

TV 受信波を用いたヒト検知システムにおける時間ダイバーシチの適用

坂本 靖紀 高橋 茂 西 正博 吉田 彰顕
広島市立大学大学院 情報科学研究科 情報メディア工学専攻

あらまし 本研究室では新しい防犯システムとして、UHF 帯 TV 受信波を用いたヒト検知システムを提案している。現在のシステムでは、1 秒前との受信レベルの変動幅（以下、変動レベル）を解析し、そのレベルがある閾値を超えるか否かで室内のヒトの有無を識別している。しかし、ヒトの動きは様々であり、1 秒前との変動レベルのみでは確実に検知できない動きがある。したがって、ヒトの動きに対する様々な受信レベル変動にも対応できるような、より高精度な検知方法の検討が必要である。本研究では、様々な受信レベル変動の検知を実現するため、時間ダイバーシチ（TDD : Time Delay Diversity）の概念を取り入れ、様々な時間差による変動レベルを用いる新たなヒト検知方法を検討した。本提案方法を適用した実験結果より、ヒト検知確率が 30%改善できることを明らかにした。

Application of Time Delay Diversity to Human Detection System
Using TV Receiving WavesYasuki Sakamoto, Shigeru Takahashi, Masahiro Nishi, and Teruaki Yoshida
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University,
3-4-1, Ozuka-higashi, Asa-minami-ku, Hiroshima, 731-3194, Japan

Abstract We have proposed the new human detection system using UHF band TV receiving waves. This system can detect the human presence in a room by monitoring whether the fluctuation level that is the difference of the received levels every one second exceeds a threshold or not. However, this system has a possibility of overlooking some fluctuation levels due to human various movements. Therefore, in our system, it is necessary to investigate the high accuracy detection method which can response various fluctuation levels with fading durations more or less than one second. In order to achieve the detection of the various fluctuation levels, we have studied the new human detection method with the Time Delay Diversity (TDD) technique.

1. はじめに

現在、安心で安全な社会の実現への需要が高まっている。特に、一戸建ての家屋およびマンションなどの住居への不正侵入に対する防犯意識が高まりつつある。また単独で生活している高齢者の世帯数も増加傾向にある。これらの状況の下、ヒトの侵入や異常を検知することを目的として、主に赤外線やマイクロ波帯電波を用いた、多くのシステムが開発され、市販されるようになってきた[1]。

著者らはこれまで、伝搬特性の優れた UHF 帯電波を用いた無線通信環境の構築を目指し、屋外、屋内の様々な場所における、UHF 帯 TV 放送波の電波伝搬特性を研究してきた[2]。屋内における TV 放送波の受信特性を調べるため測定を行っていた際、屋内にヒトが存在した場合に電波の受信レベルがヒトの動きに応じて変化することを経験した。

この経験が基となり、著者らはヒトの侵入や異常を検知することを目的として、新たに TV 受信波を用いたヒト検知システムを提案し、その検知エリアや検知確率などの検知性能を評価してきた[3][4]。本システムでは公共性の高い、安定した出力で送信されている UHF 帯 TV 放送波を用いる。したがって

送信機を新たに設置する必要は無く、受信系のみでシステムを構築することができる。また、本システムは屋内において必然的に生じる電波のマルチパスフェーディングや、ヒトによるシャドウイングに起因した受信レベル変動によりヒトを検知するものである。本システムは、従来の赤外線やマイクロ波帯電波を用いたシステムでは困難であった、部屋全体にわたるヒトの検知ができる特徴を有する[4]。

現在のシステムでは、1 秒前との受信レベルの変動幅（以下、変動レベル）を解析し、そのレベルがある閾値を超えるか否かで室内のヒトの有無を識別している。しかし、ヒトの動きは様々であり、1 秒前との変動レベルのみでは確実に検知できない動きがある。受信レベル変動をより細かく観測すると、1 秒より速い変動や遅い変動が存在し、現在のヒト検知システムはこの変動を検出できていない可能性がある。したがって、ヒトの動きに対する様々な受信レベル変動にも対応できるような、より高精度な検知方法の検討が必要である。

本研究では、様々な受信レベル変動の検知を実現するため、時間ダイバーシチ（TDD : Time Delay Diversity）の概念を取り入れ、複数の時間差による

変動レベルの値を用いる新たなヒト検知方法を提案する。そして、実際の実験結果を踏まえ、TDDを適用したヒト検知システムにおける検知確率の改善効果を示す。

本論文の構成は以下のとおりである。2.では、UHF帯TV受信波を用いたヒト検知システムの概要を述べる。3.では本提案方法の評価をするための測定方法ならびに測定諸元を述べる。4.ではヒトの動きに伴って変化する受信レベル変動の特徴を、自己相関係数により定量的に示す。5.ではヒト検知システムに適用するTDDについて述べる。6.では、TDDを適用することによって、ヒトの動きをより精度よく検出できることを変動レベルの累積確率や検知確率の実験結果に基づき示す。7.はまとめであり、本論文の結論および今後の研究課題について述べる。

2. TV 受信波を用いたヒト検知システム

2.1. システムの原理

図1にTV受信波を用いたヒト検知システムの原理を示す。屋内環境では、床や壁などの金属製物体において電波が反射し、複数の電波経路が生成されるマルチパス環境となっている。TV放送波は、居室までの空間ではほぼ直接到来するが、屋内に入った後、反射を繰り返すことにより、マルチパス環境を構成する。屋内にヒトがいない場合、屋内のマルチパス環境は変化しないため、安定したレベルで電波を受信できる。一方、屋内にヒトがいる場合、ヒトの動きにより反射波の経路が変わるため、受信される複数の電波の位相および振幅が変化し、受信レベルは大きく変動する。

このように本ヒト検知システムは、ヒトの動きにより受信レベルが変動することを利用し、屋内のヒトの有無を検知しようとするものである。

2.2. システムの構成

図2にシステムの基本構成を示す。本システムは、受信部より受信レベルを取得し、検知部よりデータ解析を行い、ヒト検知を実現する。

受信アンテナには、マルチパス電波を効果的に受信するために、指向性の広いモノポールアンテナを利用する。また、TV放送波を受信するため、送信機の必要がなく、受信機のみでシステムを構成することができる。このため、システムをシンプルに構成することができる。

2.3. TV 受信波の特徴

送信源として着目したNTSC-TV放送波は、映像搬送波、色副搬送波、音声搬送波の3つの搬送波から構成されている。我々はその搬送波の中でも、音声搬送波は他の放送波と比較してレベル変動が少ないことを確認した[3]。音声搬送波が他の搬送波に比べ安定している理由としては、映像信号および色信号はAM変調であり、被変調信号の内容により変動するのに対し、音声信号はFM変調であり、被変調

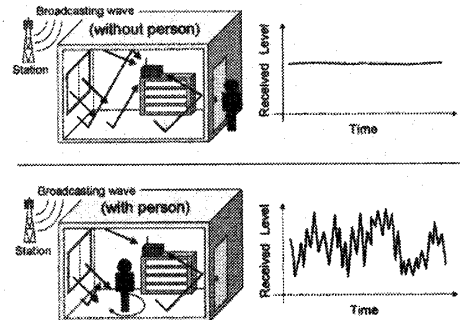


図1：ヒト検知システムの原理

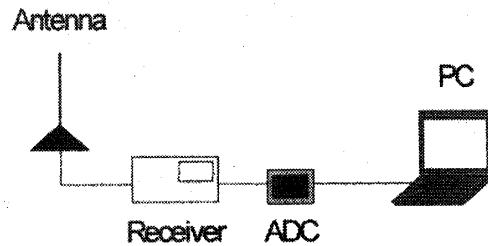


図2：システムの基本構成

信号の内容によらず定振幅であるからである。このため、本実験で用いた受信機では、音声信号の受信レベルはほとんど一定となる。つまり、ヒト検知に必要な安定した送信源として、TV信号における音声搬送波が利用可能である。

3. ヒト検知システムの測定諸元

3.1. 測定システム構成

表1に本測定で用いた電波測定システムの諸元を示す。受信アンテナには、長さが波長 λ の4分の1（およそ10~15cm）であるモノポールアンテナを用いた。アンテナで受信された電波は、受信機で検波され、A-Dコンバータを介してデジタルデータに変換後、PCで連続記録される。受信アンテナ高は、机の高さと同程度である75cmとした。また、測定に用いた受信機の3dB帯域幅は230kHz、応答速度の限界は500msである。

3.2. 測定環境

図3、図4に実験を行った測定環境を示す。測定は6階からなる広島市立大学情報科学部棟別館の5階（図3：測定部屋①）、また8階からなる広島市立大学情報科学部棟の8階（図4：測定部屋②）の室内で行い、測定システムは部屋の中心に設置した。測定室内の材質は基本的な骨組みが軽量鉄骨で、床面はビニールシート張り、壁材に石膏ボードを使用している。測定部屋①および測定部屋②の広さはそれぞれ、6.8m×6.9m×3.0mの約47m²、3.5m×6.9m×3.0mの約24m²である。各測定部屋には机と椅子およびホワイトボードやスチールロッカ等の材料に金属が含まれる什器が置かれている。また、窓の片面には金属製の網戸が設置されている。

3.3. 測定諸元

表2に測定に利用した放送局の諸元を示す。測定で利用した放送局は、広島市立大学からの距離が最も近い己斐放送局とした。本放送局は、測定部屋①および測定部屋②からそれぞれ南へ1.8 km, 1.9 km離れた場所に存在する。また、各測定部屋と放送局の間には遮へい物となる山や建築物がなく、見通し(LOS: Line Of Sight)伝搬路が存在する環境である。また、各測定部屋の標高は放送局の標高(445.8 m)より約200 m低く、放送波が測定部屋にほぼ水平に入射する環境である。本測定では、己斐放送局より送信されているCh.38の音声搬送波(625.75 MHz)を利用し測定を行った。

4. ヒトの動きに伴う受信レベル変動

4.1. 様々な動きに伴う受信レベル変動

現在のシステムでは、1秒前との変動レベルを解析し、その値がある閾値を超えるか否かで室内のヒトの有無を識別している[4]。しかし、ヒトの動きは様々であり、1秒より速いもしくは遅い受信レベルの変動がある。

図5, 図6に、それぞれ移動速度2.0 [m/s], 0.5 [m/s]のヒトが測定部屋①に存在している場合の受信レベルの変動の測定例を示す。図5より、1秒よりも短い間隔で大きく受信レベルが落ち込んでいることを確認することができる。また、図6からは数秒かけて受信レベルが大きく落ち込んでいることが分かる。つまり、1秒前との変動レベルを求めるだけでは、様々なヒトの動きに伴う受信レベルの変動を見逃してしまう可能性がある。

したがって、様々な移動速度のヒトの動きを高精度に検知するためには、複数の時間差における変動レベルの値を用いることが有効である。

4.2. 自己相関係数

自己相関係数とは、ある時系列データと数タイムステップずらしたデータ間の相関の高さを表すものである。自己相関係数によって、過去の履歴に対してどのくらい相関を持つかを知ることができる。自己相関係数が十分に小さくなる時間差における変動レベルは、過去のデータとの相関がなくなるため大きくなると考えられ、これを適切な時間差と考えることができる。したがって本研究では、様々なヒトの動きに対する適切な時間差を求める際に、自己相関係数を用いた。

自己相関係数 r は以下の式(1)で求められる[5]。

$$r = \frac{\sum_{i=\tau+1}^N (x_i - \bar{x})(x_{i-\tau} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \dots (1)$$

ここで、 N は時系列データの個数、 x_i は i 番目

表1: 測定システム諸元

Receiving antenna	Monopole antenna
Antenna length	$\lambda/4$
Antenna height	75 cm
Receiver bandwidth	230 kHz
Receiver limitation	-105 dBm
Sampling limitation	500 ms
A/D quantization	13 bit

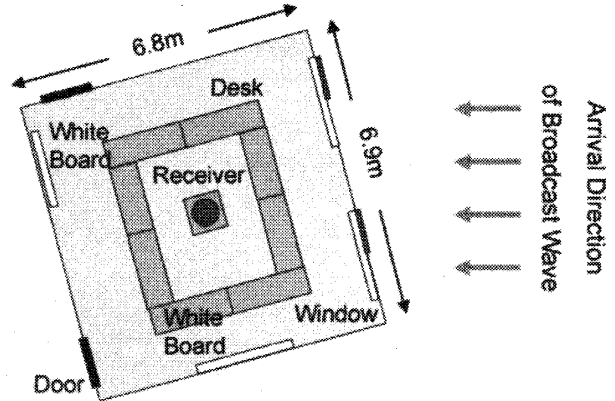


図3: 測定環境 (測定部屋①)

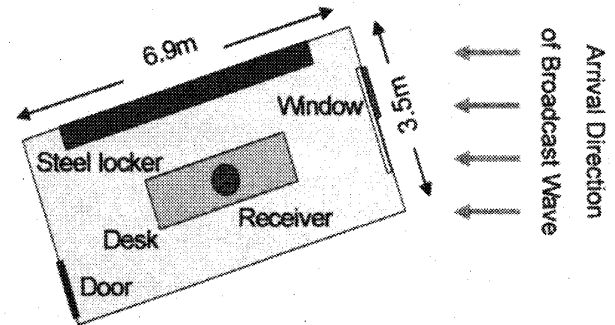


図4: 測定環境 (測定部屋②)

表2: 放送局諸元

Station	Koi
Measured frequency	625.75 MHz
Transmission power	2.5 W
Orthometric height	445.8 m

の時系列データ、 τ は時間差、 \bar{x} は時系列データの平均値を表す。

4.3. 各移動速度における自己相関係数

本研究では、ヒトが室内を速い動き(2.0 [m/s])、遅い動き(0.5 [m/s])で移動した場合での受信レベル変動の実験データを基にして、様々な時間差にお

ける自己相関係数を求めた。

図7, 図8は測定部屋①において, 図9, 図10は測定部屋②において行った実験データを基に, それぞれ移動速度 2.0 [m/s], 0.5 [m/s]における受信レベルの自己相関係数を示す。自己相関係数を求めるために, 本実験では $N=800$ 個のデータを用いた。本研究では, 相関が小さくなる値として, 自己相関係数 0.2 を目安とした。

各図において, 自己相関係数が 0.2 になる時間差を調べると, 測定部屋①の場合, 2.0 [m/s]では 1.0 秒未満, 0.5 [m/s]では 3.0 秒未満であった。また, 測定部屋②の場合, 2.0 [m/s]では 1.0 秒未満, 0.5 [m/s]では 4.0 秒未満であった。また, 自己相関係数は移動速度が 2.0 [m/s]の場合, 0.5 [m/s]の場合と比較して, 急激に減少していることが分かる。したがって, ヒトの移動速度が速いほど, 短い時間差で自己相関係数が減少することが分かる。

このように, ヒトの動きの速度によって自己相関係数が小さくなる時間差が異なることにより, ヒト検知の際に用いる変動レベルを求める時間差を複数定める必要があることが分かる。

本結果から, 変動レベルを求める際に用いる時間差を, ヒトの移動速度が 2.0 [m/s]の場合 0.5 秒, 0.5 [m/s]の場合 4.0 秒とすることで, 測定部屋①および測定部屋②においても, それぞれのヒトの動きを効率的に検知できることが期待される。

5. ヒト検知システムにおける TDD 適用

5.1. TDD (時間ダイバーシチ) について

伝搬変動が空間や周波数などで異なることを利用し, 複数の受信枝 (異なるアンテナ, 異なる周波数, 異なる偏波など) を用意し, それらにおける受信電力を合成または切り替えるなどして伝搬変動を減少させる方法をダイバーシチという。そして時間ダイバーシチ (TDD: Time Delay Diversity) は, 一定時間間隔で同一情報を複数回送信し, その遅延した情報を用いて通信品質を向上させる方法である[6]。

本研究ではより高精度なヒト検知方法を実現するため, 上記で述べた TDD の概念を本ヒト検知システムに適用した。TDD を適用したヒト検知システムでは, 1 秒前との受信レベル差から算出される変動レベルのみでなく, 複数の時間差で変動レベルを求め, ダイバーシチ効果にてより大きな変動レベルを得ようとするものである。

5.2. TDD を適用したヒト検知システム

図11に, 本システムにおける TDD 適用方法を示す。入力信号 x_i に対して, 複数の時間差 ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$) 前との変動レベルを求める。そして, 求められた値の絶対値を比較し, その最大値をヒト検知に用いる変動レベルとする。

このように, TDD を適用することによりアンテナや受信機の数を増やすことなく, 簡易な装置でヒト検知性能を向上させることができる。

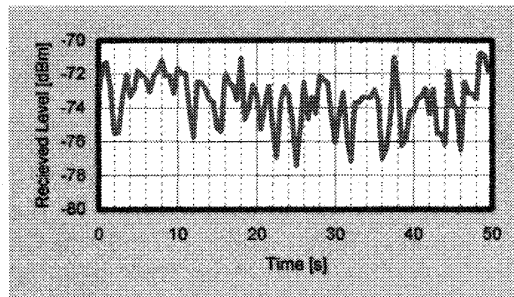


図5: 受信レベル変動例 (2.0 [m/s])

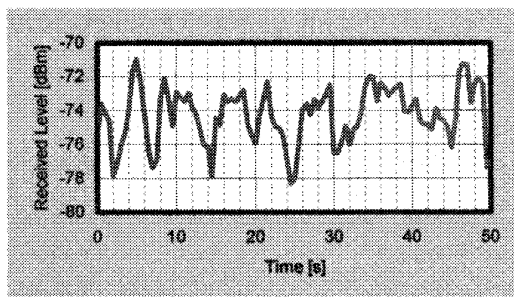


図6: 受信レベル変動例 (0.5 [m/s])

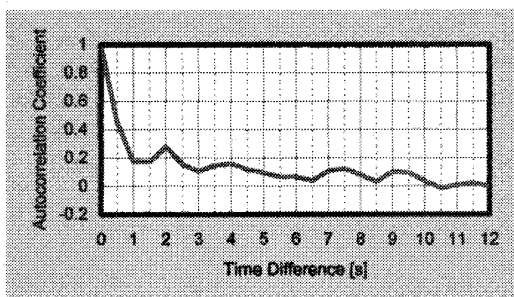


図7: 自己相関係数 (2.0 [m/s]) 測定部屋①

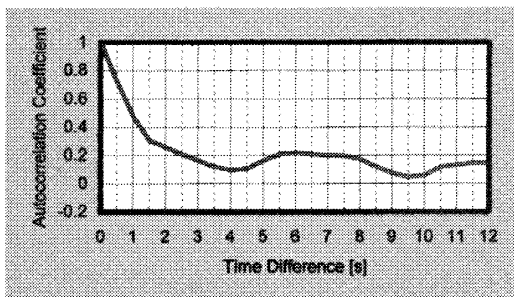


図8: 自己相関係数 (0.5 [m/s]) 測定部屋①

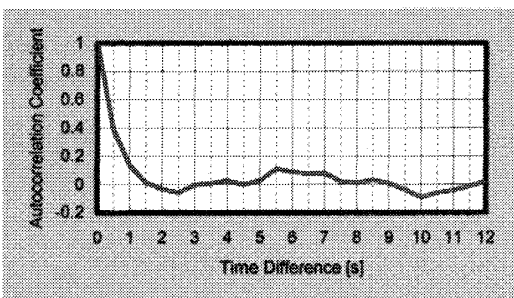


図9: 自己相関係数 (2.0 [m/s]) 測定部屋②

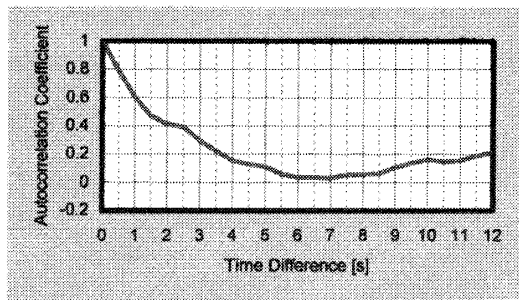


図 10 : 自己相関係数 (0.5 [m/s]) 測定部屋②

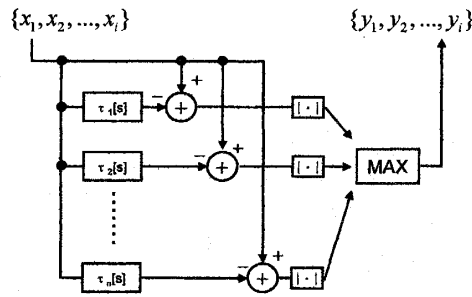


図 11 : TDD の適用方法

6. 測定結果及び考察

6.1. TDD 適用結果

図 12, 図 13 に測定部屋①, 図 14, 図 15 に測定部屋②での実験データを基に, それぞれヒトの移動速度が 2.0 [m/s], 0.5 [m/s]における各時間差 (0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 7.0 秒) の変動レベル, および TDD を適用した際の変動レベルの累積確率を示す。また, ヒトなしにおける TDD を適用した際の変動レベルと, 従来のヒト検知システムに利用していた 1 秒前との変動レベルの累積確率も図 12, 図 14 にあわせて示す。4.3 節の結果により, TDD には 4.0 秒, 2.0 秒, 1.0 秒, 0.5 秒の 4 種類の時間差における変動レベルを用いた。それぞれの値は最小時間差 0.5 秒に対する 2 のべき乗の倍数とした。

図 12, 図 13 より, 累積確率の 10 % 値を求めると, ヒトの移動速度が 2.0 [m/s], 0.5 [m/s]のどちらにおいても, 各時間差との変動レベルに比べ, TDD を適用した場合の変動レベルが 1 dB 以上大きくなっていることが分かる。また図 14, 図 15 より, 累積確率の 10 % 値を求めると, 各時間差との変動レベルに比べ, TDD を適用した場合の変動レベルが, ヒトの移動速度が 2.0 [m/s]のとき 4dB 以上, 0.5 [m/s]のとき 1 dB 以上大きくなっていることが分かる。したがって, 本手法を適用することにより, ヒトの動きに伴って変化する受信レベル変動を, いずれの測定部屋内においても, より精度よく検出できることが分かった。

さらに, 図 12, 図 14 より, 室内にヒトがない場合において, TDD を適用した場合における変動レベルは 0.3 dB 以下と十分に小さく, 誤検知も少なくできることが期待される。

6.2. 変動レベルと自己相関係数について

移動速度が 0.5 [m/s]の場合の図 13, 図 15 において, 0.5 秒から 4.0 秒までの時間差における累積確率の 10 % 値を調べると, 時間差が大きくなるにつれて, 変動レベルも大きくなっていることが分かる。ここで, 図 8, 図 10 の各時間差における自己相関係数を求めると, 測定部屋①の場合, 時間差が 0.5 秒における自己相関係数から順に, 0.7, 0.5, 0.2, 0.1 であり, 測定部屋②の場合, 0.8, 0.6, 0.4, 0.1 のように, 小さくなっていることが分かる。つまり, 自己相関係数が小さくなるにつれ, 変動レベルが大きくなっていることが分かる。

また図 12, 図 14 において, 時間差が 7.0 秒における累積確率の 10 % 値を求めると, 時間差が 1.0 秒, 2.0 秒, 4.0 秒の場合とほとんど差がないことが分かる。ここで図 7, 図 9 より, 時間差が 7.0 秒における自己相関係数を求めると, それぞれ 0.2 以下であり, 時間差が 1.0 秒, 2.0 秒, 4.0 秒の場合とほぼ同じ値である。

次に, 図 13, 図 15 において, 時間差が 7.0 秒における累積確率の 10 % 値を求めると, それぞれ時間差が 2.0 秒, 4.0 秒の場合とほぼ同じ値であることが分かる。ここで図 8, 図 10 より, 時間差が 7.0 秒における自己相関係数を求めると, それぞれ 0.2, 0.1 であり, 時間差が 2.0 秒, 4.0 秒の場合とほぼ同じ値であることが分かる。よって, 自己相関係数が 0.2 以下になる時間差を求めれば, それより大きな時間差における変動レベルを求める必要はないことが確認できた。

以上より, 自己相関係数が小さくなるにつれ, 変動レベルは大きくなるという関係性を明らかにした。また, 大きな変動レベルを抽出するために, 自己相関係数が 0.2 以下になる時間差を求めることが有効であることが分かった。

6.2. ヒト検知性能の検討

本システムの人検知性能を検討するため, 検知確率を求めた。本研究では, 検知確率を“ヒトが室内にいる状況で, サンプリング毎において変動レベルがある閾値を超える確率”と定義した。また, 図 12, 図 14 より, 室内にヒトがない場合において, 変動レベルが 1 dB を超えていないことがわかる。したがってここでは, 閾値をヒトのいない状況で変動レベルを超えない値として, 1 dB と設定した。

図 16 に, 各測定部屋をヒトが 180 秒間ランダムに移動した場合における変動レベルの実験データを基に, ヒト検知確率を求めた結果を示す。図より, TDD を適用した場合, 部屋の広さにかかわらず, 他と比較して約 30 % 検知確率が改善することが分かった。また, 測定部屋②は測定部屋①と比較して全体的に検知確率が高いことが分かる。これは, 測定部屋②の広さが測定部屋①に比べて狭く, 室内の電波経路をヒトがより頻繁に乱したことにより, 変動レベルが大きくなったことが原因と考えられる。

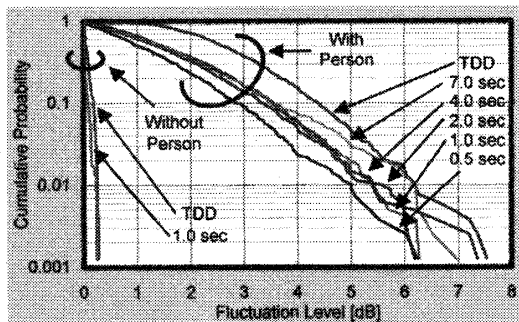


図 12 : 変動レベルの累積確率 (2.0 [m/s])
測定部屋①

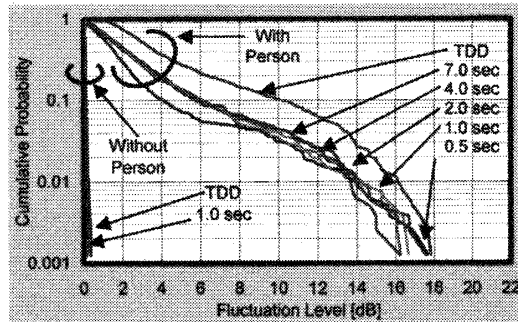


図 14 : 変動レベルの累積確率 (2.0 [m/s])
測定部屋②

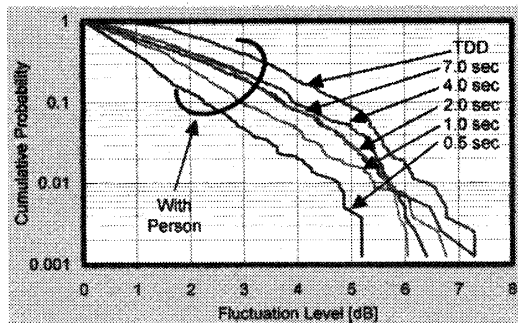


図 13 : 変動レベルの累積確率 (0.5 [m/s])
測定部屋①

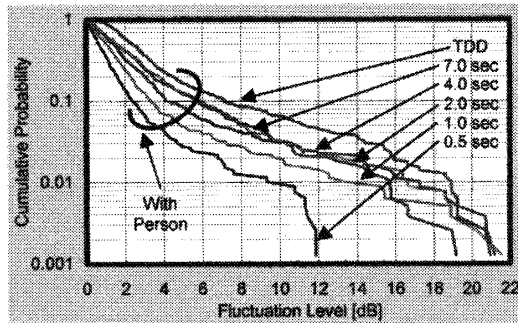


図 15 : 変動レベルの累積確率 (0.5 [m/s])
測定部屋②

7. おわりに

本稿では、UHF 帯 TV 受信波を用い、屋内環境において必然的に生じるマルチパスやシャドウイングによる受信レベル変動を利用したヒト検知システムに、新たに TDD を適用し、検知確率の改善について検討を行った。実験の結果、以下のことを明らかにした。

- ・ ヒトの動きの速さによって、受信レベルの変化が異なることを確認した。
- ・ ヒトの様々な速さの動きを精度よく検知するため、移動速度 2.0 [m/s]、0.5 [m/s]における受信レベル変動の自己相関係数を求めた。求めた自己相関係数を基に、移動する速度に応じて大きな変動レベルが抽出できる、適切な時間差を導出した。
- ・ 求めた時間差を用いて TDD を適用することにより、ヒトの動きによる受信レベルの変動を精度よく検出することができた。
- ・ 自己相関係数が小さくなるにつれ、変動レベルは大きくなるのが分かった。また、自己相関係数が 0.2 以下になる時間差を求めることが有効であることを示した。
- ・ TDD を適用することで、部屋の広さにかかわらず、検知確率が約 30 %改善することを示した。

今後は、本提案方法の一般性を高めるため、材質の異なる室内環境での測定や、屋外の外部要因（屋外に存在するヒトや車）による影響を検討し、検知誤差要因を明らかにしていくことが重要である。

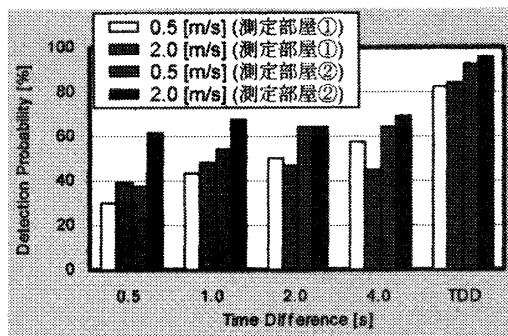


図 16 : 各測定部屋における検知確率の比較

参考文献

- [1] 根本 俊雄, センサエレクトロニクス, 電子情報通信学会(1986)
- [2] 西 正博, 吉田 彰顕, 渥美 幸雄, 高橋 修, “放送融合型モバイル環境を指向した UHF 帯電波伝搬エリアの検討”, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.12, pp.2619-2629(2004)
- [3] M.Nishi, S.Takahashi, T.Yoshida, “Human Detection System Using UHF Band Terrestrial TV Receiving Waves”, 2006 IEEE APS, pp.3097-3100(2006)
- [4] 西 正博, 川口 立朗, 高橋 茂, 吉田 彰顕, “UHF 帯 TV 放送受信波を用いたヒト検知システムの提案”, 電子情報通信学論, Vol.J89-B, No.9, pp.1789-1796(2006)
- [5] 北川 源四郎, 時系列解析入門, 岩波書店(2005)
- [6] 進士 昌明, 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会(1992)