

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560442

研究課題名(和文) 安心・安全のためのマルチアンテナセンシングに関する研究

研究課題名(英文) Study on Multi-Antenna Sensing for Security and Safty Applications

研究代表者

山田 寛喜 (Yamada, Hiroyoshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20251788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：この研究は、MIMOシステムにおける伝搬チャネル推定を用いた電波センサに関するものである。電波センサに関する研究は古くから存在するが、実用に資するものは少ない。これはシステム自体に高い安定性が求められるためである。ここではMIMOチャネルが偏波伝搬構造のみに依存し、送信システムの電力変動にロバストである点に着目した電波センサを開発し、その有効性を明らかにした。特に検出時の指標としているコヒーレンスの確率密度分布の理論式を導出し、その理論式の妥当性を実験により示した。さらに、電波伝搬シミュレータを用いることにより、与えられた誤警報確率、SNR、電力変動値に対する検出確率の理論計算を可能とした。

研究成果の概要(英文)：This study is considered on a radio sensor by using MIMO system which is sensitive to the radio propagation environment changes. The history of the radio sensor was started many decades ago. However, there are few sensors which can be practically used. This is because the radio sensor is sensitive not only to the environmental change but also transmitter/receiver stability. When we adopt the MIMO system with MIMO channel detection, we can detect mainly to the radio environmental change, hence robust sensor can be realized. We verify the concept of the sensor and derive theoretical properties of detection criterion for channel coherence. Statistical properties of the probability density function of the coherence can be derived, and is was also verified by experimental results. In addition, system evaluation scheme for given false alarm rate, SNR, ISR can be established. We can derive detection probability in given environment and target by numerical calculations.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：MIMOセンサ アレーアンテナ MIMOチャネル セキュリティセンサ イベント検出 DOA推定 電波伝搬推定

1. 研究開始当初の背景

近年、建物への不正侵入犯罪増加に対する対策や独居老人の孤独死防止のための施策など、社会生活の安心・安全の確保が求められている。侵入検出として、現在は主に赤外線センサやカメラ映像が用いられているが、監視領域やプライバシーなどの点で、それぞれのセンサ共に問題を抱えている。社会生活の安心・安全の増進には、これらの問題点を解決するセンサの開発が急務である。このようなセンサの実現には、見通し外伝搬・壁透過などの性質を有する電波の利用が有効である。ただし、特殊用途のイメージングレーダは存在するものの、民生用システムは実用化されていない。これは主に強度変動に着目しているためである。

電波センサに関する研究は、複数の国内グループによる研究が見られる。我々のグループを含め、各々のグループが電波センサの着想に至った時期は同時期であるが、送信側の多素子(マルチアンテナ)化による高信頼性実現やシステムの簡易さ(コスト)、消費電力等の点で、複数の実験成果が報告されているものの学術的な観点からの検討はまだ着手されておらず、特に以下の点が問題である。

- 屋内環境により様々な様相を呈するマルチパス伝搬環境に対して、どの様な送受信アンテナ・アンテナ配置が有効なのかを解明する指針。
- 所要の検出精度を維持し、簡易でかつ省電力なシステムの実現

これらの問題点に対して、理論的検討および実験による実証を通して、電波によるマルチアンテナ・センシングの有効性を明らかにすることが、実用化への最大の壁となっていた。これが、研究着手時において、本研究テーマを取り巻く分野が抱えていた課題であった。

2. 研究の目的

先にあげた問題点を解決するための本研究では、具体的に以下の点を解決することを目的とした。

(1) 最適な変動検出規範に関する検討

本研究で提案する送信、受信共にマルチアンテナ化した電波セキュリティセンサでは、様々な空間データ処理が可能となる。各送信アンテナによるマルチパス波の固有値、固有ベクトルは、受信電力および伝搬チャネルに対応する。これらのどの様な組み合わせにより、ロバストでかつ誤検出/見逃し確率の低い変動検出規範(評価式)が、得られるかに関しては、未解明な部分が多い。ここでは、申請者の MIMO (Multiple Input Multiple Output) およびレーダに関する研究の経験を活かし、伝搬モデルおよび目的(見逃し確率最小/誤検出確率最小)に応じた最適な規範を明らかにする。

(2) 屋内伝搬環境と、その環境に対応する有効なマルチアンテナの配置の解明

マルチパスリッチな環境ほど、様々な位置での変動検出が可能となる。したがって、送信素子数が多い(送信素子の分散配置)ほど検出感度が向上することは容易に予想される。また、変動検出が目的であるため、受信側アレーにおいては半波長間隔という制約が存在しない。このようにシステムの自由度が非常に高い。しかしながら、変動検出という観点からの、伝搬環境に相応した必要最低限のマルチアンテナ数、素子指向性や偏波、素子配置に関する定量的な検討は行われていない。ここでは、代表的な伝搬環境(部屋、廊下)などの規範モデルを設定し、マルチアンテナ素子数とその配置、検出可能場所率(変動検出可能面積率)に関して、レイトレイ法による定量的な解析を行い、その関係を明らかにする。これによりアンテナ配置に関するシステム設計の指針を明確にする。

(3) 低コスト・低消費電力を実現するシステム構成に関する検討

送受共にマルチアンテナとするシステムとしては、MIMO が代表的である。しかしながら、通信で活用されている MIMO 構成は、システムが複雑となりコスト高なばかりでなく、送信アンテナの分散配置においても問題が生じる。申請者は人の動きなどの低速な変動の場合、送信系が間欠な独立動作するシステムであっても、ほとんど同等の性能を実現するという知見を得ている。このような間欠動作は、消費電力信号の観点からも有効といえる。この研究では、上記 2 項目の検討結果に応じた最適な送受信制御(動作方法)を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 最適な変動検出規範(アルゴリズム)

マルチアンテナ電波セキュリティセンサでは、SIMO(Single-Input Multiple-Output)構成、MIMO 構成という基本的なアンテナ構成に加え、MIMO では同時送信・順次送信などシステム制御の選択肢も多岐に渡る。システム時変動に対するロバスト性からも、電力値自体の利用は不適切と予想されるが、MIMO 時のチャネル間の電力変動比率は有効な指標となる可能性があり、未だ評価規範が明確化されていない。ここでは、レーダ信号処理における統計的手法を用いて、見逃し確率最小/誤検出確率最小の 2 つの観点からの最適アルゴリズムを理論的に解明し、それらにおけるチャネル電力/空間情報の利用方法を明らかにする。

(2) 屋内伝搬環境とマルチアンテナ配置

検証実験系構築ののち、まず各伝搬環境の時空間チャネル特性を実測し、伝搬環境の様々なモデル化精度(什器など)における伝搬解析シミュレーション(ソフトウェア開発

済)を行い,所要精度を明確化する.その後,実証実験を行う.実験では,送受共に2~4素子の組み合わせに対して,実用的な範囲でのアンテナ位置・素子間隔等に対して,前項規範における検出可能場所率の関係を定量的に明らかにする.

(3) 低コスト・低消費電力システム構成

生活活動の変動解析では,間欠(or低速)動作で十分である.IEEE802.11a/b/g/nを利用した間欠動作システムに関して検討し,観測間隔と消費電力を検討し,電池駆動型分散送信マルチアンテナの実現可能性を明らかにする.

4. 研究成果

(1) 最適な変動検出規範(アルゴリズム)

本研究では,まずMIMOセンサの実用性の向上を目的として誤警報確率を考慮した性能評価を行った.類似の検討はレーダ,インターフェロメトリといったリモートセンシングの分野で以前から精力的に進められており,これは受信信号評価値の確率密度関数(Probability Density Function, PDF)を求める必要がある.更に,本研究では所望の誤警報確率に対応する検出確率を一意に導出することを目的として,まず理論的な検討を進めた.具体的には,与えられる信号電力対雑音比(Signal to Noise Ratio, SNR)や変動電力対信号電力比(Interference to Signal-Ratio, ISR)に対する確率密度関数を定式化した.

送信4,受信4の環境における導出した理論式と,対応する信号環境における計算機シミュレーション結果から得られたコヒーレンス分布の確率密度関数(PDF)の例を図1に示した.侵入検出・イベント検出は,参照データと観測データのMIMOチャンネル行列のコヒーレンス変化を用いる.すなわち,変動していない際は高い値を示し,変動により値は小さくなる.ただし,雑音などによる変動もあるので,それがイベントなのか雑音であるのかを判断する必要がある.同図のTheoryがここで導出したコヒーレンスのもの,マーカーがついているものがシミュレーション

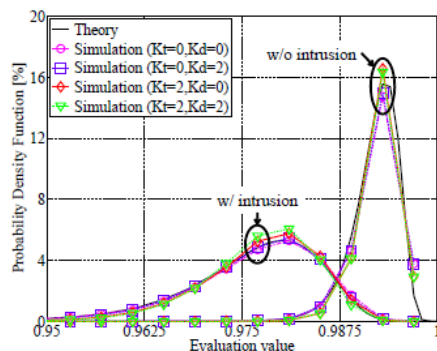


図 1. 確率密度関数の計算例 (SNR 10 dB)

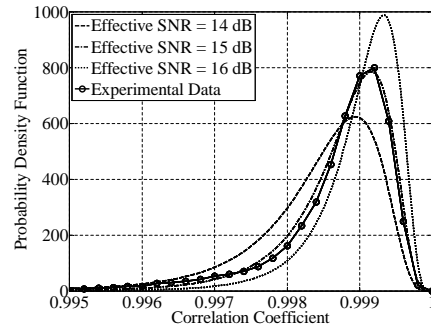


図 2. PDF の実験および理論値の比較

によるものである. K_t, K_d はラリスファクタであり,0の際はレイリー分布を示している.同図には侵入有,侵入無しの場合の双方の化KKを示しているが,いずれにおいても導出した理論式はレイリー分布を仮定した分布と完全に一致しており,ラリスファクタが2程度の見通しが存在しても,送信が広く分布している際に,ほぼ一致していることが分かる.これにより,膨大なシミュレーションを行うことなく,理論計算をベースとしたシステム評価が可能となり,検出性能の評価やシステム性能を規定することが可能となった.

なお,この確率密度分布の妥当性に関しては,実験データによる検証も行った.図2は2送信4受信時の実験データから得られたPDFといくつかのSNR時の理論値をプロットしたものである.SNR=15 dBの結果とほぼ一致していることが分かる.このように,導出した理論値は無線LAN周波数帯である2.5GHzの屋内MIMO伝搬路に有効である.

(2) 屋内伝搬環境とマルチアンテナ配置

先に明らかにしたPDFを用いると与えられたSNR,ISR(侵入による変動電力と参照信号の電力費)における誤警報確率が計算でき

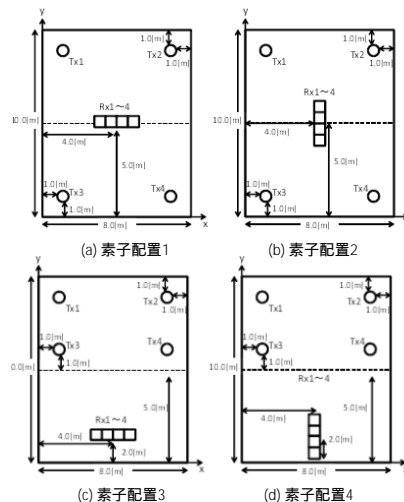


図 3. 検討した素子配置

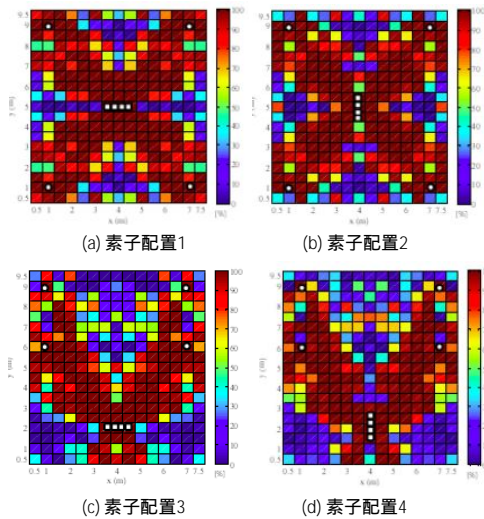


図 4. FAR=1.e-6, SNR 15dB における PDF 値 (検出性能の比較検討)

る．ここでは、想定されるいくつかの代表的な素子配置に関して、その一定の誤警報確率時の PDF の変化を比較検討した．検討した素子配置は図 3 の通りである．

アンテナ配置と部屋モデルが与えられれば、電波伝搬シミュレータなどを用いて、侵入の有無による電力変動が計算できる．これらを用いれば実験することなく、数値計算で様々なモデルの評価が可能となる．図 4 が、与えられた誤警報確率(FAR), SNR に対する PDF 値, すなわち検出性能の比較検討結果である．赤い領域は、PDF 値がほぼ 1, すなわち誤警報がない領域であり、青くなるほど誤警報確率が高まる．この手法を用いた定量的な評価を行い、効率的な配置法を明らかにし、その結果を学会等で報告した．

(3) 低コスト・低消費電力システム構成での MIMO センサシステム

MIMO センサによる検出システムでは通常のトレーニングシンボルによるチャネル推定が必要となる．この構成において送信素子を分散配置する場合、送信アレーの配線、すなわちケーブルの処理が問題となる．したがって、侵入検出専用のシステムならば、各送信素子が独立に動作するシステムが望ましい．ここでは、各送信素子を独立に動作させ各送信素子毎に単独で受信するシステムを用いて侵入検出を行う、疑似 MIMO 構成の検出システムを考案した．これは SIMO センサと同様に個々の送信素子に対する空間シグネチャを推定することにより検出を行う．ただし、単なる複数の SIMO センサにより実現される検出性能ではなく、MIMO センサに準じた検出性能を実現する工夫を施している点が特徴である．

ここでは、送信位置が異なり、受信アレーを共通とした SIMO センサにおいて、各々の送信アンテナを間欠動作させた受信信号を

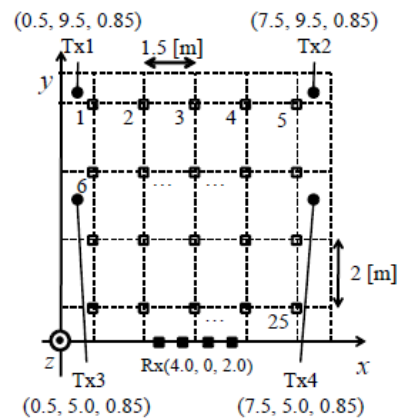
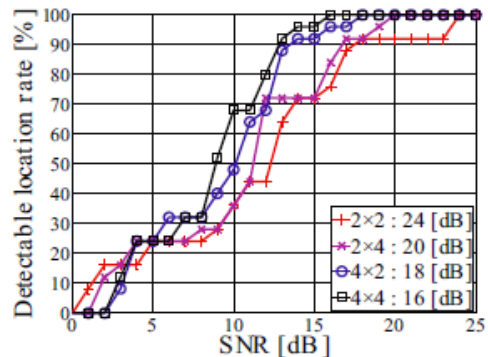


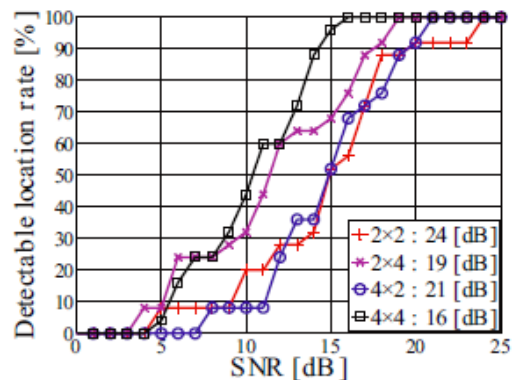
図 5. 評価モデル

合成、疑似的な MIMO センサとしている．合成においては、計測時刻に無関係となるよう、信号部分空間(主要固有ベクトル)を用いる方向を考案した．

提案法の評価は、電波伝搬シミュレータを用いて行った．図 5 に解析に用いた部屋のモデルと評価点配置を示す．この部屋は 10x8x2.7m のサイズのコンクリート壁面の部屋であり、検出場所率は部屋全体の評価点



(a) 従来 MIMO システム



(b) 疑似 MIMO システム

図 6 従来 MIMO システムと提案した疑似 MIMO システムにおける検出場所率

のうち、検出された評価点の比率とした。また、ここで侵入者モデルは人間を模した誘電直方体とした。周波数は2.4GHzとして、従来法と提案手法の場所率を計算したものが図6である。図中の凡例のM×Nは、送信アンテナ数×受信アンテナ数である。同図から分かるように、送信アンテナ数が受信アンテナ数よりも等しいか少ない場合では、提案した疑似MIMOシステムは、従来のMIMOシステムと同様の性能を発揮することが分かる。一般のアンテナ配置では、この条件を満足する少ない送信とした方が、電力の観点からも効率が良い。また、このような提案疑似MIMOシステムの場合、各送信素子同士は互いに通信を行う必要も有線で接続される必要も無く、各素子は電池駆動させることも可能となる。そのため、従来のMIMO構成による検出システムと比較して簡素なシステムの実現が可能となることが分かる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17件)

福島真也, 山田寛喜, 小林弘一, 山口芳雄, "レンジ・ドップラ周波数推定によるモーションセンシングの特性評価," 信学技報, 査読無, vol.AP2013-193, 2014年3月.

白井智士, 山田寛喜, 西村寿彦, 小川恭孝, 山口芳雄, "Khatri-Rao変換を用いた広帯域信号DOA推定に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, vol.AP2013-131, 2013年12月.

S. Shirai, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "A Novel DOA Estimation Error Reduction Preprocessing Scheme of Correlated Waves for Khatri-Rao Product Extended-Array," IEICE Trans. Communications, 査読有, Vol.E96-B, no.10, Oct. 2013.

S. Itabashi, H. Yamada, K. Nishimori, Y. Yamaguchi, "Experimental Study on Statistical Characteristic of MIMO Sensor for Event Detection," Proc. of 2013 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2013), 査読有, Nanjing, China, Oct. 23-25, 2013.

佐藤耕平, 山田寛喜, 山口芳雄, "マルチパス環境における動きのある人物の屋内位置推定に関する基礎検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, vol.AP, 2013年9月.

S. Shirai, H. Yamada, and Y. Yamaguchi, "DOA Estimation Error Reduction of Nested Array Using N-th Root of Correlation Matrix," Proceedings of 2013 IEEE

AP-S/USNC-URSI Symposium, 査読有, Orland, FL, USA, July 7-13, 2013. 白井智士, 山田寛喜, 山口芳雄, "相関波到来時におけるNested Arrayを用いたDOA推定に関する検討", 電気学会計測研究会, 査読無, vol.IM-13-017, pp.11-16, 2013年3月.

小川研, 山田寛喜, 黒崎雄太, 山口芳雄, "MIMOセンサを用いた屋内侵入検出システムの特性評価," 信学論B, 査読有, Vol. J95-B, no.9, pp.1142-1150, 2012年9月.

小川研, 山田寛喜, 山口芳雄, "MIMOセンサにおける相関係数の統計的性質に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.AP2012-79, pp.63-67, 2012年8月.

白井智史, 山田寛喜, 山口芳雄, "相関波到来時におけるKhatri-Rao積拡張アレーを用いた信号パラメータ推定に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.AP2012-34, pp.23-28, 2012年7月.

小川研, 山田寛喜, 山口芳雄, "屋内新湯検出手法のチャネル行列変動に対する性能評価", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.AP2011-96, pp.42-44, 2011年11月.

H. Yamada, K. Tanaka, Y. Yamaguchi, "Array Configuration and Channel Model of MIMO Sensor for Home Security," 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011), 査読有, CD-ROM, Jeju, Korea, Oct. 2011.

K. Ogawa, H. Yamada, Y. Kurosaki, Y. Yamaguchi, "Performance Evaluation of MIMO Sensor algorithms for Indoor Intrusion Detection," 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011), 査読有, CD-ROM, Jeju, Korea, Oct. 2011.

A. Kumakura, H. Yamada, K. Nishimori, Y. Yamaguchi, "Fundamental Study on Channel Model of MIMO sensor for Event Detection," 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011), 査読有, CD-ROM, Jeju, Korea, Oct. 2011.

熊倉央, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "屋内侵入検出のためのMIMOセンサのチャネルモデルに関する実験的検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.AP2011-42, pp.87-90, 2011年7月.

小川研, 山田寛喜, 黒崎雄太, 山口芳雄, "MIMOセンサを用いた電波伝搬環境変動検出の性能評価に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無,

Vol.AP2011-43, pp.91-96, 2011年7月.
田仲圭, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "MIMO センサを用いた屋内侵入検出における最適素子配置に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.AP2011-22, pp.7-12, 2011年6月.

〔学会発表〕(計 18 件)

石山 優・山田寛喜・山口芳雄, "Web カメラによる参照信号位置推定を利用したアレーアンテナ校正法の実験的検討", 2014 年電子情報通信学会総合大会, B-1-188, 新潟大学, 新潟市, 2014 年 3 月 20 日.

佐藤耕平・山田寛喜・山口芳雄, "動きのある人物の屋内位置推定に関する実験的検討", 2014 年電子情報通信学会総合大会, B-1-219, 新潟大学, 新潟市, 2014 年 3 月 19 日.

白井智士・山田寛喜・西村寿彦・小川恭孝・大鐘武雄・山口芳雄, "Khatri-Rao 変換を用いた広帯域 DOA 推定法の誤差軽減", 2014 年電子情報通信学会総合大会, B-1-228, 新潟大学, 新潟市, 2014 年 3 月 19 日.

福島真也・山田寛喜・山口芳雄・小林弘一, "FM-CW レーダによるドップラ周波数推定に基づくモーションセンシングの実験的検討", 2014 年電子情報通信学会総合大会, B-1-200, 新潟大学, 新潟市, 2014 年 3 月 18 日.

白井智士, 山田寛喜, 山口芳雄, "Khatri-Rao 変換を用いた広帯域信号 DOA 推定における周波数特性補正に関する検討", 2013 年電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日.

板橋慎二, 山田寛喜, 山口芳雄, "MIMO センサにおける相関係数の統計的性質に関する実験的検討", 2013 年電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日.

佐藤耕平, 山田寛喜, 山口芳雄, "屋内人物位置推定における STAP の有効性に関する検討", 2013 年電子情報通信学会信越支部大会, 2013 年 10 月 5 日.

白井智士, 山田寛喜, 山口芳雄, "広帯域信号を用いた DOA 推定における推定可能到来波数の改善", 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013 年 9 月 18 日.

白井智士, 山田寛喜, 山口芳雄, "アレー自由度を超える相関波到来時の DOA 推定に関する検討" 2012 年電子情報通信学会信越支部大会, 2012 年 10 月 13 日.

熊倉央, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "MIMO 屋内侵入検出センサにおけるレイトレース法を用いた誤警報率に

対する検出確率の導出法", 2012 年電子情報通信学会信越支部大会, 2012 年 10 月 13 日.

小川研, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "MIMO センサにおける相関係数の統計的性質を用いたイベント検出確率に関する検討", 2012 年電子情報通信学会信越支部大会, 2012 年 10 月 13 日.

山田寛喜, [招待講演]"マルチアンテナのレーダ技術への応用 (MIMO レーダ)", URSI-C 委員会 第 22 期 第 4 回公開研究会, 小樽, 2012 年 9 月 21 日.

白井智史, 山田寛喜, 山口芳雄, "相関波到来時における Khatri-Rao 積拡張アレーの DOA 推定誤差改善", 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012 年 9 月 12 日.

H.Yamada, K.Ogawa, and Y.Yamaguchi "Statistical Performance Analysis of MIMO Sensor for Event Detection," Thailand-Japan MicroWave 2012 (TJMW2012), Bangkok, Thailand, Aug. 8th, 2012.

小川研, 山田寛喜, 山口芳雄, "チャンネルモデルを用いた電波伝搬変動検出手法の性能評価に関する検討", 2011 年度電子情報通信学会信越支部大会, 4A-1, 2011 年 10 月 8 日.

小川研, 山田寛喜, 黒崎雄太, 山口芳雄, "屋内電波伝搬環境変動検出手法の性能評価に関する検討", 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-2-7, 2011 年 9 月 14 日.

熊倉央, 田仲圭, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "屋内侵入検出の MIMO チャンネルのモデルに関する検討", 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-197, 2011 年 9 月 14 日.

田仲圭, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "MIMO センサを用いた屋内侵入検出における受信アレー配置に関する検討", 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-198, 2011 年 9 月 14 日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 寛喜 (YAMADA HIROYOSHI)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 20251788

(2)研究分担者

山口 芳雄 (YAMAGUCHI YOSHIO)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 50115086