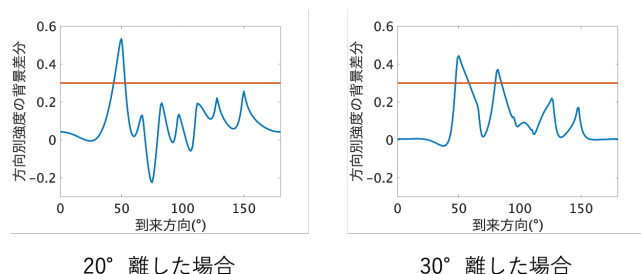


図 15 複数物体の分離

も同様に 15cm 以上であれば検出が可能であることがわかる。文献 [6] では波長より大きな物体であればイメージング可能なことが報告されており、今回の実験で使用している波長は約 12cm であることから、1 波長  $\times$  1 波長以上の反射面を持つ物体であれば認識が可能であると考えられる。

### 5.2.3 複数物体の分離性能

複数物体の分離性能を調べるため、銅板 2 枚をアンテナアレイから異なる方向に配置し、実験を行った。銅板 2 枚を 20° 離した場合と 30° 離した場合に対して、理想背景差分法を適用した結果を図 15 に示す。30° 離した場合はピークが 2 つ確認できるが、20° 離した場合は 1 つしか見られない。この結果より、銅板間の距離が近いと複数物体の分離ができないことがわかる。これは、物体間の距離が近い場合、反射波が合成されて 1 つの物体に見えてしまうからだと考えられる。物体間に波長の 2 倍程度の十分な距離があれば反射波は弱まるため、反射波の合成による影響は軽減される。なお、物体を分離するために必要な条件は、アンテナアレイからの方向および距離、物体の反射面の向きなどに依存すると考えられるため、さらなる調査が必要である。

## 6. シミュレーションによる性能評価

### 6.1 評価環境

5 節の実機実験での評価とシミュレーションによる評価の比較を行う。シミュレーションにはキーサイト・テクノロジー社製の電磁界シミュレータ EMPro2020 を使用する。送信アンテナには実機実験と同じく無指向性のモノポールアンテナを使用し、2.45GHz の正弦波を送信する。シミュレーションでは、受信アンテナの代わりに受信アンテナ位置の電界強度をそのまま用いてイメージングを行う。このため、電界強度の絶対値をそのまま実機実験の結果と比較することはできない。従って、本節の評価では、受信アン

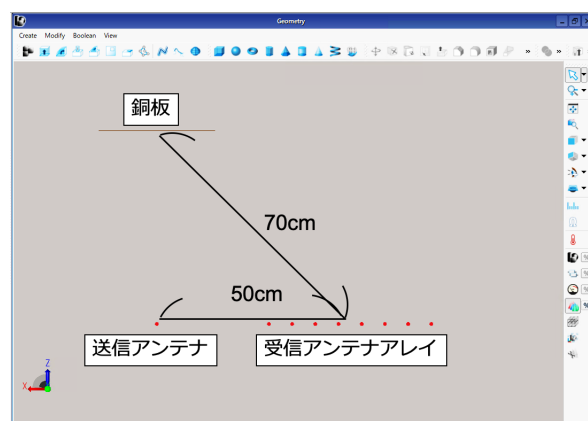


図 16 シミュレーション時の位置関係

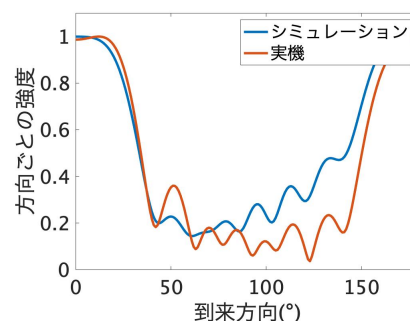


図 17 送信アンテナを 0° 方向に配置した場合

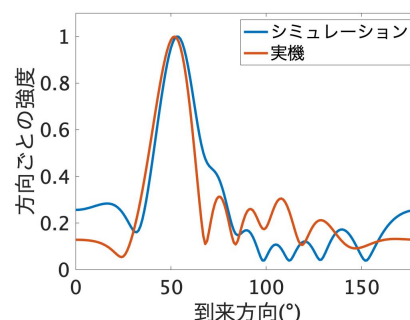


図 18 送信アンテナを 50° 方向に配置した場合

テナアレイに相当する位置での相対的な電界強度を比較する。このため、シミュレーションと実機の比較において、イメージング結果の電界強度または受信電力を正規化する。図 16 に示すように受信アンテナアレイの中心から反射物体および送信アンテナの距離は実機実験と同じくそれぞれ 70cm, 50cm とする。

### 6.2 送信アンテナ方向の推定

まず、反射物体を置かずに送受信アンテナのみを配置し、送信アンテナの方向を推定できることを確認する。送信アンテナが受信アンテナアレイに対して 0° 及び 50° の方向に配置した場合のシミュレーション及び実機実験での結果をそれぞれ図 17, 18 に示す。

シミュレーション、実機実験のどちらでも同じように送



表 3 送信アンテナの方向を変えたときの検出結果

送信アンテナの方向 (°)	0	25	50	75	100	150
ピーク値をとる方向 (°)	0	30	54	73	99	133

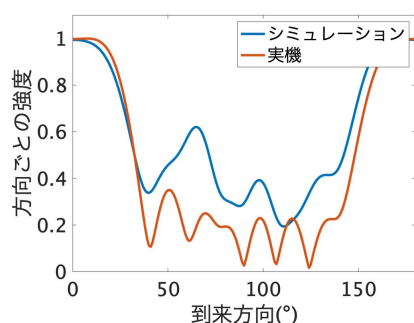


図 19 シミュレーションと実機実験の比較

信アンテナの方向にピークが出ているため、電波の到来方向を推定できていることがわかる。

さらに送信アンテナの方向を変えてシミュレーションを行い、ピーク値をとる方向を調査した。結果を表 3 に示す。これより、到来方向の推定には  $10^\circ$  前後の誤差が出ることがわかる。

### 6.3 物体検出

続いて、物体検出についてシミュレーションと実機実験の比較を行う。送信アンテナを  $0^\circ$  の方向、銅板を約  $45^\circ$  の方向に置いた際のシミュレーション及び実機実験の結果を図 19 に示す。シミュレーションでの銅板の大きさは実機実験と同じく幅 30cm、高さ 15cm としている。

実機実験に比べてシミュレーションでは銅板による反射が強く表れていることがわかる。実機実験では電波吸収材を使ってシールドテントの壁等による反射を少なくしているが床や天井からの反射を完全に防げるわけではない。したがって、受信電波はそれら反射波の合成波となるため実機実験では銅板による反射の影響が小さくなってしまっていると考えられる。このため、今後実環境に応用していくにはタグ以外からの反射の影響も考慮した検出アルゴリズムの設計が必要となる。

## 7. おわりに

本研究では、Wi-Fi 電波を用いた対象識別のための金属配置パターンの検討を行った。まず、金属物体の認識を行うために Wision と呼ばれる Wi-Fi イメージング手法の再現を行い、実機実験およびシミュレーションによりイメージング性能の評価を行った。反射物体として銅板の幅および高さを変えて実験を行った結果、反射面が 1 波長  $\times$  1 波長以上の大きさであれば、イメージング結果に影響が現れることを確認した。また、反射物体を複数使った実験から、複数の物体を分離するためには物体間に波長の 2 倍程度の

十分な距離が必要であることを確認した。

今後の課題として、受信アンテナを 2 次元に配置し、送信時にビームフォーミングを行うことによる仰角および深度も考慮したイメージングの実現が挙げられる。また、人やモノの影響を考慮した検出アルゴリズムの設計も検討する必要がある。今回は評価の際に対象とするタグ以外の物は置かずに実験を行ったが、実環境に応用するためにはタグ以外の人やモノからの反射の影響も考慮しなければならない。静的な状況であればタグがない状態でイメージングを行い、その結果との差分を取ることで対応できると考えられる。一方、人の動きやそれに伴うモノの動きがある場合はこの方法は使用できないため、人とタグとの反射特性の違いなどからタグの検出を行う必要があると考えている。

## 参考文献

- [1] Sadanand, S. and Corso, J. J.: Action bank: A high-level representation of activity in video, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1234–1241 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2012.6247806 (2012).
- [2] Wang, L., Lu, J., Wu, Z., Tao, X. and Gu, T.: A Pattern Mining Approach to Sensor-Based Human Activity Recognition, *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*, Vol. 23, No. 09, pp. 1359–1372 (online), DOI: 10.1109/TKDE.2010.184 (2011).
- [3] Krishnan, N. C. and Cook, D. J.: Activity recognition on streaming sensor data, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 10, pp. 138 – 154 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2012.07.003> (2014).
- [4] Zeng, Y., Pathak, P. H. and Mohapatra, P.: WiWho: WiFi-Based Person Identification in Smart Spaces, *Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 1–12 (online), DOI: 10.1109/IPSNS.2016.7460727 (2016).
- [5] Wang, C., Liu, J., Chen, Y., Xie, L., Liu, H. and Lu, S.: RF-Kinect: A Wearable RFID-based Approach Towards 3D Body Movement Tracking, *ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 2, pp. 1–28 (online), DOI: 10.1145/3191773 (2018).
- [6] Huang, D., Nandakumar, R. and Gollakota, S.: Feasibility and Limits of Wi-Fi Imaging, *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys)*, pp. 266–279 (2014).
- [7] Pu, Q., Gupta, S., Gollakota, S. and Patel, S.: Whole-Home Gesture Recognition Using Wireless Signals, *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking*, p. 27–38 (online), DOI: 10.1145/2500423.2500436 (2013).
- [8] 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, *Proceedings of the ACM Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 2, No. 2, pp. 1–26 (2018).
- [9] Socher, R., Huval, B., Bhat, B., Manning, C. D. and Ng, A. Y.: Convolutional-Recursive Deep Learning for 3D Object Classification, *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Vol. 1 (2012).



- [10] Zhu, F., Gao, S., Ho, A., Brown, T., Li, J. and Xu, J.-D.: Low-Profile Directional Ultra-Wideband Antenna for See-Through-Wall Imaging Applications, *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 121, pp. 121–139 (online), DOI: 10.2528/PIER11080907 (2011).
- [11] Ralston, T. S., Charvat, G. L. and Peabody, J. E.: Real-Time Through-Wall Imaging Using an Ultrawideband Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Phased Array Radar System, *Proceedings of IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, pp. 551–558 (online), DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613314 (2010).
- [12] Wu, K.: Wi-Metal: Detecting Metal by Using Wireless Networks, *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/ICC.2016.7511472 (2016).