

平成 28 年度 卒業論文

人体による電磁波遮蔽効果を用いた 屋内位置推定手法

平成 29 年 1 月提出

千葉大学工学部都市環境システム学科

13T0237C 坪谷 大輝

指導教員：塩田 茂雄

第1章	序論	2
1.1	研究背景	2
1.2	研究目的	4
1.3	論文構成	4
第2章	位置推定手法	5
2.1	前提	5
2.2	既存研究	5
2.3	本研究	7
第3章	シミュレーション実験	12
3.1	レイトレーシング法シミュレーション	12
3.1.1	幾何光学に基づく伝搬経路の推定	12
3.1.2	高速化手法	16
3.2	シミュレーション条件	20
第4章	シミュレーション結果	22
4.1	差と比の比較	22
4.2	1人の場合	25
4.2.1	人数の推定	25
4.2.2	位置の推定	29
4.3	複数人の場合	35
4.3.1	人数の推定	35
4.3.2	位置の推定	40
第5章	結論	44
	参考文献	45
	謝辞	46

第1章 序論

1.1 研究背景

現在、人物の位置情報は多くのサービスで利用され、人々の生活に欠かせない情報となっている。それにともない、人物の位置推定を行う技術も多く開発されている。現在、位置情報を取得するための最も一般的な方法は、GPS (Global Positioning System) に代表されるNSS (Navigation Satellite System: 衛星航法システム) である。NSSは特に屋外での位置推定で広く用いられている。NSSの衛星が発する信号には、信号を発した時刻とその時点での衛星の位置の情報が含まれている。利用者は、信号が発信されてから受信するまでにかかった時間をもとに衛星までの距離を計算し、位置を推定することができる。一般的なNSSでの位置推定は三次元の座標と正確な時刻の4つの未知数を計算する必要があるため、地上から見渡せる範囲内に4機以上の衛星が必要である。全地球での位置推定を可能とするGNSS (Global NSS) は合計で少なくとも20機程度の衛星が必要であり、現在実用化されているのはアメリカのGPS、ロシアのGLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) である。また日本は、GPSと互換性を持ち、日本をはじめとするアジア・オセアニア地域での機能向上を目的とする準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)の整備を進めている。QZSSは「みちびき」の愛称で呼ばれ、現在の衛星1機での整備段階から2018年度に4機体制での実用開始、2023年度をめどに7機体制となる[1]。これらNSSの整備には膨大な費用が必要であり、いずれも国家レベルでの取り組みが必要である。

屋内では、無線LANアクセスポイント(AP)の発信する電波を用いる手法が実用化されている。スマートフォンなどの受信端末で3か所以上のAPからの電波が受信できる場合、それらの電波強度から各APまでの距離が推定でき、三点測位によってユーザーの位置を推定できる。APは既設の一般的なものが利用でき、導入コストが少なく済む。ただし、APを識別するためのデータベース構築が必要で、このデータベースにはAPのMACアドレスや、SSID、設置場所といったプライバシー性の高い情報が含まれるため、管理には十分な注意が必要である。また日本では、JAXA(宇宙航空研究開発機構)と民間企業が共同でIMES(Indoor MESSaging System)を開発している。IMESはGPS、QZSSと同等の信号を屋内の送信機から提供する位置推定手法である。送信機は自身の設置場所を発信するため、受信範囲内では同一の位置とみなされる。ユ

ユーザーは既存の GPS 対応受信端末を用いることができるが、送信機の設置には JAXA への登録が必要となりハードルが高い。IMES は現在、実用化に向けた実証実験を行っている段階である[2]。

これらの位置推定手法は、いずれも位置推定対象者が対応した信号を受信する端末を持っていることが前提である。しかし、特に屋内において、高齢者を遠隔地から見守る介護面や、店舗内の動線把握に活用するマーケティング面、外部からの侵入者を検知するセキュリティ面で、対象者が端末を持つ必要のない DFL (Device-free Localization) の必要性は高い[3]。DFL の一例として防犯カメラを用いる手法がある。カメラの設置と電源の確保のみで導入が可能であるが、カメラの画角や壁、什器によって死角が多くできる、暗所での撮影ができない、常時画像データを取得するためデータ量が大きくなるといった短所がある。また、カメラによって撮影することは対象者に嫌悪感を抱かせることも考えられる。

屋内での DFL は未だ決定的な手法の開発に至っておらず、位置推定に関する分野でも研究の余地が大きい領域である。

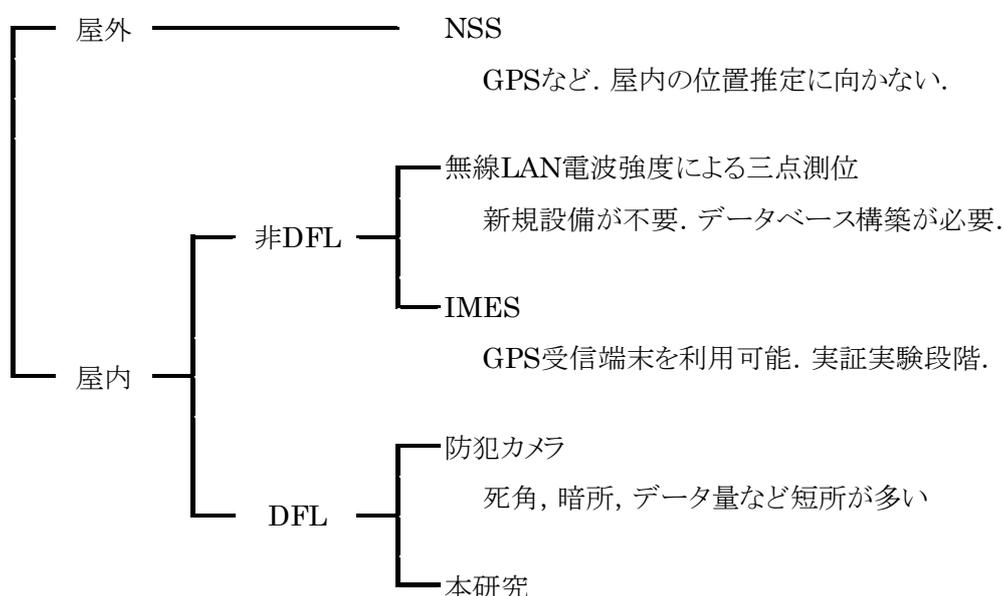


図 1.1 位置推定手法の分類と本研究の位置づけ

1.2 研究目的

人体は電磁波を遮蔽するため、屋内に人物がいる場合といない場合の電磁波強度を各点で比較することで、人物の位置を推定することができる。本研究では、屋内の天井面に設置した無線 LAN AP の発する電波を、床面に格子状で一定の間隔に配置した測定点で受信し、各測定点で受信した電波強度のデータを位置推定に用いる手法を提案する。この手法では、屋内にいる人物の数とそれぞれの位置を正確に推定することを目的とする。また、提案手法をコンピュータ・シミュレーションで再現し、位置推定の正確性を評価する。

1.3 論文構成

第 1 章 序論

本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章 位置推定手法

本研究の位置推定手法と既存研究の手法を説明する。

第 3 章 シミュレーション実験

本研究で用いたシミュレーションとその実験条件を説明する。

第 4 章 シミュレーション結果

シミュレーション実験の結果を述べる。

第 5 章 結論

本研究のまとめを述べる。

第2章 位置推定手法

2.1 前提

無線 LAN AP はインターネットインフラの一部として数多く設置されており、今後もその数は増え続けると考えられる。こうした既存の無線 LAN AP を、本来のデータ通信の用途に限らず利用しようという研究や技術開発が行われている。前述の、AP の発する電波を利用し三点測位によって人物位置の推定を行う技術もその一つである。このほか、人体が反射した電波の波形を解析することで個人の識別を行う手法[4]も研究されている。

本研究でも既存の無線 LAN AP を活用し、位置推定対象者が何らかの端末を持つ必要のない DFL 手法を提案する。屋内の天井面に設置した無線 LAN AP の発する電波を、床面に格子状で一定の間隔に配置した測定点で受信し、各測定点で受信した電波強度のデータを位置推定に用いる。測定点に設置するセンサは、安価で高性能な製品が普及しているため、無線 LAN AP と合わせ低費用で汎用性の高い位置推定手法の構築が可能である。

2.2 既存研究

同様の前提に沿った既存研究[5]を紹介する。本項の手法の説明は、既存研究論文にもとづくものである。

無線 LAN AP から発せられた電波は、人体を通過した際に強度が減衰するから、人体直下での電波強度は、その周囲の床の電波強度よりも小さくなるはずである。このことから、人物がいる場合の電波強度と人物がいない場合の電波強度を比べた際、人体直下の床での電波強度変化は、その周囲の床の電波強度変化よりも大きくなっていると考えられる。つまり、人物が存在することにより、その直下の床に長方形の（電波強度が弱い）影に相当する領域が生じるようになる。このような影の長方形の領域を以下、「人物領域」と呼び、この人物領域を探索することにより人物の位置を推定する。なお、図 2.1 の内部の青色の部分に人物領域を示しており、緑色の部分が人物領域の外周を示している。

屋内空間に人物がいる場合と人物がいない場合の電波強度の差を正負の符号付でと

る。屋内空間のある範囲を図 2.1 の A_1, A_2, A_3, A_4 のように 4 つの長方形の領域に分ける。ここで A_1 に着目する。人物領域の内部に相当する数列 a のすべての点の合計と人物領域の外周に相当する数列 b のすべての点の合計の差の絶対値の平均 S_1 をとる。それを示したのが以下の数式である。

$$S_1 = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n a_{i,1} - \sum_{i=2}^n b_{i,1} \right|$$

同様に S_2, S_3, S_4 を求め、 S_1, S_2, S_3, S_4 のすべてを足した値を E_1 とする。

$$E_1 = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

そしてこの E_1 の値が最大となる領域を人物領域として抽出し、人物領域の中心に位置する測定点である図の赤点の位置 $(\frac{a_n}{2}, \frac{a_m}{2})$ を人物の位置と推定する。

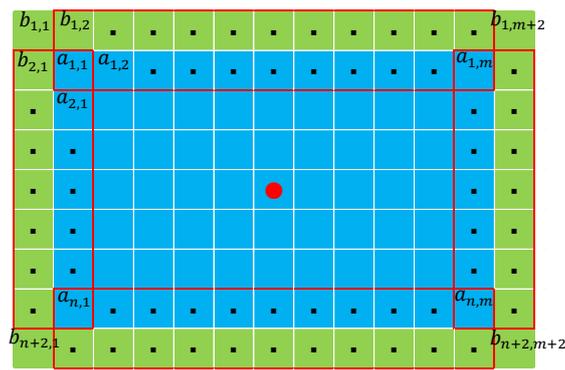


図 2.1 人物領域

既存研究の手法では、屋内空間内の人物の数がわかっていること、人物が複数人いる場合はそのすべてが AP からほぼ等距離にいることが位置推定成功の条件としており、限られた状況でしか位置推定を成功させることができなかった。測定点間隔 5cm, 人数を 1 人～3 人とした場合の既存研究の位置推定成功率を表 2.1 に示す。1 人の場合はすべて成功であったが、複数人になると成功数が半数程度になっている。なお、詳細なシミュレーション条件は 3.2 項で述べる。

表 2.1 既存研究 推定成功率

人数	成功数	失敗数	成功率(%)
1人	11	0	100
2人	3	3	50
3人	1	1	50

2.3 本研究

既存研究は、人物直下の領域はその周囲よりも電波強度の減衰幅が大きいとして、人物位置を推定する手法であった。しかし実際には、太陽光によってできる影が人物直下だけでなくその後方にも伸びるように、人物によって電波が遮蔽される領域も、AP から向かって人物の背面に影のように広がっている。この影の部分も周囲より電波強度の減衰幅が大きいので、誤って人物位置としてしまうことが既存研究において複数人の位置推定が困難であった原因と考えられる。したがって、人物によってできる影全体をとらえることができればこの問題を回避することができる。また、人物とその影は一対一で対応すると考えられるため、影の数と人物の数は等しくなると思われる。以上により、本手法は屋内空間にいる人物の数を推定可能にし、また人物が複数の場合でも人物の配置によらず正確な位置推定を可能とすることを旨とする。

まず、人物によって電波が遮蔽される領域、すなわち人物の影にあたる部分を把握する方法を説明する。無人の状態での電波強度と比較し、閾値を超えて電波強度が減衰している測定点（被遮蔽測定点）に着目する。被遮蔽測定点の周囲 8 箇所別の被遮蔽測定点が存在すれば、それら被遮蔽測定点は「連結されている」と呼ぶこととする。この連結の概念により、被遮蔽測定点はいくつかのクラスタに分類できる。以下では 1 つのクラスタが表わす領域を「影領域」と呼ぶ（図 2.2）。

閾値が変化し、被遮蔽測定点数が一点減少した場合を考える。除外された一点の被遮蔽測定点が単独で影領域をなしていた場合、影領域数は一つ減ることになる（図 2.2 (a)）。複数の被遮蔽測定点から構成される影領域内の一点だった場合、影領域数は変化しない（図 2.2 (b)）か、増加する（図 2.2 (c)）。このように、影領域は電波強度減衰幅の閾値によって抽出された被遮蔽測定点に依存し、影領域の数も変化する。

一般に影領域数は図 2.3 および図 2.4 のように変化する。閾値が最小であればすべての測定点が被遮蔽測定点となるので、影領域は一つ (a) である。閾値を最小から増加させていくと、影領域数は次第に増加 (b) し、最大値 (c) を取ったのち減少 (d) し、いったん極小値 (e) をとったあと再び増加に転じ、極大値 (f) を取った後再び減少に転じて 0 (g) となる。最大値を取ったのち極小値を取るまでの変化は、抽出される測定点が、比較的減衰幅の大きい、人物による真の電波遮蔽領域内の点に絞りこまれるためと考えられる。その後、この真の電波遮蔽領域を表す影領域が、被遮蔽測定点の減少によって分裂することによって、影領域数が極小値から極大値へと変化すると考えられる。このことから本手法では、影領域数が極小値を取るときの影領域を人物の含まれる

領域と仮定し、この場合での影領域数を人物の数とする。

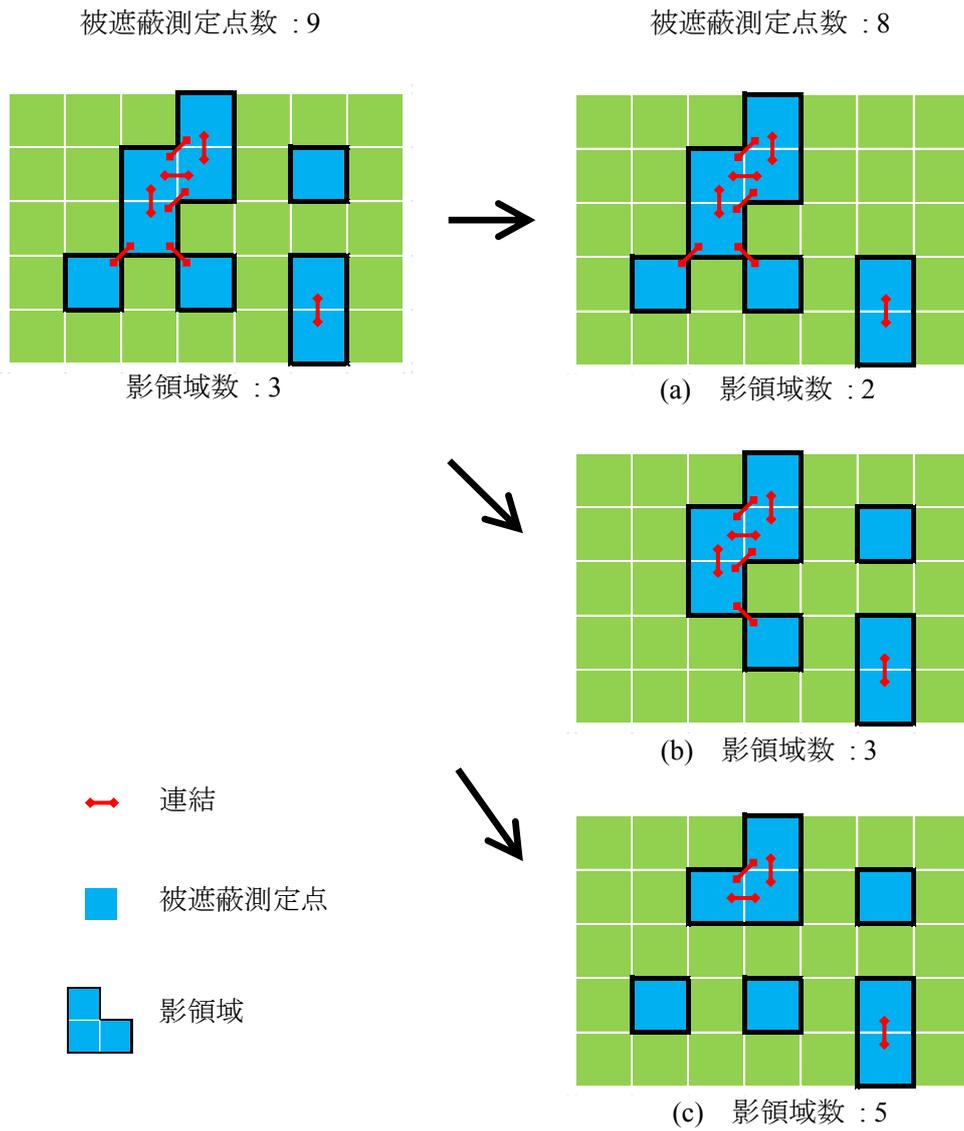


図 2.2 連結と影領域，および影領域数の増減

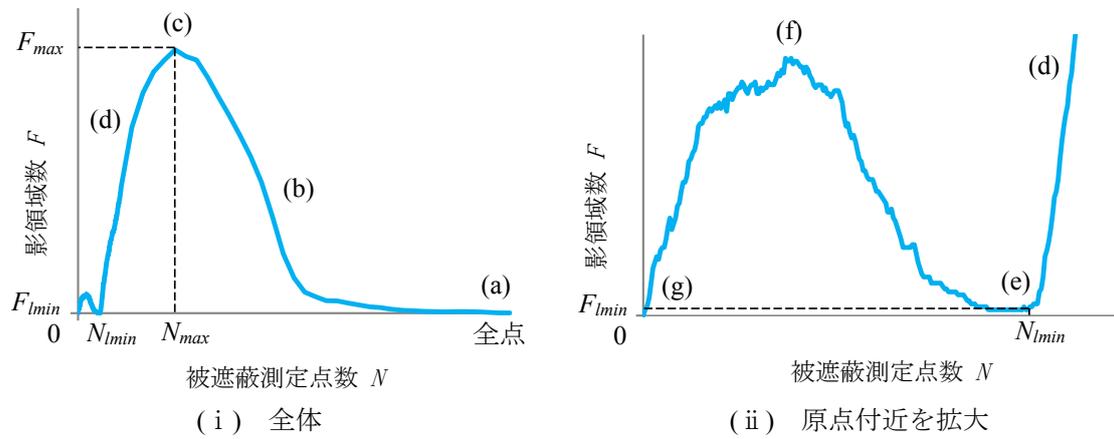


図 2.3 影領域数変化のグラフ

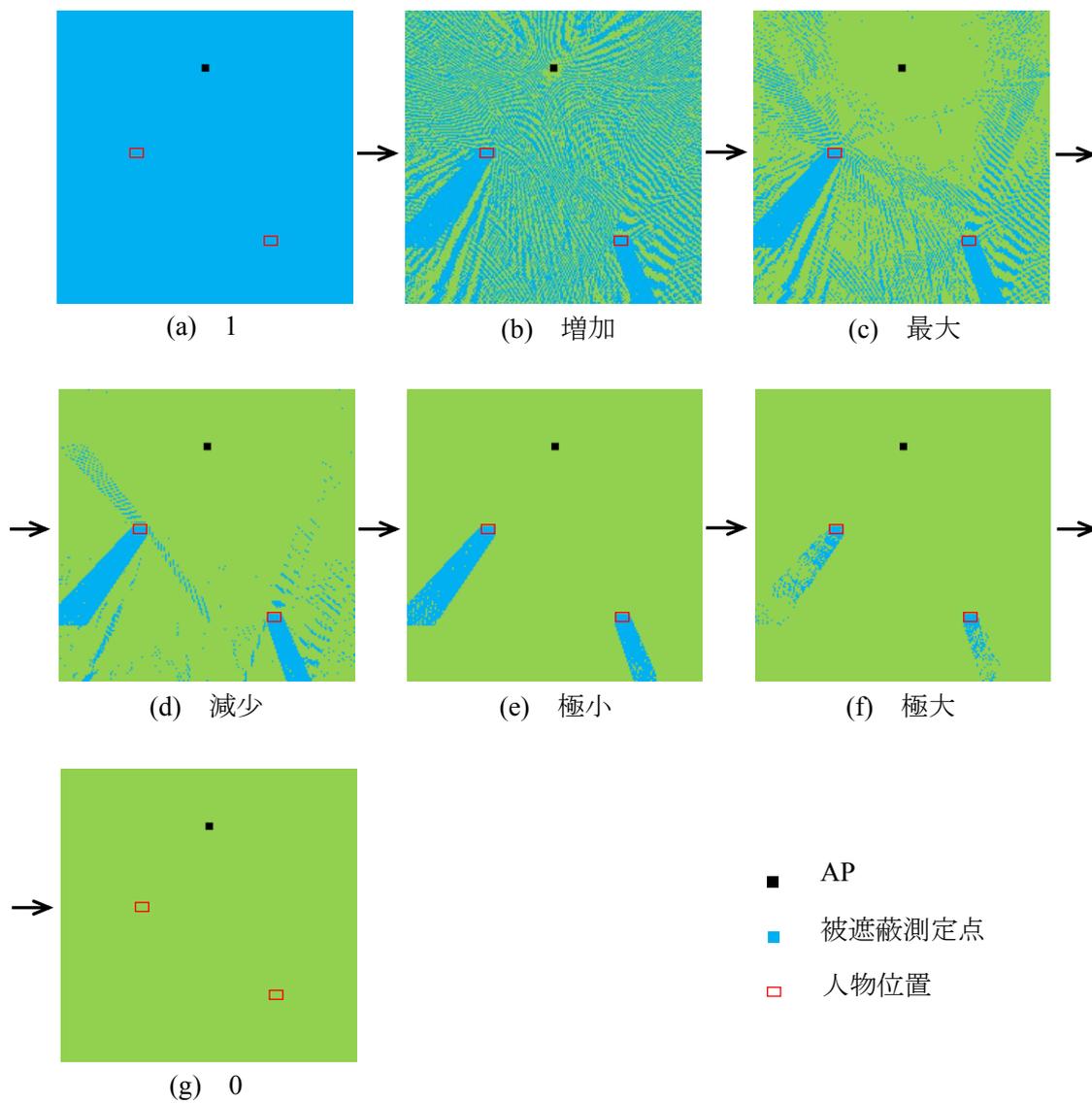


図 2.4 影領域変化の様子

影領域数を F で表し、以上の説明における影領域数の最大値を F_{max} 、極小値を F_{lmin} とする。また被遮蔽測定点数を N で表し、 F_{max} における N を N_{max} 、 F_{lmin} における N を N_{lmin} とする。 F_{lmin} は、 N が以下の範囲内における F の最小の極小値とする。

$$0 < N < N_{max}$$

F_{lmin} が複数の N で存在する場合、 N が最大のものを N_{lmin} とする。また、 F_{max} は N の全区間における F の最大値であり、 F_{max} が複数の N で存在する場合、 N が最小のものを N_{max} とする。

以上の定義により人数の推定を行うが、特に測定点間隔が広く測定点数が少ない場合には影領域数の増減が少なくなるため極小値が存在せず、 F_{lmin} や N_{lmin} を定義できないことがある。このため、以下の条件で F_{lmin} や N_{lmin} を決定する。

条件 A：定義通りの F_{lmin} や N_{lmin} が存在する場合（図 2.5 (a)）

定義通りの F_{lmin} や N_{lmin} を用いる。

条件 B：条件 A に該当する F_{lmin} や N_{lmin} が存在しない場合（図 2.5 (b)）

$0 < N < N_{max}$ の範囲で被遮蔽測定点数 N が変化しても影領域数 F が変化しない場合、すなわち影領域数変化のグラフが平坦となる部分を考える。平坦となる部分のうち、影領域数 F が最も少ないものを F_{lmin} とする。このとき F_{lmin} は必ず複数の N で存在するため、 N が最大のものを N_{lmin} とする。

条件 C：条件 B に該当する F_{lmin} や N_{lmin} が存在しない場合（図 2.5 (c)）

F_{max} 、 N_{max} をそれぞれ F_{lmin} 、 N_{lmin} とする。

本手法で推定する人物の数は F_{lmin} に等しい。また、人物を含む影領域において人物の位置は常に AP に近い側となるため、この影領域のうち AP に最も近い位置を人物の位置とする。

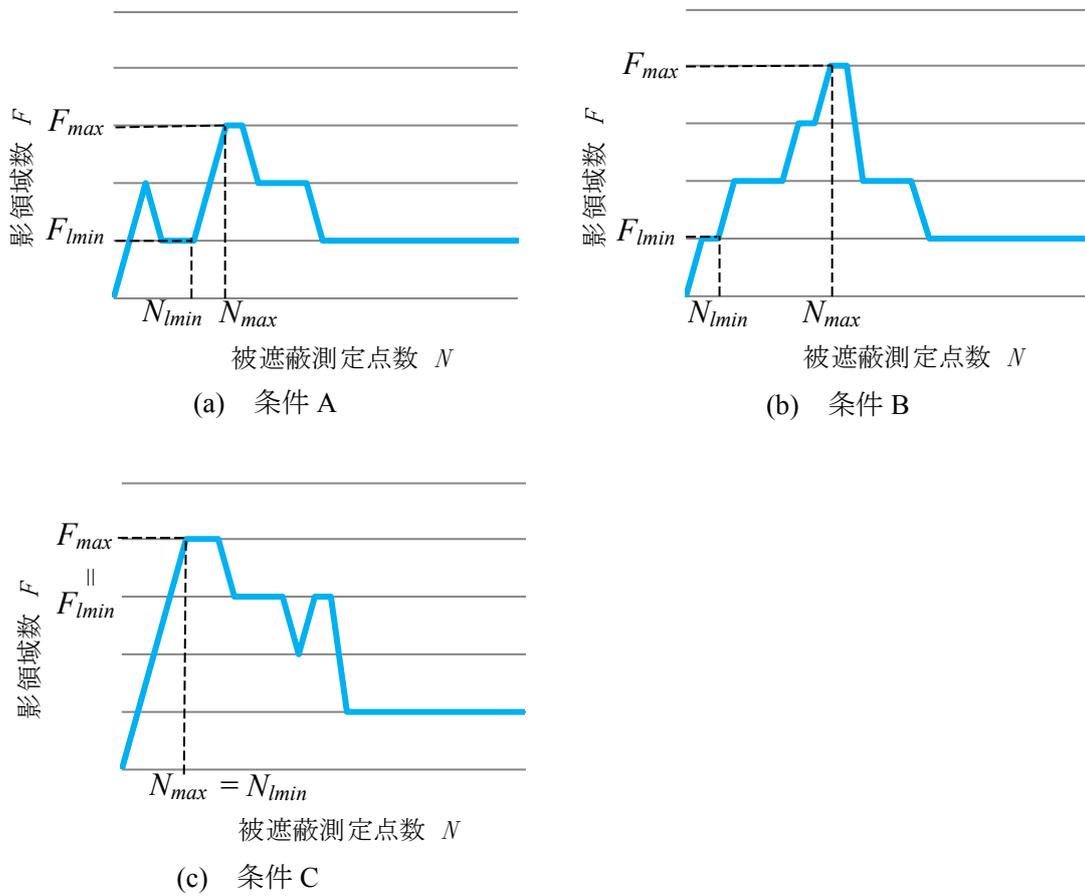


図 2.5 F_{lmin} , N_{lmin} 決定の条件

第3章 シミュレーション実験

3.1 レイトレーシング法シミュレーション

評価対象領域内の測定点の電波強度は、既存研究 2[6]によるレイトレーシング法を用いた手法とそれを再現したシミュレータで算出した。本項では、既存研究 2 の論文内容にもとづきレイトレーシング法シミュレーションについて説明する。

レイトレーシング法は、主に

- ・ 幾何光学に基づく伝搬経路の推定
- ・ 反射・透過などにおける係数の計算
- ・ 全てのレイの合成による受信波の算出

の 3 つの過程により構成されている。以下、幾何光学に基づく伝搬経路の推定を中心に説明する。

3.1.1 幾何光学に基づく伝搬経路の推定

レイトレーシング法は、屋内のような評価する対象の情報を比較的手に入れ易い場合に用いられる電波伝搬特性の解析手法である。図 3.1 のように、送信点から放射された電波をレイとみなし、直接波、反射波、透過波、回折波の相互作用を経て受信点に到達するレイを幾何学的にトレースし、受信点での電波損失等を求める。

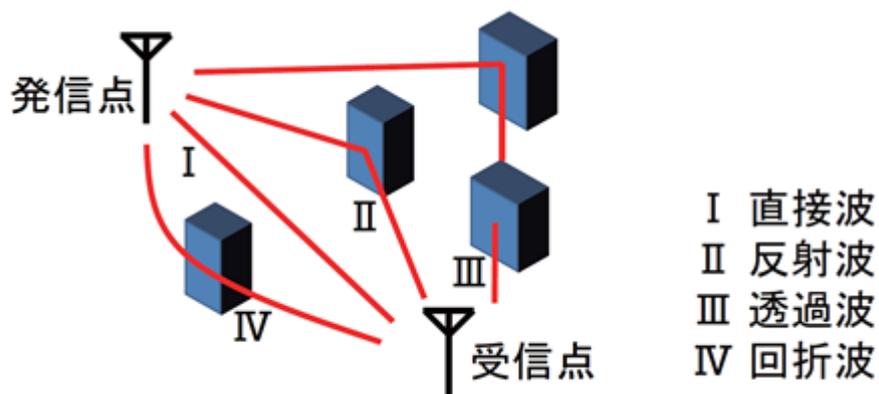


図 3.1 レイトレーシング法

送信点から受信点までの伝搬経路を幾何学的に求める方法として、イメージング法とローンチング法という 2 つの手法が開発されている。ローンチング法は送信点から一定角度ごと離散的にレイを発射させ、その軌跡を逐次追跡して受信点に到達するレイを探索する方法である。離散的な角度でレイを発射させるため受信点の位置にレイが到達しない。このため、受信点周りに一定のエリア ΔS を定義し、その ΔS 内に到達したレイを受信点に到達したレイとみなす方法が一般的である。このため、伝搬距離が長くなるとエリア内に到達するレイが減るため、誤差が大きくなる問題がある(図 3.2)。

また、イメージング法は、送信点、受信点および考慮するすべての反射する構造物、透過する構造物の組み合わせから幾何学的に反射点などを求め、送受信点間の 3 次元的なレイの経路を求める。この方法は、受信点に到達するレイを厳密に求めることができる。しかし、送信点と受信点間の反射点等を決定するためにすべての反射透過の組み合わせに対してレイを探索する必要がある(図 3.3)。

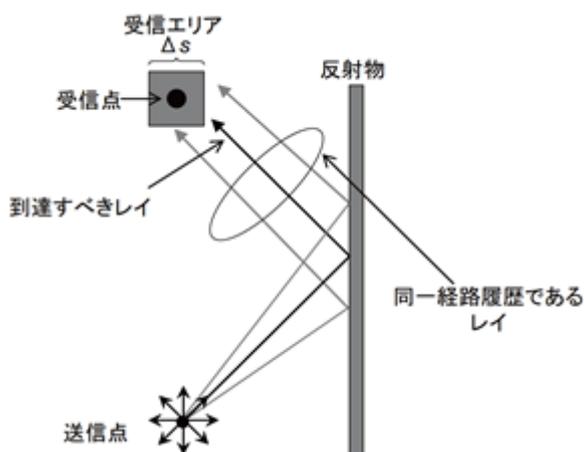


図 3.2 ローンチング法

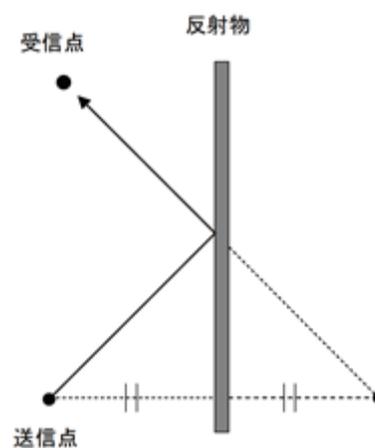


図 3.3 イメージング法

ローンチング法では受信点に到達するレイの数が少なく精度に問題があった。このため、既存研究 2 ではレイの探索方法にイメージング法を用いている。

イメージング法の基本的な手順は、

1. 反射面の順列（反射する面の組み合わせとその順番）を選択
2. 選択した反射面の順列に対応する鏡像点を計算
3. 選択した順列通りに各面で反射し、受信点に至るレイの存在を確認

である。反射面として利用される可能性のある壁面や、什器などの構造物の外面を対象に反射面の順列を全て調べ上げ、それぞれの反射面の順列通りに反射して発信点から受信点に至る経路が存在するか調べ、存在する場合はその経路に沿ったレイの電波強度を計算する。ただし、壁の反射回数と（経路の途中で壁を透過する必要がある場合）壁の透過回数が大きい経路では、受信点に至るまでに電波強度が大きく減衰し、その寄与は小さいことから、通常は反射回数と透過回数の和が一定回数（例えば 6 回程度）以下の経路のみを調べる。

例として、図 3.4 の例の構造物、発信点、受信点の場合を考える。まず、はじめに

- ・ 発信点 → 面 1 に反射 → 面 3 に反射 → 受信点

と、反射面の順列を 1 つ選択する。以下手順ごとに説明する。

- ・ 手順 1：発信点と面 1 の鏡像点 I を計算
- ・ 手順 2：鏡像点 I と面 III の鏡像点 II を計算
- ・ 手順 3：受信点と鏡像点 II を結び交点 I を計算
- ・ 手順 4：受信点と交点 I の間に透過する面が無いかを確認
- ・ 手順 5：交点 I と鏡像点 I を結び交点 II を計算
- ・ 手順 6：交点 I と交点 II の間に面 II が存在し、この面を透過する必要があることを確認、他に透過する面が無いかを確認
- ・ 手順 7：交点 II と発信点を結び、この間に透過する面が無いことを確認
- ・ 手順 8：この反射面の順列に沿った経路が存在するので、電界強度計算を実施

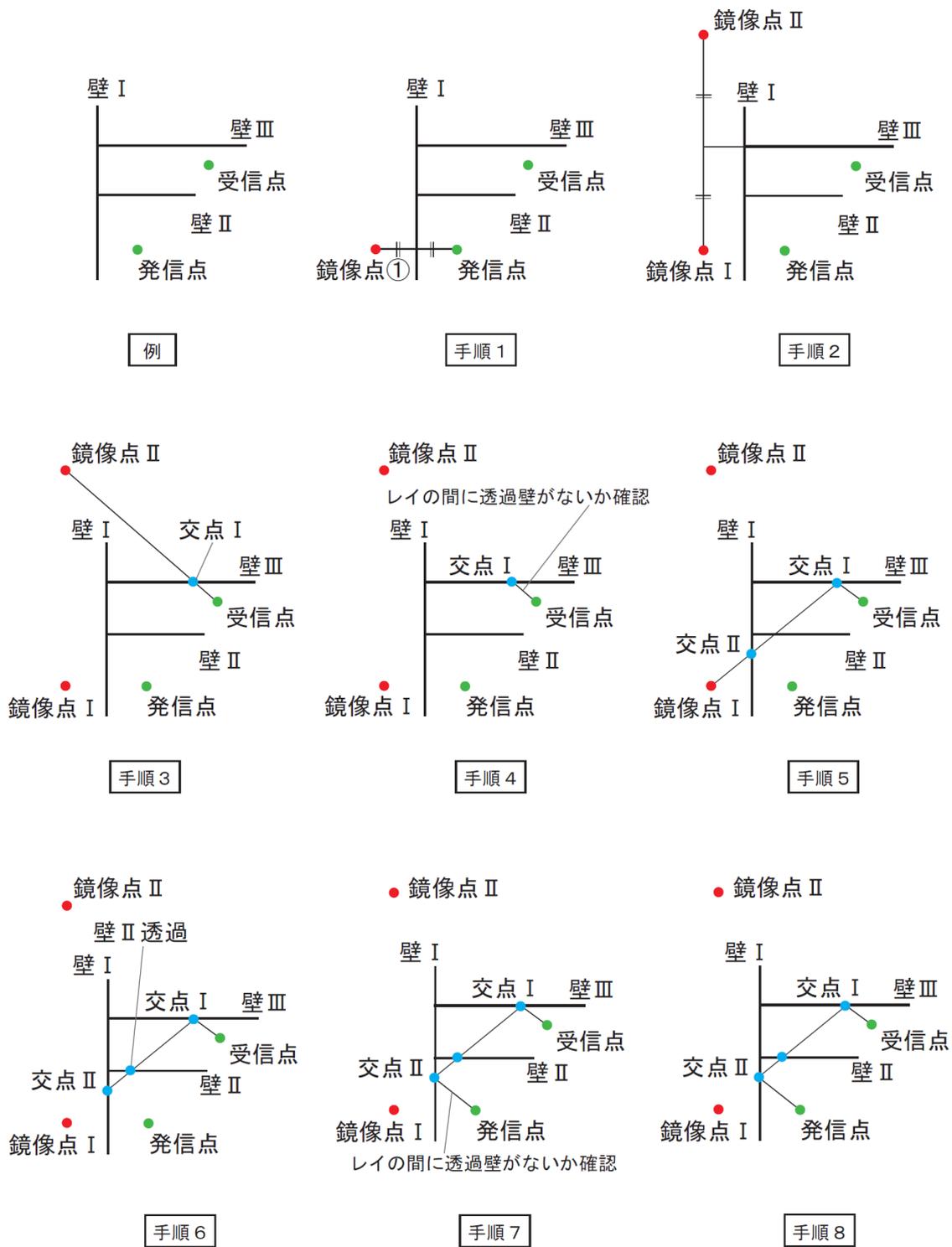


図 3.4 イメージング法の基本的な手順

n を壁面や構造物の面の数、 R を反射と透過を許す回数とすると、レイの存在を探索する必要のある反射面の順列数はおよそ n^R であり、 R が増えるとともに計算量が指数関数的に爆発する問題がある。また R が一定でも n が増えると計算量が多項式オーダーで増大する。

これまで行われているレイトレーシング法の鏡像法的高速化の研究は、レイの経路探索の際に、構造物とレイとの反射回数の上限に制限を加えるものや[7][8]、結果にあまり影響を与えない経路を効率よく探索対象から省く方法[9][10]、単純な立方体での高速化の手法[11]、測定が困難な特殊な場所を想定した場合の手法[12]などが提案されている。

既存研究2では、屋内の側壁・天井・床に対して什器が平行または垂直に配置されているような場合において、その幾何学的な特徴を利用して精度を落とさずに高速化を図る手法を提案している。

3.1.2 高速化手法

ここでは、レイの経路探索の際、構造物の組み合わせが増大する問題について、鏡像点計算を減らすことによりシミュレーション時間を高速化する既存研究 2 の方法を説明する。

屋内空間は、壁や床、天井や什器が水平や垂直で構成されていることが多いという特長がある。構造物が平行または垂直で構成されている空間でイメージング法を用いる場合、1つの鏡像点を生成する反射面の順列が多数存在するという特徴がある。例えば、図 3.5 では、発信点→面1→面2→受信点の順序で反射する経路での鏡像点と、発信点→面2→面1→受信点の順序で反射する経路での鏡像点は一致する。これは、反射面が互いに直交する場合、鏡像点はその反射順序に依存しないためである。そして実際には、発信点→面1→面2→受信点の順序にしか、レイの経路は存在しない。

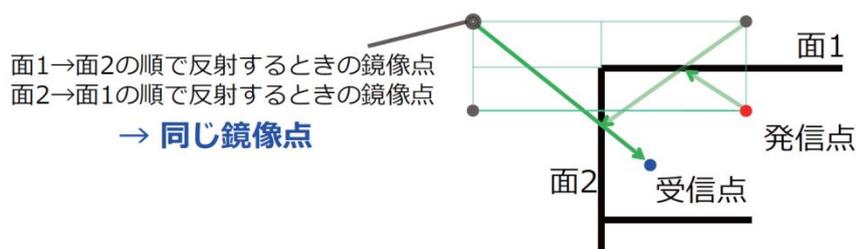


図 3.5 鏡像点を重複して計算する例

そこで、この鏡像点の重複計算を避けるように反射面の組合せを探索することにより、計算の精度を保ちながら高速化を実現する方法を提案する。この目的のため、対象となる空間にある壁面や構造物の外表面を、あらかじめ互いに直交する 3 種類のパターン

- パターン 1：法線ベクトルが x 軸に並行な面
- パターン 2：法線ベクトルが y 軸に並行な面
- パターン 3：法線ベクトルが z 軸に並行な面

に分類する (図 3.6)。

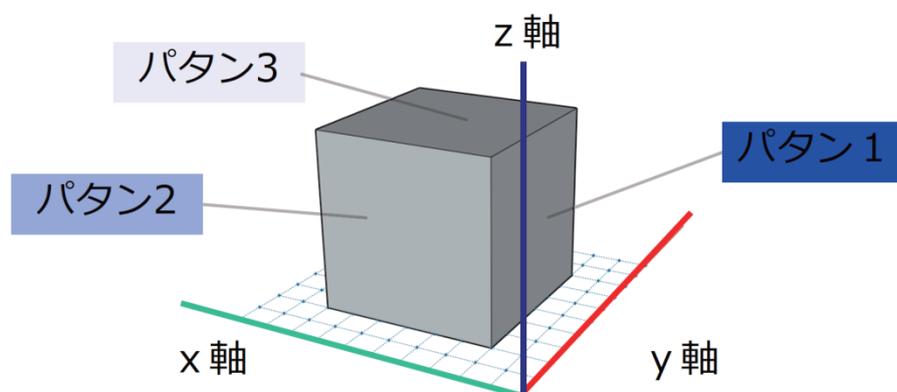


図 3.6 互いに直交する 3 種類のパターン

そして、レイの経路探索のための反射面の順序を選択する際、パターン 1 の後にパターン 2 やパターン 3 の面が反射面として並ぶ順序での鏡像点のみを計算し、パターン 2 の後にパターン 1 の面が並ぶ場合や、パターン 3 の後にパターン 1 やパターン 2 の反射面が並ぶ順序での鏡像点計算を行わない。

例えば、図 3.7 の場合、面 $I \rightarrow II \rightarrow III$ の順序で反射する場合や、 $I \rightarrow VI \rightarrow III$ の順序で反射する際の鏡像点計算は行うが、 $I \rightarrow III \rightarrow VI$ の順序で反射する場合の鏡像点計算はしない。 $I \rightarrow III \rightarrow VI$ の鏡像点は、面 III と面 VI が直交しているため、 $I \rightarrow VI \rightarrow III$ の順序で反射する場合と同じ鏡像点になるためである。

なお、実際の反射面の順序が $I \rightarrow VI \rightarrow III$ であるとは限らない ($I \rightarrow III \rightarrow VI$ となる可能性がある)。ここで決めた反射面の順序は鏡像点を計算するためあくまで仮決定したものであり、実際の反射面順序は次に述べる手順で探索する。

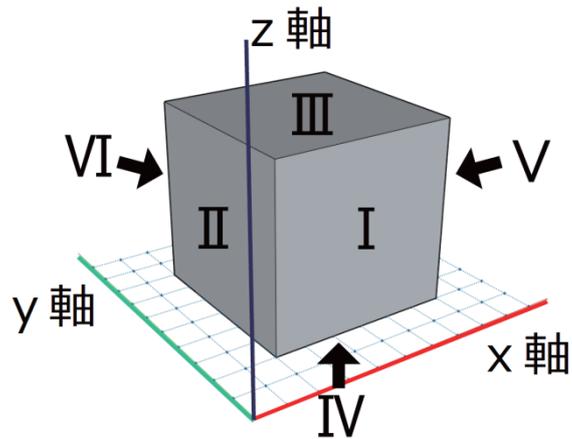


図 3.7 鏡像点計算を行う場合の例

この方法では、鏡像点の計算の終了後に、実際のレイの反射面の順序（と同時にそのようなレイが存在し得るか）を調べる必要がある。鏡像点を計算するために、反射面の順序を前述のアルゴリズムで仮決定したが、その鏡像点を生成する反射面の順序は多数存在し、鏡像点を生成した時点では、レイが実際にどの順序で各面を反射していくかがわからないためである。

このため、図 3.8 のように、鏡像点と受信点を結び、順に反射面を探索する手順を踏む。例えば図 3.8 では、まず手順 1 で鏡像点と受信点を結び、面 2 をみつける。次に手順 2 にて交点のある面と交わる角度と同じ角度のレイと交わる反射面を探索し、手順 3 にて、その交点と発信点が到達可能かを調べる。

決まった鏡像点 ➡ ●

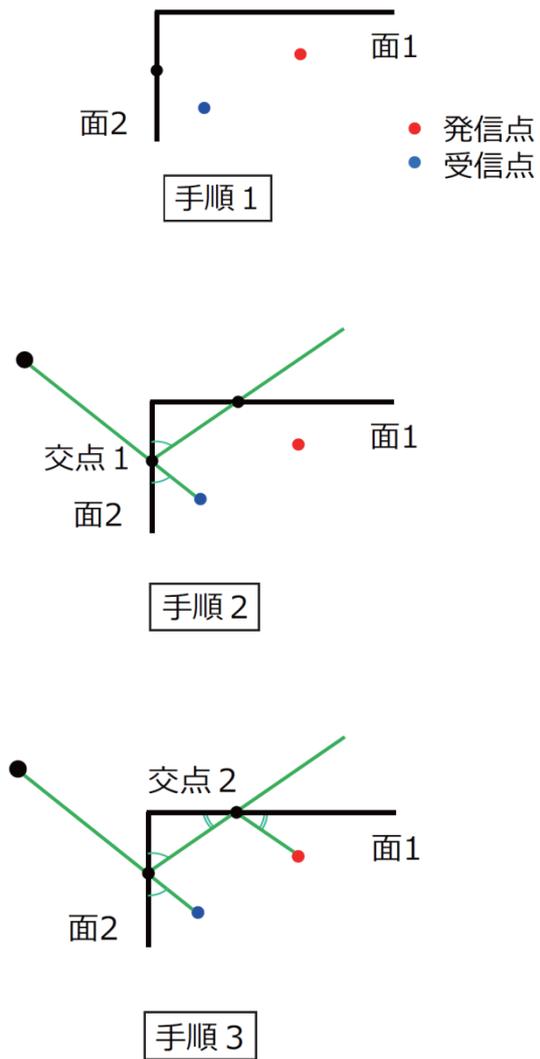


図 3.8 実際にどの順序で面に反射するかを探索する手順

3.2 シミュレーション条件

レイトレーシング法シミュレーションと位置推定シミュレーションによって本研究の手法を評価する。レイトレーシング法シミュレーションで評価対象領域内の測定点の電波強度を算出し、そのデータをもとに人物の数と位置を位置推定シミュレーションで求める。

評価対象領域は床面10m×10m、高さ230cmの壁面に囲まれた屋内空間で、内部に壁や什器はないものとする。無線LAN APは(500, 800)の天井面に1つのみ設置する。測定点に設置する電波受信センサの大きさは5cm×5cmとし、床面に格子状に設置する。人物は底面50cm×30cm、高さ160cmで、天面と底面を除く4面を5cm厚の壁面に囲まれた筒状の物体とする。屋内空間と人物の壁面はともにコンクリートと同等の物理的特性を持つ。レイトレーシング法シミュレーションでは、レイの壁面での反射、透過を合計6回まで考慮する。

人物の位置は図 3.9および表 3.1の1～11番のいずれかに配置する。ただし、同一の位置に2人以上は配置しないものとする。

以上の条件のもと、測定点間隔を5cm～3m、人数を1～5人の範囲でそれぞれ段階的に変化させ、人物の数と位置を推定できるかを評価した。

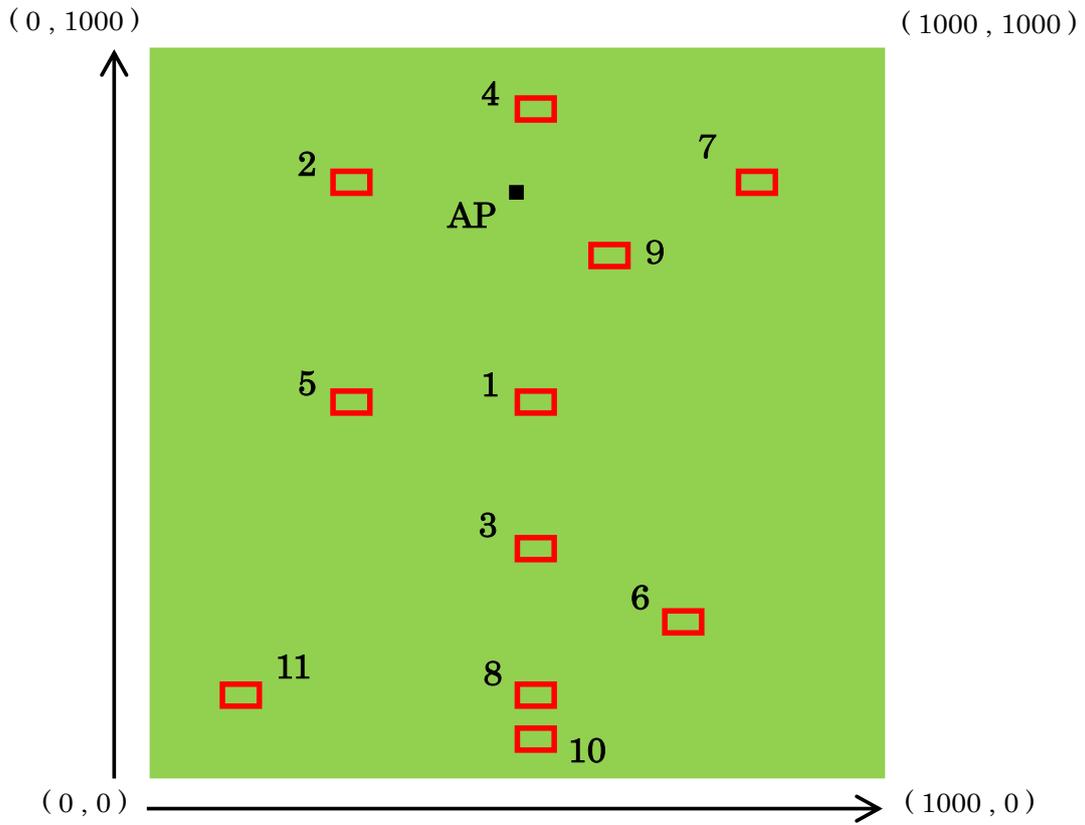


図 3.9 人物の位置

表 3.1 人物の位置 座標

位置番号	人物領域
1	(500, 500) ~ (550, 530)
2	(250, 800) ~ (300, 830)
3	(500, 300) ~ (550, 330)
4	(500, 900) ~ (550, 930)
5	(250, 500) ~ (300, 530)
6	(700, 200) ~ (750, 230)
7	(800, 800) ~ (850, 830)
8	(500, 100) ~ (550, 130)
9	(600, 700) ~ (650, 730)
10	(500, 10) ~ (550, 40)
11	(100, 100) ~ (150, 130)

第4章 シミュレーション結果

シミュレーションによる人物の数と位置の推定結果を説明する。以下の説明では、人物位置を次の例のように表す。

例

- 1p3 : 3番の位置に人物が1人いる。
- 2p1-7 : 1番と7番の位置にそれぞれ1人ずつ、合計2人の人物がいる。
- 5p2-3-5-8-9 : 2番と3番、5番、8番、9番の位置にそれぞれ1人ずつ、合計5人の人物がいる。

4.1 差と比の比較

人物がいる場合といない場合の比較として、差と比を用いた。測定点間隔が5cmで人物が1人の場合に、差と比のどちらがより正確に人数を推定できるかを評価した。結果を表4.1および表4.2に示す。表中の割合は、全測定点数40,000点に対する N_{min} の割合を表す。推定に成功したものを黄色で色づけした。

差を用いた場合は1パターンも成功しなかったのに対し、比を用いた場合は11パターンすべてで成功した。表より、差と比では N_{min} の値に大きな違いがあることがわかる。図4.1、図4.2に1p1と1p11の場合の影領域数の変化と影領域の様子を示す。図4.1の赤点は N_{min} を示す。差の1p1では、被遮蔽測定点数が1,000~1,500程度の範囲で期待されるほど影領域数が少なくならなかったため、 N が0付近での F の極小値が F_{min} となった。また差の1p11では、影領域が人物周辺にまともらず広い範囲に点在しているため、推定人数が大きくなった。AP周辺は電波強度が高いため、それだけ減衰する余地が大きいといえる。このため差を取った場合は、AP周辺にも減衰量の大きい点が生じやすい。したがって、減衰幅の絶対変化を取る差よりも、相対変化である比を用いることが適切であるといえる。以降、電波強度の比較には比を用いるものとする。

表 4.1 推定人数 (差, 5cm)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	50	0.125	3	2	A
1p2	40	0.100	3	2	A
1p3	50	0.125	10	9	A
1p4	40	0.100	3	2	A
1p5	50	0.125	6	5	A
1p6	50	0.125	5	4	A
1p7	70	0.175	22	21	A
1p8	70	0.175	29	28	A
1p9	50	0.125	2	1	A
1p10	190	0.475	50	49	A
1p11	570	1.425	213	212	A
平均	112	0.280	31.5	30.5	

表 4.2 推定人数 (比, 5cm)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	1,130	2.825	1	0	A
1p2	610	1.525	1	0	A
1p3	900	2.250	1	0	A
1p4	290	0.725	1	0	A
1p5	1,430	3.575	1	0	A
1p6	620	1.550	1	0	A
1p7	320	0.800	1	0	A
1p8	290	0.725	1	0	A
1p9	660	1.650	1	0	A
1p10	90	0.225	1	0	A
1p11	340	0.850	1	0	A
平均	607	1.518	1	0	

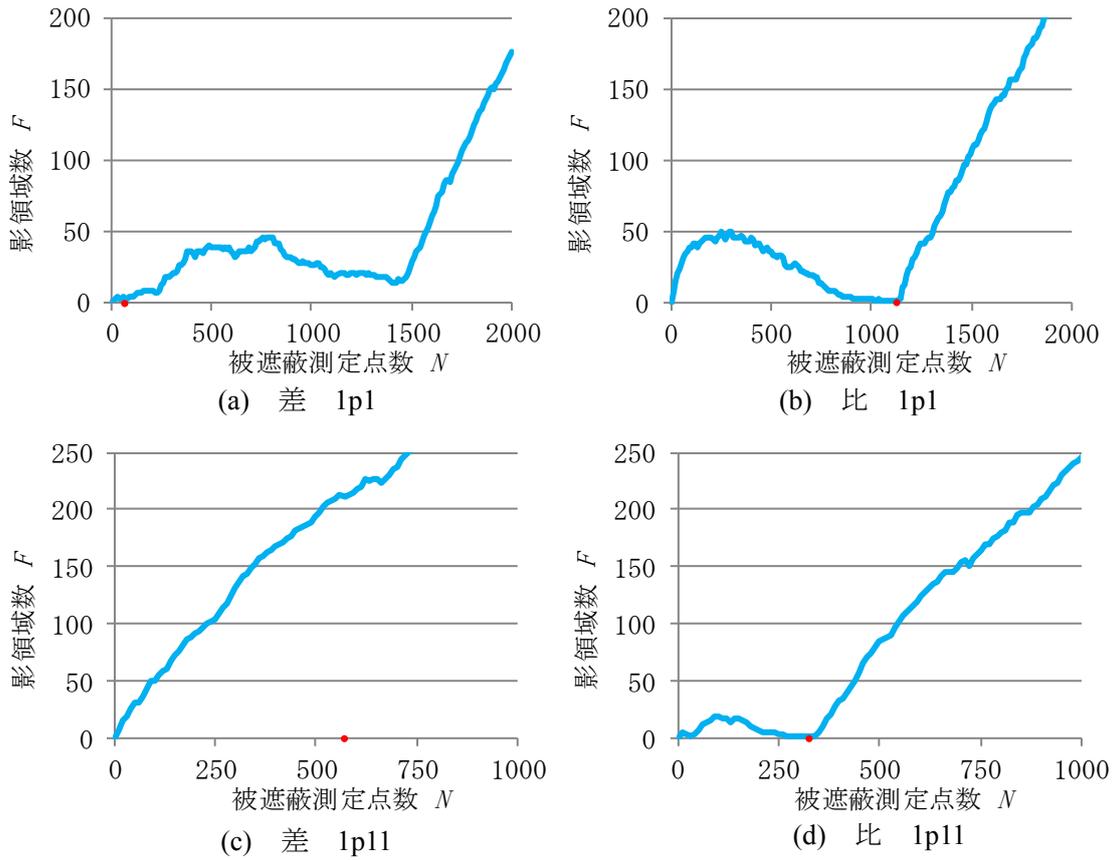


図 4.1 差と比の比較 原点付近の影領域数変化

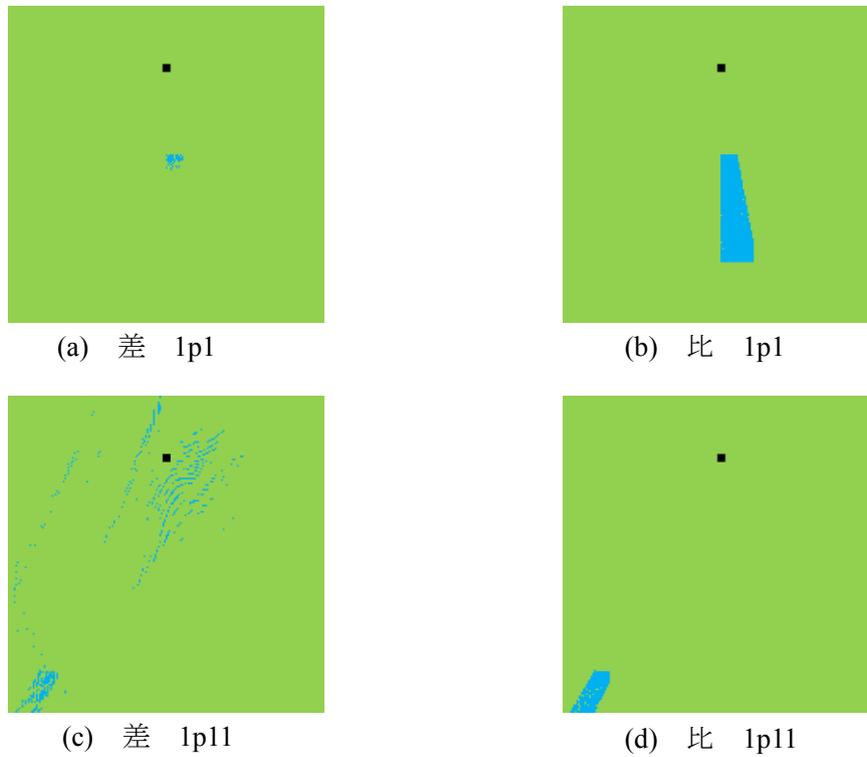


図 4.2 差と比の比較 影領域の様子

4.2 1人の場合

次に人物を1人とし、測定点間隔を5cm～3mの範囲で段階的に変化させ、測定点間隔の変化による人物の数と位置の推定正確性を評価する。

4.2.1 人数の推定

まず、測定点間隔が5cm～50cmでの推定結果を表4.3から表4.6に示す。割合は N_{min} の全点に占める割合を、条件は N_{min} が決定されたA、B、Cの条件を示す。なお、全測定点数の数は、5cmで40,000点、10cmで10,000点、20cmで2,500点、50cmで400点である。推定に成功したものを黄色で色づけした。

成功したパターンを見ると、人物位置が同じならば測定点間隔によらず N_{min} の割合がおおむね等しくなることがわかる。失敗した20cmの1p10、50cmの1p4、1p10は、成功した測定点間隔の場合と比べ N_{min} の割合が大きく増加している。これは、全体に占める1点の割合が20cmでは0.04%、50cmでは0.25%となるため、 N_{min} の割合が少ない段階では被遮蔽測定点数が少なく、測定点が人物周辺にまとも極小値を取らないためと考えられる。

表 4.3 推定人数 (比, 5cm)

人物位置	N_{min}	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	1,130	2.83	1	0	A
1p2	610	1.53	1	0	A
1p3	900	2.25	1	0	A
1p4	290	0.73	1	0	A
1p5	1,430	3.58	1	0	A
1p6	620	1.55	1	0	A
1p7	320	0.80	1	0	A
1p8	290	0.73	1	0	A
1p9	660	1.65	1	0	A
1p10	90	0.23	1	0	A
1p11	340	0.85	1	0	A

表 4.4 推定人数 (比, 10cm)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	296	2.96	1	0	A
1p2	160	1.60	1	0	A
1p3	242	2.42	1	0	A
1p4	74	0.74	1	0	A
1p5	366	3.66	1	0	A
1p6	158	1.58	1	0	A
1p7	84	0.84	1	0	A
1p8	78	0.78	1	0	A
1p9	167	1.67	1	0	A
1p10	29	0.29	1	0	A
1p11	85	0.85	1	0	A

表 4.5 推定人数 (比, 20cm)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	71	2.84	1	0	A
1p2	41	1.64	1	0	A
1p3	60	2.40	1	0	A
1p4	19	0.76	1	0	A
1p5	86	3.44	1	0	A
1p6	45	1.80	1	0	A
1p7	23	0.92	1	0	A
1p8	21	0.84	1	0	A
1p9	45	1.80	1	0	A
1p10	47	1.88	25	24	A
1p11	22	0.88	1	0	A

表 4.6 推定人数 (比, 50cm)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	12	3.00	1	0	A
1p2	6	1.50	1	0	A
1p3	10	2.50	1	0	A
1p4	13	3.25	4	3	A
1p5	14	3.50	1	0	A
1p6	12	3.00	1	0	A
1p7	4	1.00	1	0	A
1p8	3	0.75	1	0	A
1p9	11	2.75	2	1	A
1p10	16	4.00	7	6	A
1p11	4	1.00	1	0	A

次に測定点間隔が 1m～3m の結果を表 4.7 から表 4.9 に示す。全測定点の数は、1m で 100 点、2m で 25 点、3m で 16 点である。

全体として成功数が少なく、2m では成功数が半数を超えたものの、3m では 1 パターンのみの成功であった。また、条件 A による推定が減少していることも特徴で、条件 A で成功した場合は 2 パターンのみであった。測定点間隔が 1m 以上になると全体の測定点数が少ないため、影領域数の増減が起りにくくなり極小値を取らないためと考えられる。条件 C で成功したパターンはなかった。

表 4.7 推定人数 (比, 1m)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	15	15.0	5	4	A
1p2	16	16.0	11	10	A
1p3	3	3.0	1	0	A
1p4	13	13.0	5	4	A
1p5	16	16.0	6	5	A
1p6	9	9.0	8	7	B
1p7	3	3.0	1	0	B
1p8	15	15.0	7	6	A
1p9	13	13.0	7	6	A
1p10	3	3.0	1	0	B
1p11	9	9.0	6	5	A

表 4.8 推定人数 (比, 2m)

人物位置	<i>Nlmin</i>	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	4	16.0	4	3	C
1p2	3	12.0	2	1	B
1p3	2	8.0	1	0	B
1p4	3	12.0	3	2	C
1p5	2	8.0	1	0	B
1p6	4	16.0	3	2	B
1p7	2	8.0	1	0	B
1p8	5	20.0	1	0	A
1p9	2	8.0	1	0	B
1p10	5	20.0	1	0	B
1p11	5	20.0	2	1	B

表 4.9 推定人数 (比, 3m)

人物位置	N_{min}	割合(%)	推定人数	人数誤差	条件
1p1	2	12.5	2	1	C
1p2	4	25.0	4	3	C
1p3	3	18.8	2	1	B
1p4	3	18.8	2	1	B
1p5	3	18.8	3	2	C
1p6	2	12.5	2	1	C
1p7	3	18.8	1	0	B
1p8	2	12.5	2	1	C
1p9	3	18.8	3	2	C
1p10	2	12.5	2	1	C
1p11	3	18.8	3	2	C

1 人の場合の人数推定成功率を表 4.10 にまとめた。条件別成功数はそれぞれの条件で決定された N_{min} の数とそのうちの人数推定成功数を示す。おおむね推定点間隔が広がるにつれて成功率も下がるといえる。測定点間隔が 50cm 以下の場合は成功率が 7 割を超え、高い水準であった。また、人数の平均誤差と測定点間隔のあいだでの明確な関連は見られなかった。

表 4.10 人数推定成功率 (比, 1 人)

測定点間隔	条件A	条件B	条件C	成功	失敗	成功率(%)	平均誤差
5cm	11	0	0	11	0	100	0
10cm	11	0	0	11	0	100	0
20cm	10	0	0	10	1	90.9	2.2
50cm	8	0	0	8	3	72.7	0.9
1m	1	2	0	3	8	27.3	4.3
2m	1	5	0	6	5	54.5	0.8
3m	0	1	0	1	10	9.1	1.4

4.2.2 位置の推定

人数の推定に失敗し、人数を複数人と推定している場合は複数の推定点が存在するため、最上位の点を結果として示す。まず、測定点間隔が 5cm～50cm での結果を表 4.11 から表 4.14 に示す。誤差は目標点と推定点の距離を示す。人物領域の項は、推定点が人物領域内に含まれるかどうかを示し、含まれている場合は位置の推定を成功としている。推定に成功したものを黄色で色づけした。

5cm と 10cm では、すべてのパターンで位置の推定も成功した。また、20cm では 2 つのパターンで失敗しているが、いずれも誤差はわずかであり、人物領域外ではあるものの目標点に近い点を推定することができている。20cm 以下では平均誤差が 15cm 未満であるのに対し、50cm では平均誤差が 100cm を超え、大きな差が出る結果となった。

表 4.11 推定位置 (比, 5cm)

人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差 (cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(500, 525)	○	5.0	○
1p2	(300, 800)	(295, 800)	○	5.0	○
1p3	(500, 330)	(550, 330)	○	50.0	○
1p4	(500, 900)	(500, 905)	○	5.0	○
1p5	(300, 530)	(295, 525)	○	7.1	○
1p6	(700, 230)	(705, 225)	○	7.1	○
1p7	(800, 800)	(805, 800)	○	5.0	○
1p8	(500, 130)	(500, 125)	○	5.0	○
1p9	(600, 730)	(605, 725)	○	7.1	○
1p10	(500, 40)	(505, 40)	○	5.0	○
1p11	(150, 130)	(145, 125)	○	7.1	○
平均				9.8	

表 4.12 推定位置 (比, 10cm)

人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差 (cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(500, 520)	○	10.0	○
1p2	(300, 800)	(290, 800)	○	10.0	○
1p3	(500, 330)	(550, 330)	○	50.0	○
1p4	(500, 900)	(500, 910)	○	10.0	○
1p5	(300, 530)	(290, 520)	○	14.1	○
1p6	(700, 230)	(710, 220)	○	14.1	○
1p7	(800, 800)	(810, 800)	○	10.0	○
1p8	(500, 130)	(500, 120)	○	10.0	○
1p9	(600, 730)	(610, 720)	○	14.1	○
1p10	(500, 40)	(500, 40)	○	0	○
1p11	(150, 130)	(140, 120)	○	14.1	○
平均				14.2	

表 4.13 推定位置 (比, 20cm)

人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差(cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(505, 525)	○	7.1	○
1p2	(300, 800)	(305, 805)	—	7.1	○
1p3	(500, 330)	(505, 325)	○	7.1	○
1p4	(500, 900)	(505, 905)	○	7.1	○
1p5	(300, 530)	(285, 525)	○	15.8	○
1p6	(700, 230)	(705, 225)	○	7.1	○
1p7	(800, 800)	(805, 805)	○	7.1	○
1p8	(500, 130)	(505, 125)	○	7.1	○
1p9	(600, 730)	(605, 725)	○	7.1	○
1p10	(500, 40)	(505, 45)	—	7.1	—
1p11	(150, 130)	(145, 125)	○	7.1	○
平均				7.9	

表 4.14 推定位置 (比, 50cm)

人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差(cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(520, 520)	○	22.4	○
1p2	(300, 800)	(270, 820)	○	36.1	○
1p3	(500, 330)	(520, 320)	○	22.4	○
1p4	(500, 900)	(770, 120)	—	825.4	—
1p5	(300, 530)	(270, 520)	○	31.6	○
1p6	(700, 230)	(720, 270)	—	44.7	○
1p7	(800, 800)	(820, 820)	○	28.3	○
1p8	(500, 130)	(520, 120)	○	22.4	○
1p9	(600, 730)	(520, 670)	—	100.0	—
1p10	(500, 40)	(820, 170)	—	345.4	—
1p11	(150, 130)	(120, 120)	○	31.6	○
平均				137.3	

次に 1m～3m での結果を表 4.15 から表 4.17 に示す。1m～3m ではすべてのパターンで人物領域内に推定点が含まれなかった。これは、推定点間隔が広がるにつれて推定の正確性が低くなることに加え、そもそも人物領域内に 1つの測定点も存在しない場合があるためであると考えられる。したがって測定点間隔が広いときは誤差に着目すべきである。1m での平均誤差は 162cm で、50cm の平均誤差 137cm と比較すると 18%程度が悪化にとどまっている。2m での平均誤差は 229cm で、測定点間隔を考慮すると良好な結果である。

表 4.15 推定位置 (比, 1m)

人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差(cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(545, 445)	—	96.2	—
1p2	(300, 800)	(345, 745)	—	71.1	—
1p3	(500, 330)	(545, 245)	—	96.2	○
1p4	(500, 900)	(545, 845)	—	71.1	—
1p5	(300, 530)	(345, 445)	—	96.2	—
1p6	(700, 230)	(445, 45)	—	315.0	—
1p7	(800, 800)	(845, 745)	—	71.1	○
1p8	(500, 130)	(445, 145)	—	57.0	—
1p9	(600, 730)	(745, 645)	—	168.1	—
1p10	(500, 40)	(745, 245)	—	319.5	○
1p11	(150, 130)	(145, 545)	—	415.0	—
平均				161.5	

表 4.16 推定位置 (比, 2m)

人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差(cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(495, 495)	—	35.4	—
1p2	(300, 800)	(295, 895)	—	95.1	—
1p3	(500, 330)	(295, 95)	—	311.8	○
1p4	(500, 900)	(695, 495)	—	449.5	—
1p5	(300, 530)	(295, 495)	—	35.4	○
1p6	(700, 230)	(895, 295)	—	205.5	—
1p7	(800, 800)	(895, 695)	—	141.6	○
1p8	(500, 130)	(695, 295)	—	255.4	○
1p9	(600, 730)	(695, 695)	—	101.2	○
1p10	(500, 40)	(695, 495)	—	495.0	○
1p11	(150, 130)	(295, 495)	—	392.7	—
平均				229.0	

表 4.17 推定位置 (比, 3m)

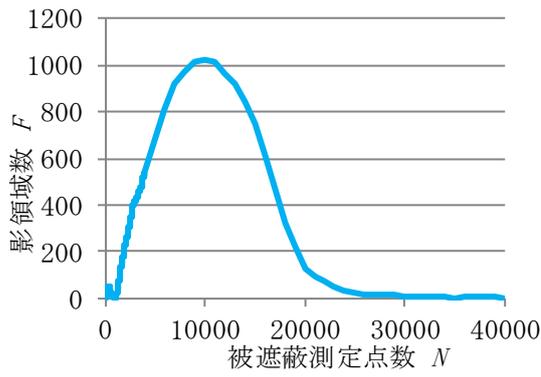
人物位置	目標点	推定点	人物領域	誤差(cm)	人数推定
1p1	(500, 530)	(45, 945)	—	615.8	—
1p2	(300, 800)	(345, 945)	—	151.8	—
1p3	(500, 330)	(645, 45)	—	319.8	—
1p4	(500, 900)	(345, 645)	—	298.4	—
1p5	(300, 530)	(345, 645)	—	123.5	—
1p6	(700, 230)	(945, 345)	—	270.6	—
1p7	(800, 800)	(945, 645)	—	212.2	○
1p8	(500, 130)	(945, 645)	—	680.6	—
1p9	(600, 730)	(645, 945)	—	219.7	—
1p10	(500, 40)	(45, 645)	—	757.0	—
1p11	(150, 130)	(945, 645)	—	947.2	—
平均				417.9	

表 4.18 に 1 人の場合の位置推定成功率をまとめた。成功，失敗それぞれに限った推定誤差も記した。測定点間隔 50cm では，成功の場合に限った誤差は 30cm で比較的良好であった。表中の期待値は，屋内の任意の点から目標点までの距離の期待値である。測定点間隔が 2m の平均誤差でも期待値の半分以下であり，有意な結果であるといえる。全体として，測定点間隔が広がるにつれ誤差も大きくなる傾向がある。また，人数の推定に失敗し位置の推定に成功したパターンはなかったため，人数と位置ともに成功した割合は位置の推定成功率と等しい。測定点間隔 5cm，10cm では人数，位置ともにすべてなパターンで成功した。測定点間隔 50cm でも 6 割以上成功している。

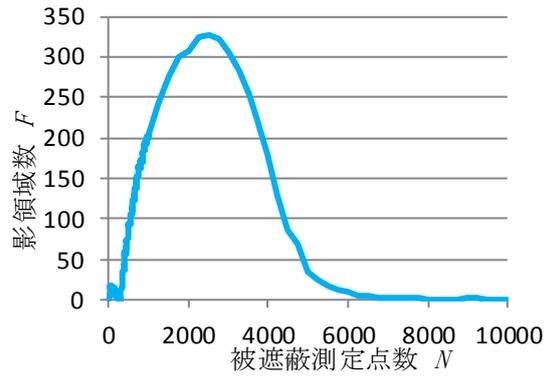
表 4.18 位置推定成功率（比，1 人）

測定点間隔	成功数	誤差 (cm)	失敗数	誤差 (cm)	成功率 (%)	平均誤差 (cm)	人数推定成功率 (%)
5cm	11	9.8	0	—	100	9.8	100
10cm	11	14.2	0	—	100	14.2	100
20cm	9	8.0	2	7.1	81.8	7.9	90.9
50cm	7	29.9	4	423.6	63.6	137.3	72.7
1m	0	—	11	161.5	0	161.5	27.3
2m	0	—	11	229.0	0	229.0	54.5
3m	0	—	11	417.9	0	417.9	9.1
期待値						495.7	

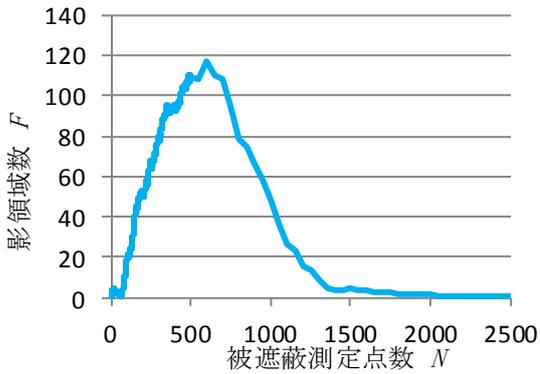
測定点間隔によって，影領域とその数がどのように異なるのかを明らかにするため，各測定点間隔の 1p1 のパターンを比較した。図 4.3 は 1p1 における影領域数の変化を，図 4.4 は被遮蔽測定点数が N_{min} での影領域の様子を表す。5cm～1m は条件 A，2m，3m は条件 C によって N_{min} が決定され，50cm 以下で人数の推定に成功した。50cm 以下では， N_{min} が期待される結果となり影領域が人物による真の電波遮蔽領域を示している。1m，2m では人物を含む影領域以外も存在したため，人数の推定に失敗した。ただし人物を含む影領域が存在する場合は，人数の推定に失敗しても，最上位の点で位置推定を行えばそれほど誤差が大きくなりえないと考えられる。3m では人物近傍の点を推定できておらず，本手法ではうまくいかなかったことがわかる。



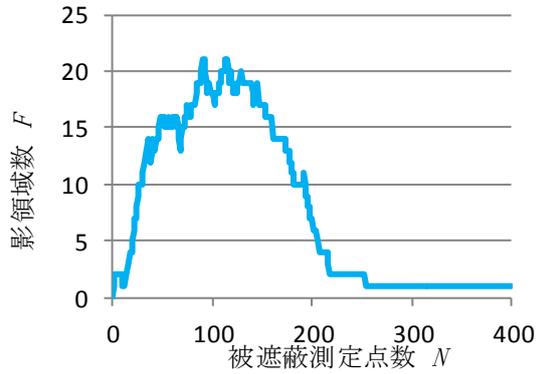
(a) 5cm



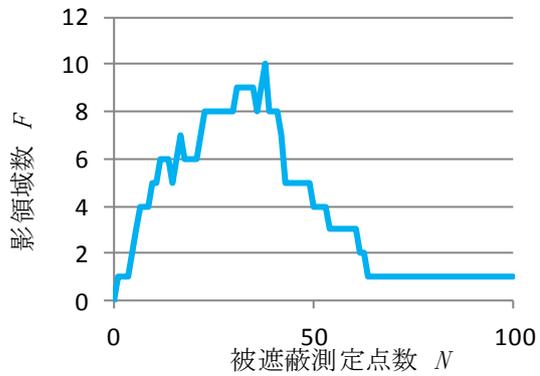
(b) 10cm



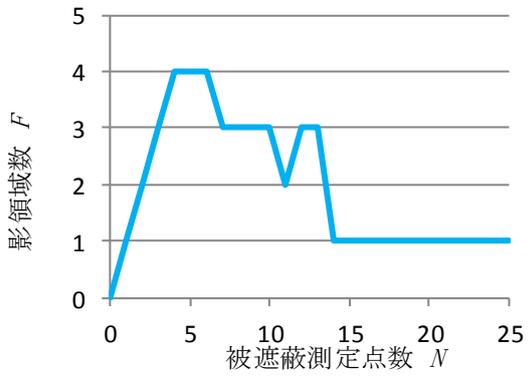
(c) 20cm



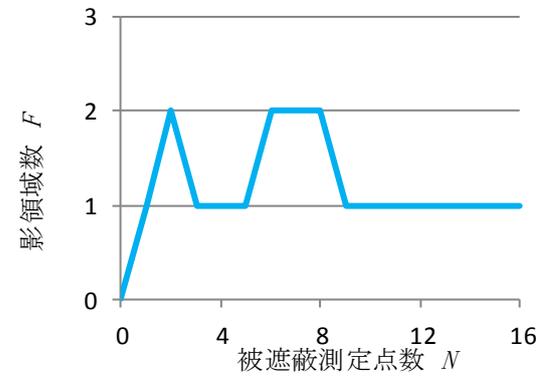
(d) 50cm



(e) 1m

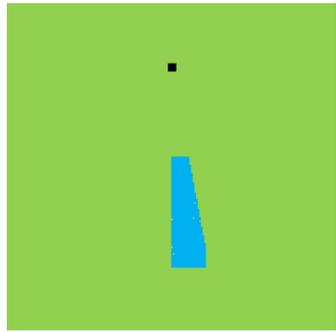


(f) 2m

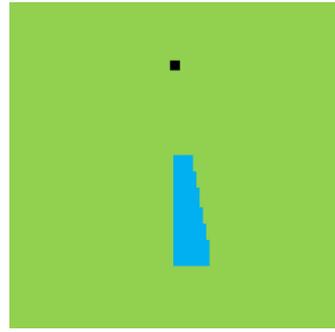


(g) 3m

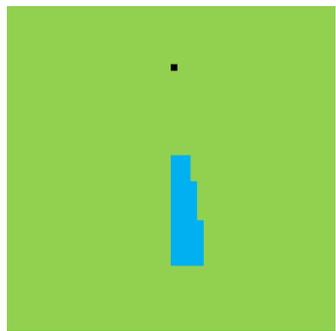
図 4.3 各測定点間隔での影領域数変化 (比, 1p1)



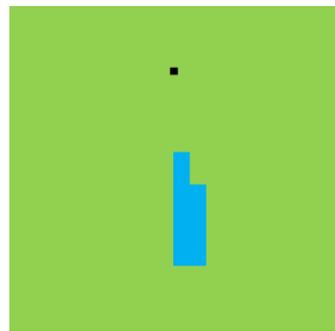
(a) 5cm



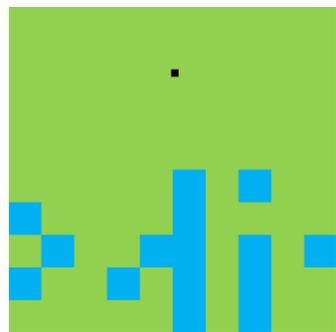
(b) 10cm



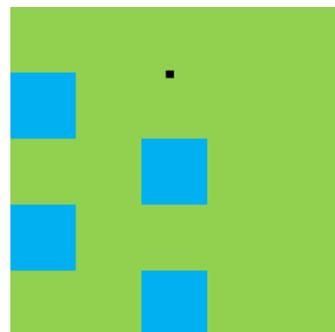
(c) 20cm



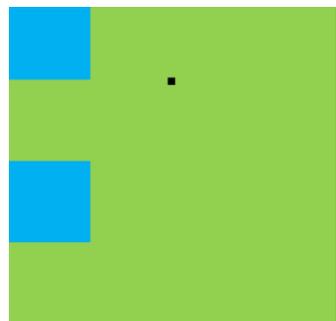
(d) 50cm



(e) 1m



(f) 2m



(g) 3m

図 4.4 各測定点間隔での影領域の様子 (比, 1p1)

4.3 複数人の場合

4.3.1 人数の推定

屋内の人物数が 2 人, 3 人, 5 人の場合で人数の推定を行った. まず, 推定点間隔が 5cm ~50cm での結果を表 4.19 から表 4.22 に示す. 割合は N_{min} の全点に占める割合を, 条件は N_{min} が決定された A, B, C の条件を示す. また, 推定人数が正確なパターンを黄色で色づけした.

2p1-3 と 3p1-3-8, 5p1-3-4-8-10, 5p2-3-5-8-9 は測定点間隔にかかわらず失敗した. これは, 図のように 1 番と 3 番, あるいは 3 番と 8 番の人物を含む影領域が一体となってしまう影領域数が人数とならないためである. 2p1-8 や 3p1-4-8 はおおむね成功していることから, 1 番と 8 番の影領域は分離できていると考えられる. このように, 本手法では複数人での人数推定をする場合, 複数人の人物と AP が一直線上に並ぶとき, 人物同士の距離が近いとお互いの影領域を分離できないため, 推定に失敗する. ただし, 2p2-7 のように人物が AP を挟んで一直線上に並ぶ場合は, 影領域が反対方向に広がるため推定が可能である (図 4.5).

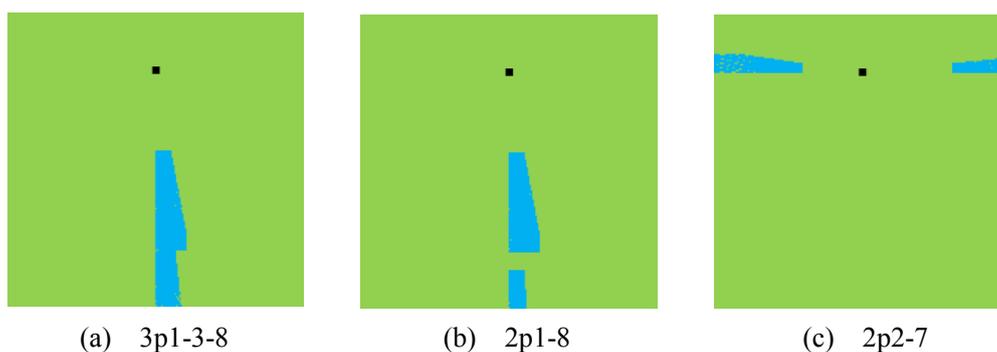


図 4.5 影領域の様子 複数人の場合

表 4.19 推定人数 (比, 5cm, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	4.275	1	1	A	3p1-3-8	4.275	1	2	A
2p1-7	3.650	2	0	A	3p1-4-8	4.325	3	0	A
2p1-8	3.575	2	0	A	3p2-4-9	3.850	3	0	A
2p1-9	4.475	2	0	A	3p4-10-11	1.800	3	0	A
2p2-7	2.325	2	0	A	3p5-6-7	5.850	3	0	A
2p4-8	1.475	2	0	A	3p6-10-11	2.650	3	0	A
2p5-6	5.075	2	0	A					
2p10-11	1.050	2	0	A	5p1-2-4-7-9	7.525	5	0	A
					5p1-3-4-8-10	5.050	2	3	A
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	8.200	5	0	A
2人	0.13	7	1		5p2-3-5-8-9	8.500	4	1	A
3人	0.33	5	1		5p2-4-5-7-10	6.825	5	0	A
5人	0.67	4	2		5p2-5-6-7-11	7.900	5	0	A

表 4.20 推定人数 (比, 10cm, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	4.49	1	1	A	3p1-3-8	4.50	1	2	A
2p1-7	3.80	2	0	A	3p1-4-8	4.47	3	0	A
2p1-8	3.76	2	0	A	3p2-4-9	4.01	3	0	A
2p1-9	4.63	2	0	A	3p4-10-11	1.83	3	0	A
2p2-7	2.44	2	0	A	3p5-6-7	6.05	3	0	A
2p4-8	1.52	2	0	A	3p6-10-11	2.78	3	0	A
2p5-6	5.26	2	0	A					
2p10-11	1.10	2	0	A	5p1-2-4-7-9	7.80	5	0	A
					5p1-3-4-8-10	5.21	2	3	A
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	8.43	5	0	A
2人	0.13	7	1		5p2-3-5-8-9	9.34	4	1	A
3人	0.33	5	1		5p2-4-5-7-10	7.06	5	0	A
5人	0.67	4	2		5p2-5-6-7-11	8.25	5	0	A

表 4.21 推定人数 (比, 20cm, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	4.40	1	1	A	3p1-3-8	4.52	1	2	A
2p1-7	3.76	2	0	A	3p1-4-8	0.44	1	2	A
2p1-8	3.68	2	0	A	3p2-4-9	4.12	3	0	A
2p1-9	3.32	2	0	A	3p4-10-11	1.88	3	0	A
2p2-7	2.48	2	0	A	3p5-6-7	6.08	3	0	A
2p4-8	0.92	2	0	A	3p6-10-11	2.88	3	0	A
2p5-6	5.20	2	0	A					
2p10-11	1.12	2	0	A	5p1-2-4-7-9	7.80	5	0	A
					5p1-3-4-8-10	0.32	2	3	A
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	0.64	4	1	A
2人	0.13	7	1		5p2-3-5-8-9	0.48	3	2	A
3人	0.67	4	2		5p2-4-5-7-10	6.80	5	0	A
5人	1.00	3	3		5p2-5-6-7-11	8.52	5	0	A

表 4.22 推定人数 (比, 50cm, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	4.75	1	1	A	3p1-3-8	4.75	1	2	A
2p1-7	4.00	2	0	A	3p1-4-8	4.50	3	0	A
2p1-8	3.75	2	0	A	3p2-4-9	4.25	3	0	A
2p1-9	5.00	2	0	A	3p4-10-11	2.00	3	0	A
2p2-7	2.50	2	0	A	3p5-6-7	6.50	3	0	A
2p4-8	1.50	2	0	A	3p6-10-11	3.25	3	0	A
2p5-6	5.50	2	0	A					
2p10-11	1.25	2	0	A	5p1-2-4-7-9	6.75	5	0	A
					5p1-3-4-8-10	5.50	2	3	A
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	8.75	5	0	A
2人	0.13	7	1		5p2-3-5-8-9	9.25	4	1	A
3人	0.33	5	1		5p2-4-5-7-10	5.50	5	0	A
5人	0.67	4	2		5p2-5-6-7-11	4.25	5	0	A

次に、測定点間隔が 1m～3m の場合の結果を表 4.23 から表 4.25 に示す。1 人の場合と同様、1m 以上の測定点間隔では、成功数が大幅に減少した。2m, 3m では、条件 C での成功がほとんどとなっており、偶然数値が一致した可能性が考えられる。そもそも、3m の場合では測定点数が 4×4 個の計 16 個であり、取りうる影領域数は最大で 4 個にしかない。したがって人数が 5 人以上の場合は必ず失敗となり、それ未満の人数でも取りうる影領域数の少なさから偶然成功した可能性が高いと考えられる。人数の推定が成功した場合、人物を含む影領域を識別できての成功なのかどうかは次項の位置の推定で検証する。

表 4.23 推定人数 (比, 1m, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	5.0	1	1	A	3p1-3-8	5.0	1	2	A
2p1-7	22.0	6	4	A	3p1-4-8	14.0	8	5	A
2p1-8	11.0	5	3	A	3p2-4-9	21.0	8	5	A
2p1-9	4.0	2	0	B	3p4-10-11	6.0	3	0	A
2p2-7	2.0	1	1	B	3p5-6-7	4.0	2	1	B
2p4-8	3.0	2	0	B	3p6-10-11	4.0	2	1	A
2p5-6	4.0	2	0	B					
2p10-11	5.0	3	1	B	5p1-2-4-7-9	5.0	3	2	B
					5p1-3-4-8-10	6.0	2	3	A
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	20.0	7	2	A
2人	1.25	3	5		5p2-3-5-8-9	6.0	3	2	A
3人	2.33	1	5		5p2-4-5-7-10	4.0	2	3	B
5人	2.33	0	6		5p2-5-6-7-11	18.0	7	2	A

表 4.24 推定人数 (比, 2m, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	8.0	2	0	C	3p1-3-8	12.0	3	0	C
2p1-7	8.0	1	1	B	3p1-4-8	16.0	3	0	B
2p1-8	12.0	3	1	C	3p2-4-9	12.0	2	1	B
2p1-9	12.0	1	1	B	3p4-10-11	12.0	3	0	C
2p2-7	8.0	1	1	B	3p5-6-7	8.0	1	2	B
2p4-8	16.0	1	1	A	3p6-10-11	12.0	2	1	B
2p5-6	8.0	1	1	B					
2p10-11	12.0	3	1	C	5p1-2-4-7-9	12.0	1	4	B
					5p1-3-4-8-10	8.0	1	4	B
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	8.0	1	4	B
2人	0.88	1	7		5p2-3-5-8-9	12.0	2	3	B
3人	0.67	3	3		5p2-4-5-7-10	8.0	1	4	B
5人	3.83	0	6		5p2-5-6-7-11	12.0	1	4	B

表 4.25 推定人数 (比, 3m, 複数人)

人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件	人物位置	割合 (%)	推定人数	人数誤差	条件
2p1-3	12.5	2	0	C	3p1-3-8	12.5	2	1	C
2p1-7	18.8	3	1	C	3p1-4-8	18.8	3	0	C
2p1-8	31.3	1	1	B	3p2-4-9	25.0	2	1	B
2p1-9	12.5	1	1	B	3p4-10-11	12.5	2	1	C
2p2-7	12.5	2	0	C	3p5-6-7	12.5	1	2	B
2p4-8	18.8	3	1	C	3p6-10-11	18.8	3	0	C
2p5-6	12.5	2	0	C					
2p10-11	18.8	3	1	C	5p1-2-4-7-9	12.5	2	3	C
					5p1-3-4-8-10	12.5	2	3	C
人数	平均誤差	成功	失敗		5p1-4-5-7-10	12.5	2	3	C
2人	0.63	3	5		5p2-3-5-8-9	25.0	4	1	C
3人	0.83	2	4		5p2-4-5-7-10	12.5	2	3	C
5人	2.83	0	6		5p2-5-6-7-11	12.5	1	4	B

複数人の場合の人数推定成功率を表 4.26 にまとめた。条件別成功数はそれぞれの条件で決定された N_{min} の数とそのうちの人数推定成功数を示す。50cm 以下と 1m 以上で成功率に大きな差が生じる結果となった。また、測定点間隔が広がるにつれて条件 B や C のパターンが増えていることがわかる。

表 4.26 人数推定成功率 (比, 複数人)

測定点間隔	人数	条件別成功数			成功数	失敗数	成功率 (%)	平均誤差
		A	B	C				
5cm	2人	7/8	0/0	0/0	7	1	87.5	0.1
	3人	5/6	0/0	0/0	5	1	83.3	0.3
	5人	4/6	0/0	0/0	4	2	66.7	0.7
10cm	2人	7/8	0/0	0/0	7	1	87.5	0.1
	3人	5/6	0/0	0/0	5	1	83.3	0.3
	5人	4/6	0/0	0/0	4	2	66.7	0.7
20cm	2人	7/8	0/0	0/0	7	1	87.5	0.1
	3人	4/6	0/0	0/0	4	2	66.7	0.7
	5人	3/6	0/0	0/0	3	3	50.0	1.0
50cm	2人	7/8	0/0	0/0	7	1	87.5	0.1
	3人	5/6	0/0	0/0	5	1	83.3	0.3
	5人	4/6	0/0	0/0	4	2	66.7	0.7
1m	2人	0/3	3/5	0/0	3	5	37.5	1.3
	3人	1/5	0/1	0/0	1	5	16.7	2.3
	5人	0/4	0/2	0/0	0	6	0.0	2.3
2m	2人	0/1	0/4	1/1	1	7	12.5	0.9
	3人	0/0	1/4	2/2	3	3	50.0	0.7
	5人	0/0	0/6	0/0	0	6	0.0	3.8
3m	2人	0/0	0/2	3/6	3	5	37.5	0.6
	3人	0/0	0/2	2/4	2	4	33.3	0.8
	5人	0/0	0/1	0/5	0	6	0.0	2.8

4.3.2 位置の推定

複数人の場合で人数の推定に成功したパターンに限り、位置の推定を行った。初めに、測定点間隔 5cm～50cm の結果を表 4.27 から表 4.30 に示す。なお、人物位置と推定点は一人あたりの誤差が最小になるように組み合わせた。表では人物の位置番号とそれに対応する推定点の誤差をまとめた。すべての人物領域に対し、一つの推定点が含まれる場合を成功とし、黄色で色づけした。

表 4.27 推定位置 (比, 5cm, 複数人)

人物位置	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	一人あたり 誤差(cm)
2p1-7	1	5.0	○	7	5.0	○				5.0
2p1-8	1	5.0	○	8	5.0	○				5.0
2p1-9	1	5.0	○	9	7.1	○				6.1
2p2-7	2	5.0	○	7	5.0	○				5.0
2p4-8	4	5.0	○	8	5.0	○				5.0
2p5-6	5	7.1	○	6	7.1	○				7.1
2p10-11	10	50.0	○	11	7.1	○				28.6
3p1-4-8	1	5.0	○	4	25.0	○	8	5.0	○	11.7
3p2-4-9	2	54.1	○	4	25.0	○	9	7.1	○	28.7
3p4-10-11	4	45.3	○	10	25.0	○	11	50.0	○	40.1
3p5-6-7	5	45.3	○	6	7.1	○	7	30.4	○	27.6
3p6-10-11	6	7.1	○	10	50.0	○	11	45.3	○	34.1
5p1-2-4-7-9	1	5.0	○	2	54.1	○	4	25.0	○	24.3
	7	30.4	○	9	7.1	○				
5p1-4-5-7-10	1	5.0	○	3	560.3	—	4	25.0	○	217.1
	8	445.0	—	10	50.0	○				
5p2-4-5-7-10	2	54.1	○	3	560.3	—	5	45.3	○	192.9
	8	103.0	—	9	201.6	—				
5p2-5-6-7-11	2	54.1	○	5	45.3	○	6	7.1	○	36.4
	7	30.4	○	11	45.3	○				

表 4.28 推定位置 (比, 10cm, 複数人)

人物位置	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	一人あたり 誤差(cm)
2p1-7	1	10.0	○	7	10.0	○				10.0
2p1-8	1	10.0	○	8	10.0	○				10.0
2p1-9	1	10.0	○	9	14.1	○				12.1
2p2-7	2	10.0	○	7	10.0	○				10.0
2p4-8	4	10.0	○	8	10.0	○				10.0
2p5-6	5	14.1	○	6	14.1	○				14.1
2p10-11	10	50.0	○	11	14.1	○				32.1
3p1-4-8	1	10.0	○	4	20.0	○	8	10.0	○	13.3
3p2-4-9	2	50.0	○	4	20.0	○	9	14.1	○	28.0
3p4-10-11	4	20.0	○	10	50.0	○	11	41.2	○	37.1
3p5-6-7	5	41.2	○	6	14.1	○	7	31.6	○	29.0
3p6-10-11	6	14.1	○	10	50.0	○	11	41.2	○	35.1
5p1-2-4-7-9	1	10.0	○	2	50.0	○	4	20.0	○	25.1
	7	31.6	○	9	14.1	○				
5p1-4-5-7-10	1	10.0	○	3	563.0	—	4	20.0	○	217.2
	8	442.9	—	10	50.0	—				
5p2-4-5-7-10	2	50.0	○	3	563.0	○	5	41.2	○	192.6
	8	103.0	—	9	205.9	—				
5p2-5-6-7-11	2	50.0	○	5	41.2	○	6	14.1	○	35.6
	7	31.6	○	11	41.2	○				

表 4.29 推定位置 (比, 20cm, 複数人)

人物位置	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	一人あたり 誤差(cm)
2p1-7	1	7.1	○	7	7.1	○				7.1
2p1-8	1	7.1	○	8	7.1	○				7.1
2p1-9	1	7.1	○	9	7.1	○				7.1
2p2-7	2	15.8	○	7	7.1	○				11.5
2p4-8	4	7.1	○	8	7.1	○				7.1
2p5-6	5	15.8	○	6	7.1	○				11.5
2p10-11	10	15.8	○	11	7.1	○				11.5
3p2-4-9	2	43.0	○	4	25.5	○	9	7.1	○	25.2
3p4-10-11	4	25.5	○	10	15.8	○	11	45.3	○	28.9
3p5-6-7	5	35.4	○	6	7.1	○	7	25.5	○	22.7
3p6-10-11	6	7.1	○	10	15.8	○	11	45.3	○	22.7
5p1-2-4-7-9	1	7.1	○	2	43.0	○	4	25.5	○	21.6
	7	25.5	○	9	7.1	○				
5p2-4-5-7-10	2	43.0	○	3	564.5	—	5	35.4	○	189.4
	8	105.1	—	9	199.1	—				
5p2-5-6-7-11	2	43.0	○	5	35.4	○	6	7.1	○	31.3
	7	25.5	○	11	45.3	○				

表 4.30 推定位置 (比, 50cm, 複数人)

人物位置	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	一人あたり 誤差(cm)
2p1-7	1	22.4	○	7	28.3	○				25.4
2p1-8	1	22.4	○	8	22.4	○				22.4
2p1-9	1	22.4	○	9	22.4	○				22.4
2p2-7	2	36.1	○	7	28.3	○				32.2
2p4-8	4	28.3	○	8	22.4	○				25.4
2p5-6	5	31.6	○	6	22.4	○				27.0
2p10-11	10	28.3	○	11	31.6	○				30.0
3p1-4-8	1	22.4	○	4	22.4	○	8	22.4	○	22.4
3p2-4-9	2	22.4	○	4	22.4	○	9	22.4	○	22.4
3p4-10-11	4	22.4	○	10	28.3	○	11	22.4	○	24.4
3p5-6-7	5	22.4	○	6	22.4	○	7	22.4	○	22.4
3p6-10-11	6	22.4	○	10	28.3	○	11	22.4	○	24.4
5p1-2-4-7-9	1	22.4	○	2	22.4	○	4	22.4	○	22.4
	7	22.4	○	9	22.4	○				
5p1-4-5-7-10	1	22.4	○	3	585.2	—	4	22.4	○	222.2
	8	452.8	—	10	28.3	○				
5p2-4-5-7-10	2	22.4	○	3	585.2	—	5	22.4	○	189.6
	8	111.8	—	9	206.2	—				
5p2-5-6-7-11	2	22.4	○	5	22.4	○	6	22.4	○	22.4
	7	22.4	○	11	22.4	○				

次に, 1m~3m の結果を表 4.31 から表 4.33 に示す. 1m の場合は一人あたりの誤差が, 人物が 1 人だった場合の平均誤差と同程度かそれ以下あり, 大まかな人物位置をとらえられていると考えられる. 2m の場合は, 複数人全員の位置を識別することはできなかったが, 人数の半数程度は誤差が 30cm 代で良好な結果となった. 3m の場合は 2p2-7 の場合を除き誤差が非常に大きい. 人数の推定に成功しても, ほとんどの場合はそれが偶然の一致であったと考えられる.

表 4.31 推定位置 (比, 1m, 複数人)

人物位置	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	位置 番号	誤差 (cm)	人物 領域	一人あたり 誤差(cm)
2p1-9	1	96.2	—	9	168.1	—				132.2
2p4-8	4	63.6	—	8	96.1	—				79.9
2p5-6	5	101.2	—	6	96.2	—				98.7
3p4-10-11	4	47.4	—	10	319.5	—	11	47.4	—	138.1

表 4.32 推定位置（比，2m，複数人）

人物位置	位置番号	誤差 (cm)	人物領域	位置番号	誤差 (cm)	人物領域	位置番号	誤差 (cm)	人物領域	一人あたり誤差(cm)
2p1-3	1	35.4	—	3	311.8	—				173.6
3p1-3-8	1	35.4	—	3	396.5	—	8	35.4	—	155.8
3p1-4-8	1	35.4	—	4	747.8	—	8	35.4	—	272.9
3p4-10-11	4	480.9	—	10	398.8	—	11	35.4	—	305.0

表 4.33 推定位置（比，3m，複数人）

人物位置	位置番号	誤差 (cm)	人物領域	位置番号	誤差 (cm)	人物領域	位置番号	誤差 (cm)	人物領域	一人あたり誤差(cm)
2p1-3	1	491.2	—	3	528.4	—				509.8
2p2-7	2	151.8	—	7	212.2	—				182.0
2p5-6	5	487.1		6	270.6					378.9
3p1-4-8	1	615.8	—	4	445.3	—	8	503.2	—	521.4
3p6-10-11	6	481.9	—	10	155.1	—	11	517.3	—	384.8

複数人の場合の位置の推定成功率を表 4.34 にまとめる。成功，失敗それぞれに限った推定誤差も記した。誤差はすべて一人あたりの値である。推定点間隔 50cm 以下では，人数，位置ともに成功率が高いといえる。1m では人数の推定成功率は低いが，人物位置の誤差は実用に問題のない水準であった。

表 4.34 位置推定成功率（比，複数人）

測定点間隔	人数	成功数	誤差 (cm)	失敗数	誤差 (cm)	成功率 (%)	平均誤差 (cm)	人数推定成功率 (%)
5cm	2人	7	8.8	0	—	100	9.8	87.5
	3人	5	28.4	0	—	100	28.4	83.3
	5人	2	30.4	2	204.9	50.0	117.7	66.7
10cm	2人	7	14.1	0	—	100	14.2	87.5
	3人	5	28.5	0	—	100	28.5	83.3
	5人	2	30.4	2	204.9	50.0	117.7	66.7
20cm	2人	7	9.0	0	—	100	9.0	87.5
	3人	4	24.9	0	—	66.7	24.9	66.7
	5人	2	26.4	1	189.4	50.0	80.8	50.0
50cm	2人	7	26.4	0	—	100	26.4	87.5
	3人	5	23.2	0	—	83.3	23.2	83.3
	5人	2	22.4	2	206.0	50.0	114.1	66.7
1m	2人	0	—	3	103.6	0	103.6	37.5
	3人	0	—	1	138.1	0	138.1	16.7
2m	2人	0	—	1	173.6	0	173.6	12.5
	3人	0	—	3	366.8	0	366.8	50.0
3m	2人	0	—	3	356.9	0	356.9	37.5
	3人	0	—	2	453.2	0	453.2	33.3

第5章 結論

本研究では、屋内におけるDFL手法の提案を行った。人体は電磁波遮蔽効果を持つことから、無線LAN APの発する電波強度を測定することで人物の位置を推定するというものである。この手法によれば、既存の無線LAN APと安価なセンサを用いることで、低費用かつ汎用性の高い位置推定を行うことができる。

同じ条件下のシミュレーション実験で既存研究の手法と比較すると、既存研究では不可能であった人数の推定が可能となった。人数の推定成功率は測定点間隔が50cm以下の場合でおおむね66%を上回り、人数が3人以下の場合では平均して90%を超えた。また、人物が複数人の場合でもその配置によらず位置を推定することが可能となった。ただし、複数の人物とAPがすべて一直線上に並ぶと推定ができない場合があった。位置の推定誤差は、人数が3人以下かつ測定点間隔が50cm以下の場合でほとんどが30cm以下となり、人数の推定が成功した場合は90%で位置の推定も成功している。

実際の位置推定においては誤差が1m～数m程度であれば十分実用となる。本手法では測定点間隔を1mや2mとしても誤差が2m以下に収まる場合が多かった。ただし、10m×10mの範囲にある測定点数はそれぞれ100点、25点と依然として多い。測定点を多くして誤差を少なくするよりも、1m～数m程度の誤差は許容して測定点数をいかに減らせるかが実用においては重要である。

今回の手法では、いくつかの測定点がまとまって影領域を構成することを前提に人物位置の推定を行っているため、推定点間隔が広い場合には不向きである。APの設置高さを低くすると、人物による電波遮蔽領域が長く伸び影領域が大きくなるため、推定が成功しやすくなると考えられる。この場合、複数の人物の影領域が一体となってしまうことが考えられるが、複数のAPを用いて複数方向から電波が発せられれば、影の伸びる方向が変わるため影領域を分離することが可能となる。実際にはAPが建物内の複数箇所に設置されていることも多いため、評価対象領域をより広範として複数のAPを用いた位置推定を行えばより推定成功率が高まると考えられる。

現状、本手法で十分な推定成功率を保つには測定点間隔を最大50cm程度にとる必要があるため、今後は数m以上での測定点間隔でも位置推定が可能となる位置推定手法について検討を進めたい。

参考文献

- [1] “みちびき（準天頂衛星システム：QZSS）公式サイト - 内閣府”，
<http://qzss.go.jp/>（平成29年1月31日閲覧）
- [2] “IMESとは IMESコンソーシアム”，<http://imesconsortium.org/>
（平成29年1月31日閲覧）
- [3] Nasrullah Pirzada, M Yunus Nayan, Fazli Subhanc M Fadzil Hassan and Muhammad Amir Khan, “Device-free Localization Technique for Indoor Detection and Tracking of Human Body: A Survey, ” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol 129, pp.422 – 429, 2014.
- [4] Tong Xin, Bin Guo, Zhu Wang, Mingyang Li and Zhiwen Yu, “FreeSense:Indoor Human Identification with WiFi Signals, ” eprint arXiv:1608.03430, <https://arxiv.org/abs/1608.03430> , 2016.
（平成29年1月31日閲覧）
- [5] 小久保 昌洋, “無線LANの電波強度変化を利用した屋内位置推定手法, ” 千葉大学工学部都市環境システム学科 平成27年度卒業論文.
- [6] 日下 美穂, 塩田 茂雄, ” 屋内電波伝搬特性解析におけるレイトレーシング法の高速化”, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J98-B, No.7, pp.654-663, 2015.
- [7] G. Liang and H.L. Bertoni, “A new approach to 3-D ray tracing for propagation prediction in cities, ” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.46, no.6, 1998.
- [8] J. Rossi and Y. Gabillet, “A mixed ray launching/tracing method for full 3-D UHF propagation modeling and comparison with wide-band measurement, ” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.50, no.4, 2002.
- [9] 今井哲朗, “電波伝搬推定のための遺伝的アルゴリズムを用いたレイトレーシング処理の高速化法, ” *信学論 (B)* , vol.J89-B, no.4, 2006.
- [10] 河井伸一, 佐納由起子, 川村雅彦, 唐沢好男, “レイトレーシング法における計算対象建物の効果的な判定方法に関する研究, ” *電子情報通信学会技術研究報告. A・P*, 106(302), pp.11-16, 2006.
- [11] 上原一浩, 関智弘, 鹿子嶋憲一, “幾何光学手法による任意指向性アンテナに対する屋内電波伝搬特性解析, ” *信学論*, vol.J78-BII, no.9, pp.11-16, 1995.
- [12] 今井哲朗, “レイトレース法を用いたトンネル内伝搬特性の推定, ” *信学論, B, 通信J85-B(2)*, 2002.

謝辞

今回、本研究にあたりご指導いただいた塩田先生に感謝申し上げます。また、レイトレーシング法シミュレーションプログラムを提供していただいた日下先輩はじめ、研究室の諸先輩方に大変お世話になりました。