

天井設置 UWB センシングによる デバイスフリー屋内行動測位・認識

野村 篤史^{1,a)} Han Lin^{1,b)} 坪内 孝太^{2,c)} 西尾 信彦^{3,d)} 下坂 正倫^{1,e)}

概要：測位端末を携帯していなくても、屋内環境中全ての人の測位を可能にするデバイスフリー屋内測位は、様々なアプリケーションに使用できるため注目されている。現状、社会ではカメラを使用した手法が実用化されているが、プライバシーに配慮できていない。そのため、電波変化を利用した手法が多く研究されている。しかし、それらの多くは、水平に設置した送受信機間の人体による電波通信の妨害を利用するが、人や障害物、測位面積の増加などに簡単に対応することはできない。そこで、天井設置 UWB 機器で取得される床からの反射波を利用した人検知システムを提案する。これにより、人数や測位面積の増加に機器の新規設置のみで簡単に対応できる測位システムの構築が可能になり、水平設置では認識の難しい測位対象者の姿勢推定も可能になる。本研究では、実際に天井に設置した UWB 機器で取得されるデータを用いて、地上の状態の認識精度を評価し、人物の検知、姿勢推定の実現性を示す。また、検知可能範囲の評価も行い、屋内全体での利用可能性についても議論する。

1. 序論

GPS での測位が難しい屋内での位置情報は、様々なサービス、アプリケーションに利用するため注目されている。屋内測位手法の中でも、測位対象者の持つ端末で得られる屋内の基地局からの電波情報を使用し、その位置を推定する手法が多く提案されている。しかし、この手法では、端末を所持していない人、対応するアプリケーションをインストールしていない人の測位は不可能であり、環境中全ての人の測位に対応できないという問題がある。そのため、測位対象者に測位端末の所持を要求しないデバイスフリーでの屋内測位は非常に重要な測位手法である。

現在、社会では、デバイスフリー屋内測位としてカメラがよく使われているが、プライバシーの観点から設置に向かない場所があるといえる。そのため、プライバシー問題を解決した電波を利用した手法が多く研究されている。

電波を利用した手法では、通信への人体の干渉による電波変化をモデリングすることによって、人の位置を推定する。Wi-Fi や UWB(Ultra Wide Band) などの電波の変位

情報を利用して、位置推定をする手法 [1], [2], [3] や、それらより、ノイズが乗りにくい情報として、送受信機間の通信時間情報である ToF(Time of Flight) を利用する手法 [4] が提案されている。電波情報には、個人を特定できる情報が含まれないため、これらの手法は前述のプライバシー問題を解決した手法といえる。

一方、それらの手法は、その測位の特性から、送受信機を離して、人間の活動する高さに配置する必要があるという点で問題がある。屋内は家具があることがほとんどであり、それらによる人体以外の電波干渉は、位置推定精度の低下を引き起こすため、配慮が必要である。しかし、測位環境構築時に、毎度、家具の配置や人の活動を邪魔しないことに配慮して、送受信機の配置位置を決定するのは、労力がかかる。また、屋内環境の複雑さから、最適な配置をすることさえ難しいといえる。そして、家具の移動なども考えると、容易に電波の干渉状態も変化するため、モデルの保守の観点からも、現実的な利用に限界があるといえる。

そこで、本研究では、UWB 送受信機のペアを天井に設置し、地上の人の活動を検知、認識をするデバイスフリー屋内行動測位・認識システムの検討と性能の評価を行う。一地点に設置した UWB 送受信機のペアのアンテナを地上に向け、その反射波を利用することで、地上の一定範囲の検知を行う。そのような送受信機ペアを、測位対象地点の天井に一定間隔で配置することによって、環境全体での測位を行う。人の活動する高さではなく、天井に配置するこ

¹ 東京工業大学

² ヤフー株式会社 Yahoo! JAPAN 研究所

³ 立命館大学

a) nomura@miubiq.cs.titech.ac.jp

b) lin@miubiq.cs.titech.ac.jp

c) ktsubouc@yahoo-corp.jp

d) nishio@is.ritsumei.ac.jp

e) simosaka@miubiq.cs.titech.ac.jp

とで、家具や人体の重なりなどの影響を受けにくい測位システムを実現する。しかし、一箇所の天井設置機器で検知できる地上の状態の限界は明らかではない。漏れのない測位のために、一箇所の機器での検知精度、範囲、人数の限界を明らかにした上でシステムを設計する必要がある。そこで、本研究では、屋内全体での測位システム構築の前段階として、一箇所に設置した機器による検知精度、範囲、人数の限界について評価し、天井設置 UWB センシングの有効性を検証する。

本研究の貢献は以下である。

貢献

- 天井設置 UWB 機器で取得される床からの反射波を利用した人検知システムを提案する。
- 実際に天井に設置した UWB 機器で取得されるデータを用いて、地上の状態推定を実施し、検知精度、範囲、人数の限界を評価する。

関連研究

人体の直接波妨害を利用した電波デバイスフリー屋内測位、状態検知

カメラを使用しない、プライバシーに配慮されたデバイスフリー屋内測位手法として、電波を利用した手法が多く提案されている。Wi-Fi 電波の変位情報を用いたデバイスフリー屋内測位の手法として、人の干渉による RSSI の変化を利用した手法 [1] と、Wi-Fi 送受信機の複数のアンテナで取得される電波の振幅や位相差などの電波の詳しい情報である CSI(Channel State Information) を利用した測位手法 [2] は、多く研究されている。

また、Wi-Fi よりマルチパスに強い電波である UWB のインパルス応答 CIR(Channel Impulse Response) を利用した手法 [3] も提案されている。Wi-Fi CSI や UWB CIR は環境中の変化に敏感に反応するので、位置推定だけでなく、行動認識の分野でも利用されている [5], [6]。加えて、電波の変異情報より、ノイズが乗りにくいとして、Wi-Fi, UWB の送受信機間の通信時間情報である ToF(Time of Flight) を利用した測位手法 [4] も提案されている。

しかし、これらの手法は、人体の送受信機間の通信への干渉による電波変化を利用するため、送受信機を離して、人間の活動する高さに配置する必要がある。この方式は、現実の屋内環境でよく起こる家具の追加や移動、測位対象者の急増による環境の変化に簡単に対応することができないといえる。

対象からの反射波を利用した電波デバイスフリー状態検知

反射波を利用して、対象物の状態をセンシングする電波デバイスフリー状態検知は、いくつかの用途で提案されている。Ahmed ら [7] は、UWB の反射波を、手のジェス

チャー判定に利用し、Piriyajitakonkij ら [8] はベッドの上、数十 cm の地点に配置した UWB 機器によって、真下の人物の睡眠状態の推定を行った。また、Han ら [9] は一定の高さに配置した UWB 機器によって、対象者の転倒検知を行う手法の提案を行っている。

これらのように、電波の反射波を利用した状態検知は提案されているものの、局所的な用途に限られており、屋内環境全体に広がりのある人の位置推定の実現にはまだ研究されていない。

2. 電波デバイスフリー屋内測位

2.1 直接波への電波干渉を利用したデバイスフリー屋内測位

2.1.1 直接波干渉を利用した位置推定の原理

電波デバイスフリー屋内測位では、人体の電波の伝搬経路妨害による電波変化を利用する。通常、送受信機間の通信において、送信機から受信機まで直接伝搬する直接波と回折や反射をして伝搬する間接波が存在する。この直接波と間接波は、環境中の障害物や壁など様々な要因によって変化して受信機へ到達し、受信機ではそれらを合成された電波として捉える。環境の要因によって、その受信電波は変化するので、当然人体による電波の変化も生じる。この人体による変化をモデリングすることによって、デバイスフリー屋内測位は実現されている。

特に、直接波への人体干渉を利用する手法 [4] では、まず、送受信機間の人検知を行う。図 1 のように、送受信機間に人が立ち入ると通常時とは異なり、干渉された電波が受信される。この通常時との違いをモデリングすることによって、送受信機間の通信を人検知センサーのように使用することができる。

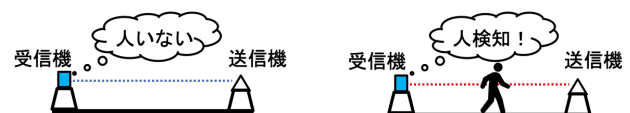


図 1: 人体の直接波干渉を利用した人検知

この人検知を組み合わせることによって、位置の推定が実現される。図 2(a) のように、人の活動する高さに水平に電波送受信機が複数ある環境を考える。この環境で、図 2(b) のように、1 人の人物によって 2 つの直接波の伝搬経路が遮られている場合、2 つの直線上で人が検知される。この時、最も人のいる可能性の高い場所はその交点である左下の場所といえ、その地点を人のいる場所としてモデルは位置推定を行う。同様に図 2(c) のように複数人いる場合も干渉の起きた直接波の経路を組み合わせ、測位を行う。

2.1.2 送受信機の水平設置の測位の限界

直接波への干渉は、人体による電波遮蔽の面積が大きく、電波への変化が起きやすいため、位置推定に利用しやすい。

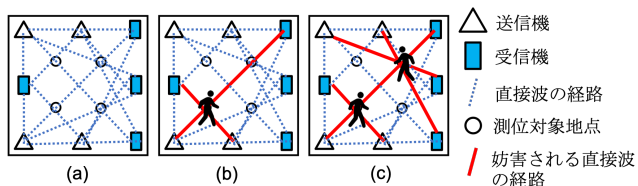


図 2: 人体の直接波干渉を利用した位置推定の原理:
 (a) 測位環境 (b) 測位対象が 1 人の場合の電波干渉
 (c) 複数人いる場合の電波干渉

また、遮蔽面積の大きさから、送受信機を結んだ直線上から多少ずれていても、電波干渉を引き起こすため、1 対の送受信機による検知範囲も広いといえる。

しかし、直接波への干渉を利用するために、水平に電波送受信機を設置する手法は、現実的な屋内環境での利用において、測位に限界が生じる。まず、家具の場所、追加に配慮して、送受信機を配置し、位置推定モデルを作成しなければならないという点である。屋内環境は、家具など人以外の障害物があることがほとんどであり、それらも電波干渉をする。家具による電波干渉が大きすぎる場合、人の位置推定精度の低下に繋がるので、なるべく、家具が電波を妨害しない位置に送受信機は配置する必要があるといえる。加えて、人間の活動範囲や 1 対の送受信機での検知範囲も考慮して配置しなければならない。これらに配慮して、測位環境の構築やモデルの保守をし、十分な測位システムの動作を保証することには限界があり、現実的な屋内空間での利用には即していない。

2.2 天井設置 UWB 機器で取得される地上からの反射波を利用したデバイスフリー屋内測位

2.2.1 反射波干渉を利用した位置推定の原理

本研究では、UWB 送受信機のパアを天井に設置し、下の人の活動を検知、認識するデバイスフリー屋内行動測位・認識システムの提案、検討を行う。受信機では、直接波以外にも様々な経路を通った電波が合成されて受信される。そこで、反射波への人体による干渉を利用した人物の検知を検討する。図 3 のように、一地点に設置した UWB 送受信機ペアのアンテナを地上に向けて通信を行う。この時、人が機器の下にいない時といる時で受信される地上からの反射波は異なる。この電波変化をモデリングすることによって、地上の状態を推定する。UWB は、CIR という形式で高い分解能で電波状態を取得可能であり、また、直進性の高い電波なので、アンテナを下向きに設定すれば、地上からの反射波を受信しやすくと考察し、採用した。この一定範囲の地上の検知が可能な UWB 機器を各測位対象地点の天井に設置することによって、屋内全体での測位が可能になる。

天井設置 UWB 機器を用いることで、水平に送受信機を設置する場合の問題点を解消することができる。まず、障

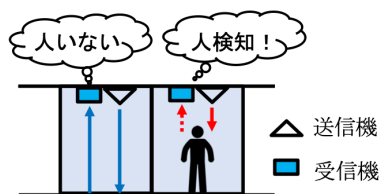


図 3: 人体の反射波干渉を利用した人検知

害物によって、測位対象の人物が遮蔽されることがないため、現実的な屋内環境でも動作が期待される。通常、屋内の人間が活動するスペースは、照明が当たるように天井から地上に遮蔽物は設置されない。そのため、家具の多い屋内環境であっても、問題なく動作ができる。また、水平設置の場合、送受信機が人間の活動を邪魔しない位置に設置しなければならないが、天井の場合、その配慮は不要になる。

このように、天井設置 UWB センシングを用いたデバイスフリー屋内測位は、現実世界の利用に即したメリットがある。

2.2.2 測位実現上の課題

しかし、測位を実現する上で、課題が存在する。まず、人の存在によって、UWB 電波にどれほど影響が出るかが自明ではないということである。直接波への人体の干渉のように大きく通信に影響を与えないため、地上の人物の天井設置 UWB 機器同士の通信への影響は小さく、人検知に有用な変化が起きない可能性もある。そのため、一箇所に設置した UWB 機器によって、人の検知が可能か様々な条件で検証をする必要があるといえる。

また、一箇所に設置した UWB 機器による検知面積や人数も自明ではない。この制限を明らかにしないと、屋内全体での測位実現のために、環境中にどれくらいの密度で UWB 機器を天井に設置する必要があるか判定ができない。そのため、一箇所に設置した UWB 機器による検知可能な範囲や複数人検知の精度も評価する必要がある。

本研究では、章 4 で、天井設置 UWB センシングによる環境全体での屋内測位実現のために、一箇所に設置した UWB 機器による人検知の精度や限界を明らかにする。

3. 天井設置 UWB センシングによる地上の人物の状態推定モデル

3.1 地上の人物の状態推定モデルの概要

本研究では、一箇所の天井設置 UWB 機器によって検知できる、地上の状態の精度、範囲、人数の限界について評価を行い、天井設置 UWB センシングの有効性を検証する。そこで、地上の人物の状態を推定する機械学習モデルを作成し、そのモデルを用いて、評価を行う。使用する機械学習モデルの概要は図 4 のように表される。ただし、収集できる UWB 電波情報の特徴量ベクトルへの変換の方法につ

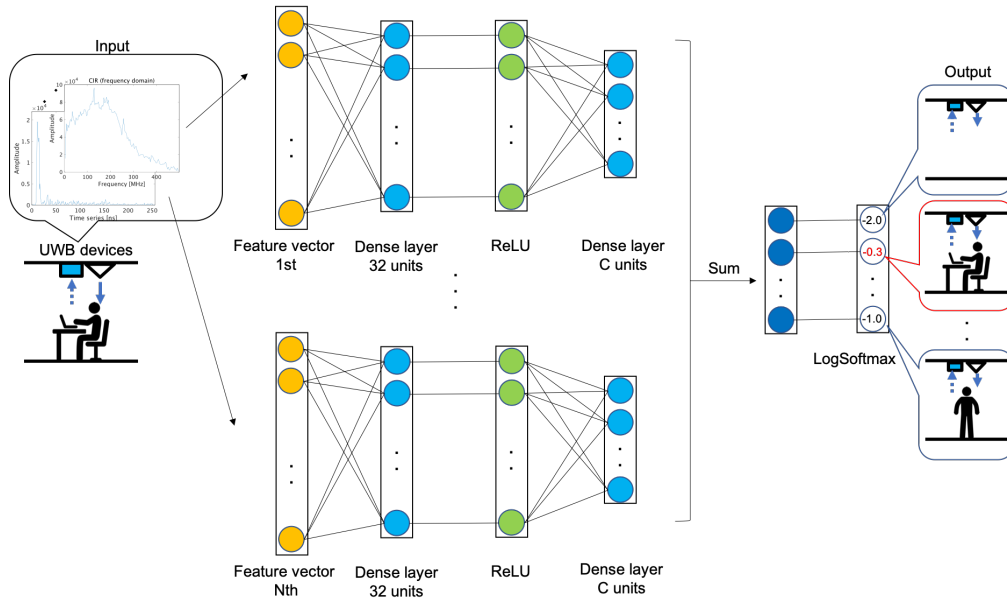


図 4: 地上の人物の状態推定モデルの概要

いては、節 3.2 で詳しく議論する。

この分類モデルでは、まず、天井に設置した UWB 送受信機のペアから得られた UWB 電波情報を入力とし、それらを N 個の特徴量ベクトルに変換する。その後、それぞれの特徴量ベクトルに対して、ユニット数 32、活性化関数 ReLU の隠れ層を持つ MLP により、 C 次元のベクトルに変換を行う。ここで、 C は分類する人物の状態のクラス数とする。こうして変換された N 個の C 次元ベクトルの和を計算し、最終的に LogSoftmax 関数により、 C 次元ベクトルを出力する。このベクトルの要素の中で一番大きい要素のインデックスに対応するクラスに状態を推定する。このように、実際に取得された UWB 電波情報を入力として、多クラス分類するモデルを使用して、地上の人物の状態を推定する。

本研究では、 $C = 2$ として、UWB 機器の下の人の有無を推定するモデル、 $C = 4$ として、デスクに人がいない、うつ伏せ、座り、立ちのどの状態であるかを推定するモデル、 $C = 8$ として、ソファ上のスペースの占有状況を推定するモデルを作成した。このモデルを用いて節 4.3 で人検知、姿勢推定、複数人位置推定の精度、限界を評価する。

3.2 UWB 電波情報の特徴量化

3.2.1 時間領域での特徴量ベクトル

UWB での通信ではその信号の設計から、記録されたデータから CIR(Channel Impulse Response) を抽出することが可能である。この CIR には、複数の伝搬経路を通った電波の情報が含まれており、式 1 のような複素数で表すことができる [10].

$$h(t) = \sum_{k=0}^{M-1} \alpha_k e^{j\phi_k} \delta(t - \tau_k) + n(t). \quad (1)$$

ここで、 α_k, ϕ_k, τ_k はそれぞれ、経路 k を通った電波の振幅、位相、経路遅延時間を表し、 M は伝搬経路の数、 j は虚数単位、 δ はディラックのデルタ関数、 n は加算性白色ガウスノイズを表す。

本研究で使用した Qorvo 製の UWB トランシーバー IC の DW1000 では、約 1ns 間隔で収集された CIR が 1016 サンプル分ずつアキュムレータに配列として格納される [11]. しかし、収集される 1016 サンプルの中の CIR のほとんどがノイズである。そのため、直接波が到達したタイミング付近の CIR 値を抽出して時間領域の特徴量として利用する。UWB 送受信機ペア p から取得される、時間領域の特徴量ベクトル $\mathbf{x}_{\text{time}}^{(p)}$ は式 2 として表される。

$$\mathbf{x}_{\text{time}}^{(p)} = [|h(l-10)|, |h(l-9)|, \dots, |h(l+245)|]^T. \quad (2)$$

ただし、 l は DW1000 で計算される、受信機に最初に到達した電波の CIR 配列インデックスである。この l を用いて、直接波到達より 10 サンプル分前の CIR から 256 サンプル分を抽出し、その振幅値を時間領域の特徴量ベクトルとして利用する。この 256 サンプル分の CIR の振幅値をプロットした例は、図 5 のようになる。

3.2.2 周波数領域での特徴量ベクトル

時間領域の CIR に加えて、各周波数成分についても特徴量として利用する。時間領域の CIR を式 3 で表される離散フーリエ変換により、周波数の異なる成分へと分解し、周波数領域の特徴量として使用する。

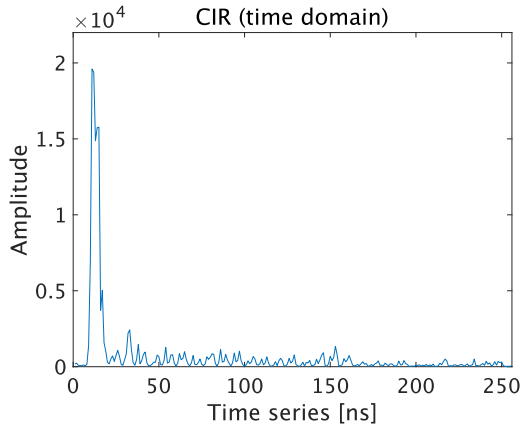


図 5: 時間領域の CIR の例

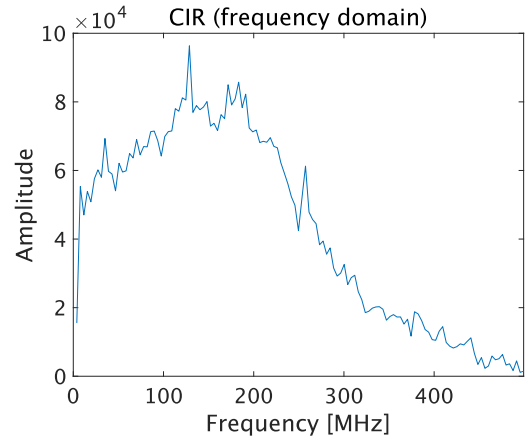


図 6: 周波数領域の CIR の例

$$F(m) = \sum_{n=0}^{S-1} f(n)e^{-j\frac{2\pi}{S}nm} (m = 0, 1, \dots, S-1). \quad (3)$$

$f(n)$ は通常、時間領域の複素関数で、 $F(m)$ は変換後の周波数領域の複素関数を表す。本研究では、時間領域の特徴量ベクトル $\mathbf{x}_{\text{time}}^{(p)}$ を構成する CIR の複素数列に対して、離散フーリエ変換を実施する。そのため、 $f(n)$ は、 $\mathbf{x}_{\text{time}}^{(p)}$ を構成する要素数 256 の複素数列の n 番目に対応するので、式 3 は式 4 のように書き換えられる。

$$F(m) = \sum_{n=0}^{255} h(n+l-10)e^{-j\frac{2\pi}{256}nm} (m = 0, 1, \dots, 255). \quad (4)$$

ここで、離散フーリエ変換によって得られる複素数列の内、 $F(128), F(129), \dots, F(255)$ は負の周波数成分で冗長なので、周波数領域の特徴量ベクトルには使用しない。したがって、UWB 送受信機ペア p から取得される、周波数領域の特徴量ベクトルは、式 5 のように表される。

$$\mathbf{x}_{\text{freq}}^{(p)} = [|F(0)|, |F(1)|, \dots, |F(127)|]^T. \quad (5)$$

CIR のサンプリング周波数が 998.4MHz なので、 $\mathbf{x}_{\text{freq}}^{(p)}$ を構成する要素は、ナイキスト周波数 $998.4/2=499.2\text{MHz}$ までの周波数スペクトルを周波数分解能 $998.4/256=3.9\text{MHz}$ で分解した 128 の振幅スペクトルである。図 5 の時間領域の CIR の例を離散フーリエ変換により、変換した周波数領域の CIR は図 6 のようになる。これらの特徴量ベクトルを入力として、地上の状態を推定する。

4. 性能評価実験

本実験は、一箇所に設置した UWB 機器によって、地上の様々な姿勢の人の検知が可能かの検証、検知可能な範囲や複数人検知の精度の評価を目的として実施した。この実験結果により、天井設置 UWB センシングによる環境全体での屋内測位の実現性や必要な UWB 機器の設置間隔につ

いても議論を行う。

4.1 実験設定

天井設置 UWB センシングの評価実験では、図 7 のような配置で UWB トランシーバー IC の DW1000 が内蔵されているテストキット 4 つを約 2.5m の高さの天井に設置し実施した。4 つの機器は、対向にある機器同士でのみ通信を行い、2 ペアの UWB の CIR を同時に取得した。そのため、本実験では、入力となる特徴量ベクトルは、 $\mathbf{x}_{\text{time}}^{(0)}$ 、 $\mathbf{x}_{\text{freq}}^{(0)}$ 、 $\mathbf{x}_{\text{time}}^{(1)}$ 、 $\mathbf{x}_{\text{freq}}^{(1)}$ の 4 種類を使用する。また、図 7 のようにアンテナは地上を向くように設置した。

実験では、UWB 機器を障害物のない会議室の中央、研究室のデスク用椅子の上、ソファ上の三箇所の天井に設置し、人検知の精度について評価した。

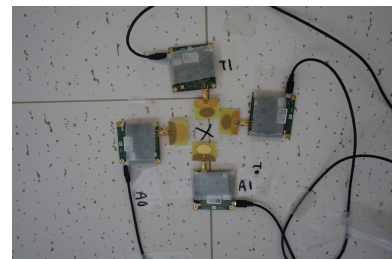


図 7: 天井に設置する UWB 機器。図の上下、左右の機器をそれぞれペアとして通信を行った。

4.2 モデルの訓練と評価

地上の人物の状態推定モデルの訓練は、損失関数に交差エントロピー損失、最適化手法に Adam[12] を用いて実施する。ただし、学習率は 0.001 とした。モデルの訓練と検証データは、各クラスで 90、10 データずつ用意しモデルの最適化に使用した。また、モデルの評価は、学習時とは別の人物のデータを各クラス 50 データ用いて、分類精度の評価を行った。

4.3 性能評価実験結果

4.3.1 直立した人物の検知可能な範囲の評価

まず、一箇所の UWB 機器で人検知の可能な範囲を評価する。図 8 のように、UWB 機器の真下を原点に、1 辺 2m の正方形の範囲を設定し、0.5m 間隔の測位地点それぞれで、人物が直立しているかどうかの 2 クラス分類を実施した。図 9 は、設定した測位地点で人物が直立している例である。

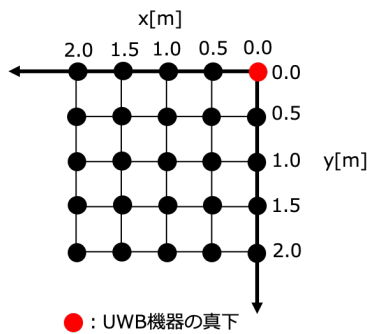


図 8: 1 辺 2m の正方形に 0.5m 間隔で設定した測位対象場所

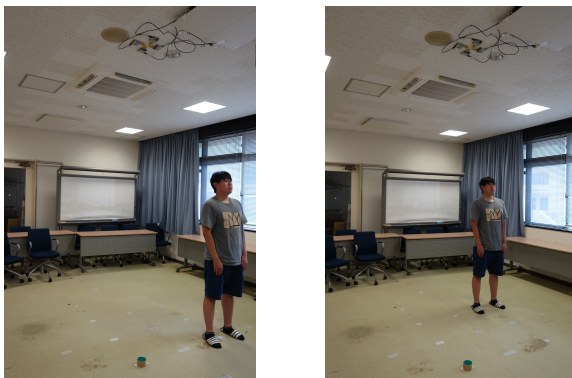


図 9: 人が、 $(x, y)=(1.0, 0)$ (左) と、 $(1.0, 1.0)$ (右) にいる場合の例

各地点での人検知精度を、位置に対応した方眼にまとめると図 10 になる。ここで、2 クラス分類を各地点で行っているため、分類精度が 0.5 に近づくと、UWB データに人の有無による変化が表われにくくなっていることに注意されたい。

まず、図 10 より、UWB 機器の真下から半径 1m ほどの地点では、非常に高精度での人検知を達成しており、特に真下の位置は精度 1.00 で全テストでの人の有無の判定に成功した。このことから、天井設置 UWB 機器によって人検知ができることが、明らかになった。

一方、UWB 機器の真下から 1.5m ほど離れると人検知精度が 0.70 前後に下がることが確認できる。ここで、 $(x, y)=(1.5, 1.5)$ 地点の人検知の混同行列は図 11 のようになる。行列内の数字は、各クラスから 50 データずつを用い

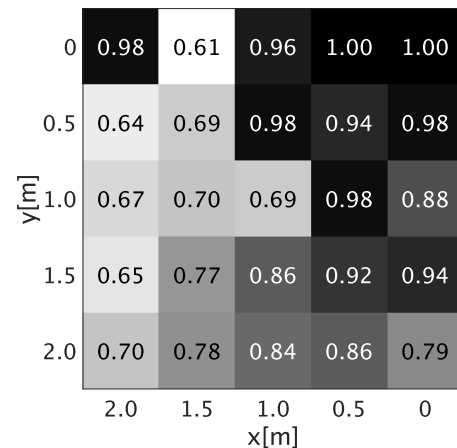


図 10: 各測位点での人検知精度

て、実施した分類テストにおいて、分類されたデータの数を表す。図 11 より、この地点での人検知において、立った人のいる時のデータの内 20 データも、人がいないと誤認識されていることがわかる。これは、人がいるときに引き起こされる反射波への影響が非常に小さくなっていることを示す。つまり、この地点では、人の有無を明確に判断するのは難しいといえる。

これらのことから、人検知が可能な範囲は、UWB 機器の真下から半径 1m 程度だと結論づけられる。そのため、屋内全体での測位時は、一箇所で機器の検知範囲に複数人いないのならば、 $1m \times 2 = 2m$ 間隔で UWB 機器を設置すれば良い。

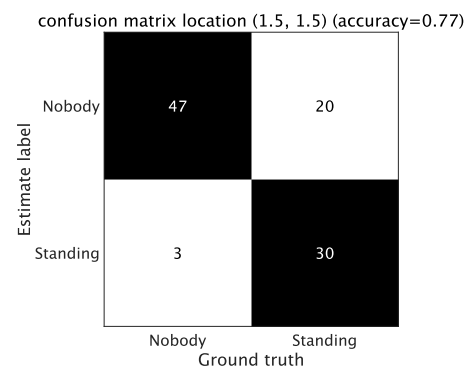


図 11: $(x, y)=(1.5, 1.5)$ 地点の人検知結果

また、図 10 より、 x 方向と y 方向で対称性があまりないことが確認できる。これは、収集時の体の向きに原因があると考えられる。被験者は、常に図 9 の y 軸方向を向いた状態で、データ収集を行った。そのため、天井の UWB 機器から人を観測した時、反射面として捉えられる人体の面積が、位置によって異なる。この面積の大きさが検知精度にも影響したと考えられる。例を挙げると、 $(0.5, 1.5)$ 地点の人検知精度は、0.92 と高いのに、 $(1.5, 0.5)$ 地点は、0.69 と低い。これは、 $(1.5, 0.5)$ より、 $(0.5, 1.5)$ 地点に立った人の方が、天井の UWB 機器に向けている人体の面の面積が大きいため、検知精度も高くなったと考えられる。

4.3.2 障害物環境での人物の検知，姿勢推定精度の評価

次に，障害物環境で，その場所で起こりうる姿勢の人物の検知精度を評価する．最初に，デスクで作業する人物の検知精度を評価する．オフィスなどのデスクが並ぶ障害物環境では，人物が活動する高さに水平に送受信機を設置することは難しく，従来方法では測位が現実的ではない環境である．座っている人物の検知精度は，図 12 の混同行列のようになった．図 12 より，障害物環境かつ，立った状態よりも天井から距離が遠い状態の座った人の検知が高精度で実現できたことがわかる．

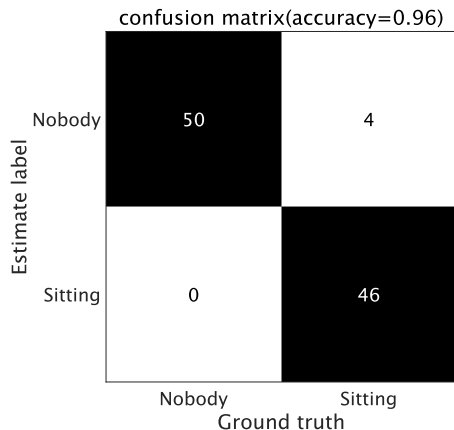


図 12: デスクの椅子に座っている人の検知結果

次に，姿勢推定の可能性について議論をする．デスク作業の中で起こりうる，図 13 のような誰もいない，うつ伏せ，座り，立ちの 4 つの状態の分類を行った．結果は，図 14 のようになった．



図 13: デスク作業中における，誰もいない (左上)，うつ伏せ (右上)，座り (左下)，立ち (右下) の例

図 14 より，分類精度は 0.615 であった．誰もいない，立ちの 2 クラスについては高精度に分類できているのに対し，うつ伏せと座りの 2 クラスについては，誤認識を多くしている．これは，天井から人体までの距離が遠く，姿勢分類に十分な反射の特徴が CIR に表れなかったためだと

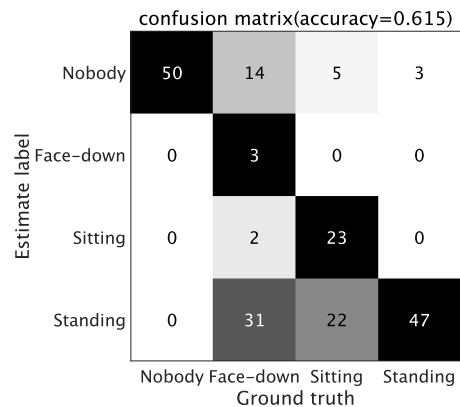


図 14: デスク作業中の人物の姿勢推定

考えられる．

ここで，この 4 クラス分類について，訓練とテストを同じ人の違う時刻で収集したデータを用いて行った場合の結果を図 15 に示す．図 15 より，精度は 0.93 で，高精度に分類できたことが確認できる．以上より，姿勢推定は，訓練とテストで同じ人物のデータを使用すれば，高精度で可能だが，訓練時と別の人物の姿勢推定を高精度で実現するのは，現状難しそうであった．

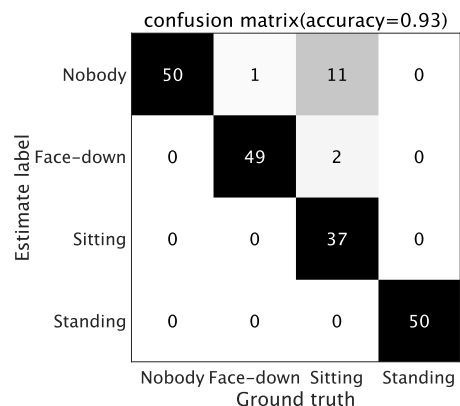


図 15: デスク作業中の人物の姿勢推定 (訓練データにテストと同じ人の違う時刻のデータを使用した場合)

4.3.3 複数人検知の評価

最後に複数人の認識についての評価を行う．ソファ上に図 16 のように設定した A, B, C の三箇所に 0~3 人が座った時の座席の占有状況の分類精度を評価する．図 17 に座り方の例を示す．複数人の位置推定結果は，図 18 のようになった．

図 18 より，複数人での位置推定精度は，0.705 と低い結果になった．混同行列を詳しく見ると，1 人のみの場合の位置推定は非常に高精度にできていることがわかる．しかし，2, 3 人の位置推定は，AB に人がいるのを B のみにいると誤認識したり，ABC に人がいるのを BC に人がいると誤認識してしまっていることがわかる．これらは，似たクラス同士の間違いではあるが，一箇所の天井設置 UWB 機器によって，複数の人物を区別して認識することの難し

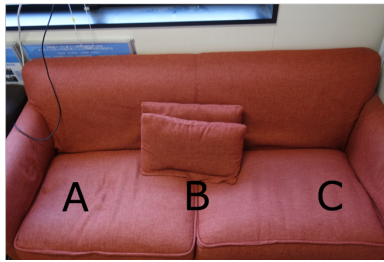


図 16: ソファ上に設定した3つの座り位置



図 17: ソファ上の, BC(左), ABC(右)に人がいる状態の例

confusion matrix(accuracy=0.705)

Estimate label	Nobody	50	1	0	3	0	0	0	
	A	0	49	0	0	0	10	0	
	B	0	0	50	0	37	0	7	
	C	0	0	0	47	0	4	0	
	AB	0	0	0	0	6	0	0	
	AC	0	0	0	0	0	36	0	
	BC	0	0	0	0	7	0	43	
	ABC	0	0	0	0	0	0	1	
		Ground truth							
		Nobody	A	B	C	AB	AC	BC	ABC

図 18: ソファ上の複数人位置推定結果

さを示している。

5. 結論

本研究では、天井設置 UWB 機器で取得される床からの反射波を利用した人検知システムの提案、そして、一箇所に設置した UWB 機器による人検知の精度や限界の評価を行った。実験結果より、UWB 機器の真下を中心に半径 1m の範囲について高精度で人物の検知が可能であり、それ以上の範囲の検知は不安定であることを明らかにした。また、デスク環境など、水平に電波送受信機を置けない環境においても人物の検知を 1.0 に近い精度で達成した。しかし、姿勢や複数人位置の推定は、それぞれ精度 0.615, 0.705 と低かったが、その推定の可能性は確認できた。これらの結果から、天井設置 UWB センシングの有効性を示せ、環境全体でのデバイスフリー屋内行動測位・認識へ展開させた時の一箇所の UWB 機器による性能限界も明らかにできた。

本研究の将来課題として、複数箇所に設置した UWB 機器で連携しての広範囲屋内測位の実現が挙げられる。

参考文献

- [1] Youssef, M., Mah, M. and Agrawala, A.: Challenges: Device-Free Passive Localization for Wireless Environments, *Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '07, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 222–229 (online), DOI: 10.1145/1287853.1287880 (2007).
- [2] Wang, J., Jiang, H., Xiong, J., Jamieson, K., Chen, X., Fang, D. and Xie, B.: LiFS: Low Human-Effort, Device-Free Localization with Fine-Grained Subcarrier Information, *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 243–256 (online), DOI: 10.1145/2973750.2973776 (2016).
- [3] Wang, Z., Liu, H., Xu, S., Gao, F., Bu, X. and An, J.: Towards robust and efficient device-free localization using UWB sensor network, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 41, pp. 451–469 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.03.006> (2017).
- [4] Nomura, A., Sugasaki, M., Tsubouchi, K., Nishio, N. and Shimosaka, M.: Device-Free Multi-Person Indoor Localization Using the Change of ToF, *2023 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 190–199 (online), DOI: 10.1109/PERCOM56429.2023.10099384 (2023).
- [5] Chen, Z., Zhang, L., Jiang, C., Cao, Z. and Cui, W.: WiFi CSI Based Passive Human Activity Recognition Using Attention Based BLSTM, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 18, No. 11, pp. 2714–2724 (online), DOI: 10.1109/TMC.2018.2878233 (2019).
- [6] Sharma, S., Mohammadmoradi, H., Heydari, M. and Gnawali, O.: Device-Free Activity Recognition Using Ultra-Wideband Radios, *2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 1029–1033 (online), DOI: 10.1109/ICNC.2019.8685504 (2019).
- [7] Ahmed, S. and Cho, S. H.: Hand Gesture Recognition Using an IR-UWB Radar with an Inception Module-Based Classifier, *Sensors*, Vol. 20, No. 2 (online), DOI: 10.3390/s20020564 (2020).
- [8] Piriyahtakonkij, M., Warin, P., Lakhan, P., Leelaarporn, P., Kumchaiseemak, N., Suwajanakorn, S., Pisanpanit, T., Niparnan, N., Mukhopadhyay, S. C. and Wilaiprasitporn, T.: SleepPoseNet: Multi-View Learning for Sleep Postural Transition Recognition Using UWB, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol. 25, No. 4, pp. 1305–1314 (online), DOI: 10.1109/JBHI.2020.3025900 (2021).
- [9] Han, T., Kang, W. and Choi, G.: IR-UWB Sensor Based Fall Detection Method Using CNN Algorithm, *Sensors*, Vol. 20, No. 20 (online), DOI: 10.3390/s20205948 (2020).
- [10] Fontaine, J., Van Herbruggen, B., Shahid, A., Kram, S., Stahlke, M. and De Poorter, E.: Ultra Wideband (UWB) Localization Using Active CIR-Based Fingerprinting, *IEEE Communications Letters*, Vol. 27, No. 5, pp. 1322–1326 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3254146 (2023).
- [11] : DW1000 USER MANUAL, <https://www.qorvo.com/products/d/da007967>.
- [12] Kingma, D. P. and Ba, J.: Adam: A method for stochastic optimization, *arXiv preprint arXiv:1412.6980* (2014).