

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04532

研究課題名（和文）消防活動支援のための屋内人物検知方法の開発

研究課題名（英文）Development of a method of detecting human presence in a building for supporting firefighting operations

研究代表者

梶原 康博 (Kajihara, Yasuhiro)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：70224409

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：建物から離れた場所から建物内部の人物の位置を検知できる方法が開発された。これまでのレーダ技術では、建物内の人物からの反射波と多数の家財等からの反射波を分離できる有効な方法が見つかっていない。建物内の壁及び家財等と人体とではレーダから送信された反射波の信号強度および位相の変動量が異なる。この点に着目して目視では見えない壁背面の人物を検知できる技術が開発された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、建物から離れた場所から建物内の人物をレーダにより検知できる技術が開発された。社会的意義の観点からは、建物火災において逃げ遅れ者の有無および位置を建物の外からリアルタイムに検知することが可能となり、人命救助、消防隊員への的確な指示と安全確保に役立つことが挙げられる。学術的観点からは、レーダ反射波の信号強度と位相の変動量から壁背面人物を検知できる数理モデルを構築できることが実験的に確認されたことが挙げられる。

研究成果の概要（英文）：A method has been developed to pinpoint a location of human presence in a building from a location away from the building. The conventional radar techniques have not established an efficient method capable of separating waves reflected from human presence in a building from those from a number of household goods. The radar waves reflected from the walls and household goods in a building are different from those reflected from a human body in signal strength and amount of phase fluctuations. A focus on this has led to the development of new techniques capable of detecting a person behind a wall, who is invisible to the eye.

研究分野：経営工学

キーワード：レーダー 防災活動 人物検知

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

令和元年防災白書によれば、建物火災における最大の死亡理由は逃げ遅れと報告されている。逃げ遅れ者の位置を建物の外からリアルタイムに検知できれば、人命救助、消防隊員への的確な指示と安全確保に役立つことが期待される。すでに横浜市消防局により逃げ遅れ者検知方法が開発されている。この方法では、マンション室内等の閉鎖空間が対象とされ、濃煙環境下において赤外線カメラおよび76GHz帯ミリ波レーダにより人物が検知される。これら二つの方法は、壁等の赤外線およびミリ波レーダ電波の伝搬を遮る障害物が無いことが前提とされており、壁で区切られた複数の部屋がある建物に対しては、逃げ遅れ者の検知に用いることが難しい。他に、超広帯域無線通信(UWB)レーダを用いて壁背面の人物までの距離を測定する方法がCamero-Tech社およびFadel Adib等により開発されている。Camero-Tech社の技術は壁背面から人物までの距離を推定できるが、高額である。Fadel Adib等の方法は複数の受信アンテナを用いることにより壁背面の人物の頭、胴、腕などの部位ごとに3次元位置を測定することができる。両方法は、レーダから人までの距離の測定に周波数連続変調(FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave)法が用いられている点、壁にレーダアンテナを接触させる必要がある点および複数の壁が存在することは想定されていない点が共通している。以上の先行研究を鑑みれば、火災が発生している建物から離れた場所から建物内の人物を検知する方法としてはレーダが最も有効と推察されるが、国内外においてこれまでに実現された例がない。

### 2. 研究の目的

レーダ技術を用いれば、壁背面の家財および人物からの反射波を解析することにより人物の検知が可能となる。しかし、現状のレーダ技術では、反射波から物体が家財であるか人物であるかを判別できる有効な方法が見つかっていない。本研究では従来のレーダによる物体検知方法では活用されていない反射波の信号強度および位相の変動に着目する。建物内の壁および家財等と人体とは反射波の信号強度および位相の変動量が異なる。この現象を利用して、統計的方法を用いて物体までの距離を測定するとともに、家財か人物であるかを判別できる推定モデルを求める。

### 3. 研究の方法

(1) 周波数連続変調(FMCW)レーダにより壁背面人物を検知する方法を開発し、実機による検証を行う。レーダから時間と共に周波数が増減するチャープ信号を送信し、送信波と物体からの反射波を短時間フーリエ変換することにより周波数差を求める。得られた周波数差からレーダから物体までの距離および信号強度を求める。人は呼吸、歩行などによりレーダからの距離が変化し、壁等の物体は距離が一定となる。この関係を基に信号強度が時間経過に伴い変化する区間を求めることで人がいることを検知する。開発した方法を無人搬送車に実装することにより、無人搬送車が部屋から出る前に壁を透視して通路上の人の有無を検知できることを確認する。

(2) FMCWレーダでは、ドアノブ、床など人以外からの反射波であるクラッタ(不要波)が多く検出されるため、人を高精度に検知することが難しいという課題がある。パルスレーダはクラッタを抑制できることが知られている。そこで、パルスレーダにより壁背面の人物を検知する方法を開発する。パルスレーダでは、パルス波の往復時間から物体までの距離を測定する。家具等の静止物体の反射波信号強度は強いが位置が不変であることから受信波の位相変動は小さい。人からの反射波の信号強度は小さいが、呼吸や重心動揺などにより位相変動が大きい。そこで、信号強度および位相変動を特徴量とし、壁背面の物体が人であるか物であるかを推定するための推定モデルを交差検証法により求める。以上の方法を実装し、電波暗室にて壁背面の人物を検知する実験を行い、計画通りに壁背面の人物を検知できることを確認する。

### 4. 研究成果

#### 4.1 周波数連続変調(FMCW)レーダによる壁背面人物検知方法

##### (1) システム構成

FMCWレーダシステムの構成を図1に示す。一般的なFMCWレーダは、送信波として、周波数をのこぎり波状に変調した連続波を用い、これを送信アンテナから外部に放射し、壁や人物などの対象物からの反射波を受信アンテナにより受信する。このとき、送信波と反射波の周波数差から遅れ時間を求め、この遅れ時間と対象物までの距離が比例することを利用して、観測対象までの距離が測定される。し

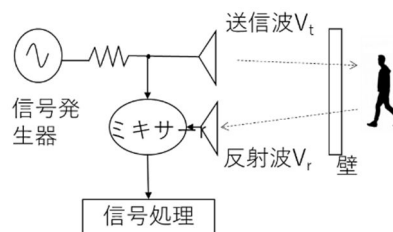


図1 システム構成

かし、反射波には人物だけでなく、壁や柱などの検出したい対象からの反射波（クラッタ）も多く含まれるが、人物とクラッタとを判別する方法はまだ開発されていない。本研究では、人の場合には呼吸、重心動揺などにより反射波の位相が変化する現象を活用する。FMCW 法により観測対象までの距離を測定するとともに、検知物体の移動速度および位相を変数として判別分析等の統計的方法を用いて人物とクラッタを判別する。

(2) 人物判別方法

FMCW レーダによる測定例を図2に示す。屋外にレーダを置き、外壁を透過して建物内の廊下を移動する人物の検知を試みている。図2右下は、横軸に経過時間、縦軸にレーダからの距離を表し、信号強度が高いほど白丸の輝度値を高く示している。図2右上は、横軸はレーダからの距離、縦軸は信号強度および位相を表し、ある時刻における測定結果を示している。図2より、人物とともに多くのクラッタが検知されていることが視認される。そこで、任意の時刻において、レーダから一定間隔で複数地点の信号強度と位相を入力ベクトル、壁背面での人の有無(0または1)を出力値とする入出力のペアを求める。この操作を繰り返し、入出力のペアを複数組求め、データセットとする。そして、入力ベクトルから出力値を推定できるように交差検証法を用いて推定モデルを求める。推定モデルとしては、判別分析、決定木、ニューラルネットワークなどが仮定される。以上の方法により FMCW レーダによる測定値を基に壁背面の人物の有無および位置を検知する。

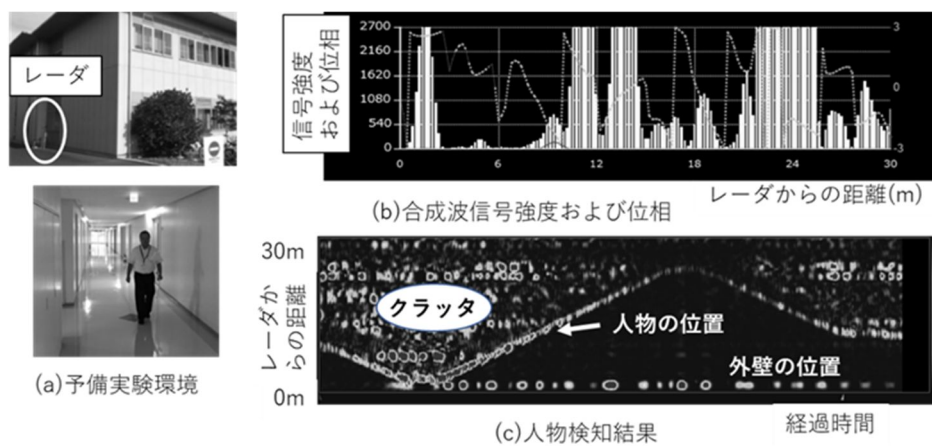


図2 FMCW レーダ測定例

(3) 適用例

提案方法を無人搬送車に実装した。無人搬送車が室内から通路に出る前に壁背面の通路の人の有無を FMCW レーダにより事前に検知することを試みた。図3は実験環境の模式図を表す。この無人搬送車は、自己位置を Lidar による周囲の3次元データを基に測定できる。予め移動経路を設定している。Lidar により測定された自己位置および進行方向と予め設定されている移動経路とのずれを測定し、PID 制御により左右駆動輪の速度差を調整することにより進行方向が制御される。無人搬送車の構造については紙面の制約により割愛する。図4は無人搬送車が部屋の出口手前で静止している様子を表す。レーダにより壁背面の廊下側の人の検知を行っている。壁背面に人が検知されている間は無人搬送車が停止状態を維持し、人がいないことが確認された後に通路に出て荷物を所定の場所まで搬送し、再び室内の初期位置まで所定の移動経路を通り返ることができた。クラッタは発生したが、統計的推定モデルを用いることにより壁背面の人物を検知できるレーダを実装できることが確認された。

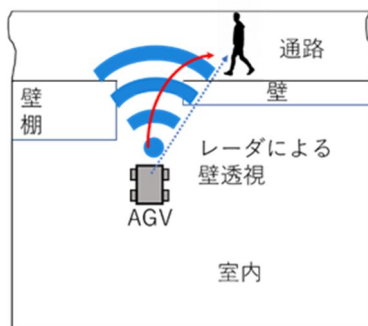


図3 実験環境

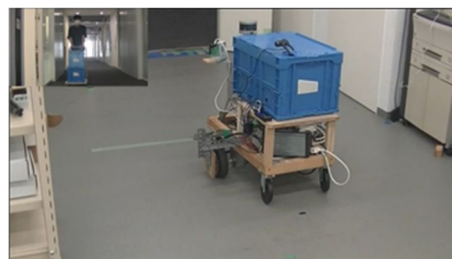


図4 壁背面人物検知の様子

## 4.2 パルスレーダによる壁背面人物検知方法

パルスレーダを用いて壁背面の物体までの距離および物体が人かモノであるかを判別する方法を開発した。

### (1) システム構成

信号発生器、送受信アンテナ、オシロスコープおよび PC により構成した。搬送波の周波数として 2.4GHz(周期 0.41ns)を用いた。(図 5)

### (2) 実験環境

提案方法の有効性を検証するために 3m 法電波暗室において壁背面の人物検知実験を行った。壁として一般住宅において広く使用されている構造用合板(縦 1.82m、横 0.92m、厚さ 12mm)を用いた。実験室の奥行き制限を考慮してパルス送受信アンテナから壁までの距離を 1.8m とした。壁背面の物体は冷蔵庫および 2 名の被験者とした。

### (3) パルス波仕様

レーダ最大探知レンジは実験室の奥行き(5m)よりも十分に大きくとる必要があるため 24m とした。物体を識別できる最小距離を歩幅 2 歩に相当する 1.4m と仮定した。この条件を満たすパルス送信時間間隔は 160ns、パルス幅は 9ns と計算された。搬送波の周波数は 2.4GHz(周期 0.41ns)とした。(図 6)

### (4) 反射波信号強度の変動

壁背面から 2.5m の位置に対象を置き、反射波を測定した。モノ(冷蔵庫)からの反射波の結果を図 7 に、人からの反射波の結果を図 8 に示す。図 7、8 より、人からの反射波の信号強度はモノと比べて顕著に小さいが、呼吸および重心動揺の影響で位相が変動することにより、反射波信号強度の変動(分散)に関しては結果としてモノの場合と同程度の顕著な値となること、そして位相の変動はモノよりも顕著に大きくなることが観測された。

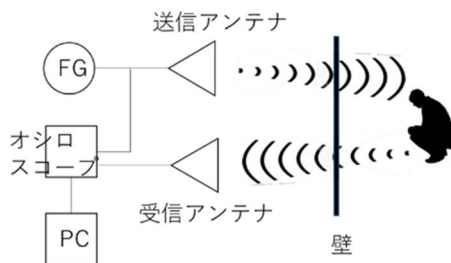


図 5 システム構成

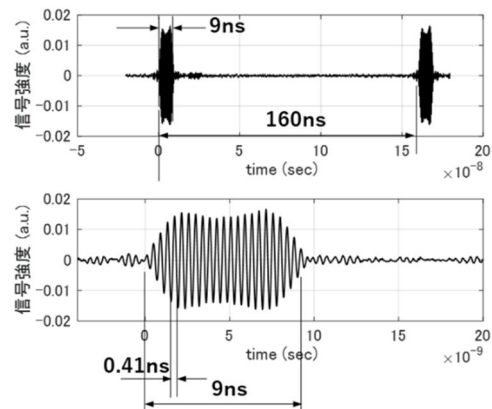


図 6 パルス波仕様

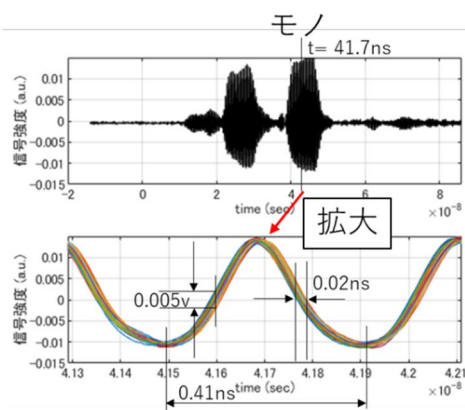


図 7 モノからの反射波信号強度の変動

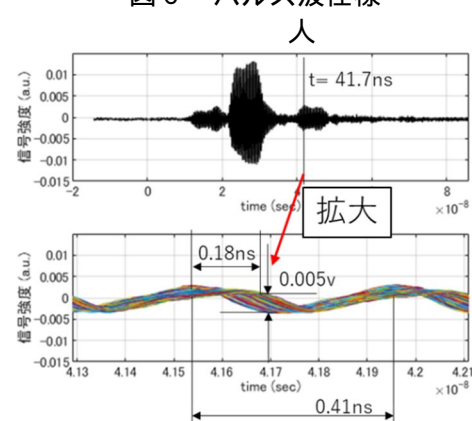


図 8 人からの反射波信号強度の変動

### (5) 推定モデルの設定

壁から対象までの距離を変えて、3 つの特徴量(信号強度、信号強度の変動、位相の変動)を測定した。その結果を図 9 に示す。信号強度の変動および位相の変動に関して縦軸は対数表示している。3 つの特徴量を用いて交叉検証法により推定精度を比較することで物体の種別推定のため

の推定モデルを選択した。その結果、部分空間 KNN 法の推定精度が 1 となったことから本実験環境においては部分空間 KNN 法を推定モデルとした。

(6) 未知データに対する推定

推定モデル(部分空間 KNN)を用いて未知データに対して推定を行った。例として壁背面 2.3m の位置に人を立たせて反射波を測定したときの結果を図 10 に示す。上段は反射波信号強度、中段は 10 秒間の信号強度の変動(片対数表示)、下段は位相変化を表す。

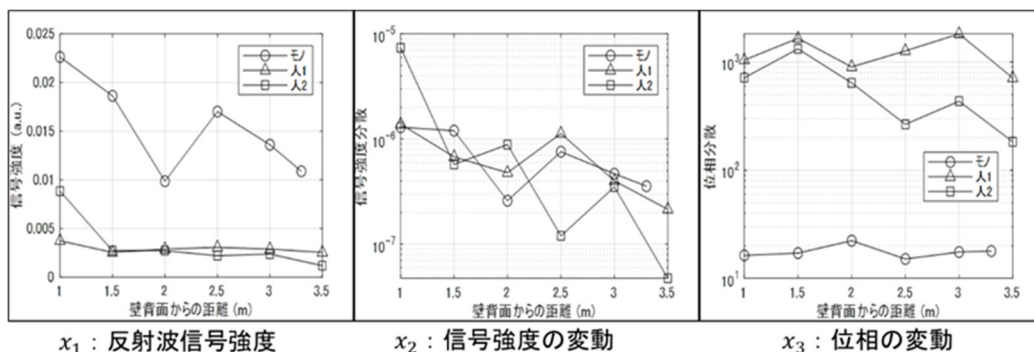


図 9 壁背面からの距離と 3 つの特徴量の関係

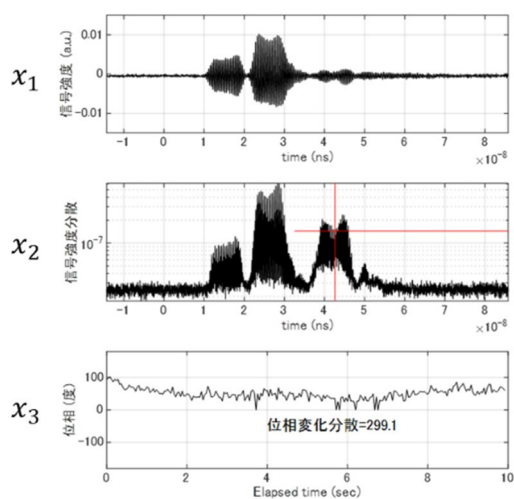


図 10 人が壁から 2.3m の位置の特徴量

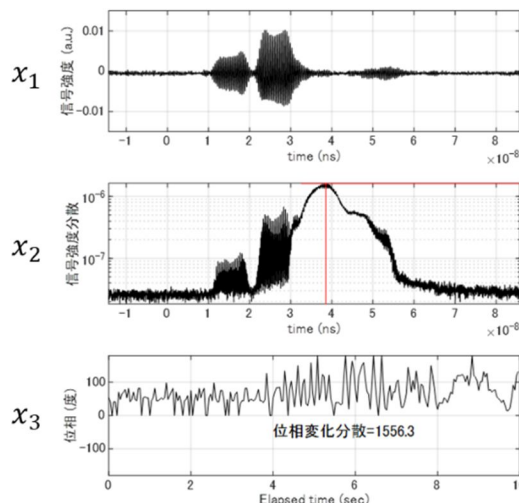


図 11 壁背面を人が歩行時の特徴量

上段の信号強度のみでは人の位置を捉えることは難しいが、中段の信号強度の変動からは壁と人の位置が明瞭に区別して捉えられていることが分かる。求めた対象の位置で得られた特徴量を用いて推定モデルにより対象の種別を推定した結果、種別は人と正しく推定された。また、パルス往復時間から算出した送受信アンテナから対象までの距離は 4.3m と推定された。したがって、壁背面から人までの距離は 2.5m となり、位置推定誤差は 0.2m となった。同様に対象がモノ(冷蔵庫)の場合や人が歩く(図 11)、屈むなどの移動を伴う動きの場合も明確に推定可能であった。また得られた結果から人の姿勢も推定できるという可能性が示唆された。

(7) 結果

パルスレーダを用いて壁背面の人物検知を行った。対象までの距離を反射波の往復時間から求め、反射波信号強度、周波数発生器の性能に起因する信号強度の変動および人の呼吸や重心動揺に起因する位相の変動の 3 つの特徴量を用いて推定モデルを作成することにより、対象が人であるかモノであるかを推定する方法を提案した。実験の結果、壁背面の静止している人とモノを計画通り推定でき、屈む、歩行などの移動を伴う動作においても同様に推定できることが確認された。また人の位置および姿勢も推定できるという可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Jinyu Zhang, Yasuhiro Kajihara
2. 発表標題 Application of radar technology to indoor person detection
3. 学会等名 15th International Conference on Industrial Managemen (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Kajihara
2. 発表標題 Methods of Indoor Location Measurement and Human Detection for an AGV System used for Order-Picking in Warehouses
3. 学会等名 The 8th Annual Conference of AnalytiX (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大島海斗、梶原康博
2. 発表標題 無人搬送車用センサに関する研究
3. 学会等名 日本経営工学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 笠置泰誠、梶原康博
2. 発表標題 パルスレーダによる壁背面人物検知方法に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会・電磁界理論研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------