

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14998

研究課題名（和文）多地点非接触睡眠計測を可能とするビームフォーミング電波センサの研究開発

研究課題名（英文）Research and Development of Beam Forming Microwave Sensor for Non-Contact Sleeping Condition Measurement in Multi-Spot

研究代表者

井上 敏之（Inoue, Toshiyuki）

滋賀県立大学・工学部・講師

研究者番号：90757709

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：電子的にアンテナの指向性の制御が可能なビームフォーミング電波センサ回路システムの開発を行った。65-nm CMOSプロセスを用いて電波センサ回路チップを作製し、制御電圧を調整することにより0～360°の範囲で移相量を任意に設定可能であることを実証した。機械式方式によるセンサの回転制御、および赤外線カメラ画像を併用した測定対象位置特定技術の開発を行った。さらに、電波センサにより取得した心拍データに対する深層学習を適用した個人識別システムの開発を行った。対象者10人に対応可能な個人識別システムをFPGAを用いて構築し、平均で90%程度の正答率が得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

安全・安心な育児・介護環境の整備が求められている現代社会において、非拘束・非接触でバイタルサインを取得可能なシステムの需要が高まっている。電波センサは非拘束・非接触で心拍や呼吸等の微小な体動を検出であるが、従来は検出範囲が制限・固定されていたため、複数人の見守りに適用できなかった。本研究では、無線通信にも応用されているビームフォーミング技術を用いた電波センサ回路システムの実現を目指したものであり、独自に考案した回路構成により、高精度な電波照射方向制御を可能とする性能を達成した。また、見守り対象者の位置特定や、電波センサから得たデータのみを用いた個人識別など、新たな技術開拓にも成功した。

研究成果の概要（英文）：A beamforming radio sensor circuit system was developed. It was demonstrated that the phase-shift amount can be controlled by changing the control voltage over the range of 0 to 360 degrees in the fabricated 65-nm CMOS chip. Identification techniques of the location of the objective persons based on rotating the radio sensor and capturing thermal images were developed. Furthermore, a biometric identification system based on deep learning for heartbeat data acquired by a radio sensor was developed. An FPGA-based biometric identification system for 10 persons was implemented, where the accuracy of around 90% was obtained.

研究分野：集積回路システム

キーワード：非接触生体センシング マイクロ波 ミリ波 レーダ ビームフォーミング CMOS集積回路 深層学習

1. 研究開始当初の背景

団塊の世代が後期高齢者となる 2025 年問題を目前にして、独居高齢者、孤独死の増加が今もなお深刻な問題となっている。また、都市部では保育所待機児童数が増加し、24 時間保育の需要など保育現場も多忙を極めており、安全・安心な育児環境の整備が求められている。そのような社会的背景の中で、近年、睡眠に関わる乳幼児・高齢者の疾病や事故が増加している。交通事故の原因にもなる睡眠時無呼吸症候群や、高齢者の睡眠障害に起因する誤嚥や転倒、睡眠時のうつぶせ寝に起因する乳幼児突然死症候群等がある。これらの事故回避のためには、日常の睡眠状態の把握が重要である。

睡眠検査等で用いられるポリソムノグラフィは医師の専門的な診断を要し、対象者に対して多数の電極等の装着が必要であり、日常の睡眠計測には不向きである。脈波センサ、加速度センサ、ジャイロスコープ等を内蔵したスマートウォッチは、装着型であるため不快感、煩わしさのために長時間計測には適していない。スマートフォンの睡眠計測アプリは、寝具の振動や呼吸音の大小で睡眠深度を推定する簡易なもので、心拍や呼吸状態等に基づいた計測はできない。そこで、マイクロ波・ミリ波帯を用いた電波センサが注目されている。自動車の衝突防止のための車載用レーダ用途でもよく知られており、非拘束・非接触で心拍や呼吸等の微小な体動を検出でき、信号処理により心拍、呼吸成分を抽出できる。

電波センサはアンテナ固有の指向性により検出範囲が制限・固定されているため、従来システムは特定範囲に測定対象が一人だけ存在することを前提としていた。そのため、保育・介護施設等の広い部屋空間における複数人の見守りに適用できなかった。

2. 研究の目的

従来の電波センサの欠点である電波照射範囲の固定化を解消し、多地点計測を可能とするために、回転機構を用いた機械的方式ではなく、電子的方式でアンテナの指向性を制御すること（ビームフォーミング）が可能な電波センサ回路システムを開発することを目的とした。センサが設置された部屋内に存在する測定対象の位置特定技術の開発、および対象者方向にのみ効率的に電波を照射し、睡眠計測に必要な生体情報の検出技術の開発を行った。さらに、電波で取得した生体情報に対する深層学習を適用した個人識別技術の開発を行った。

3. 研究の方法

(1) ビームフォーミング電波センサ回路システム

ビームフォーミング回路は、主に電圧制御発振器 (VCO)、移相器、IQ ミキサ等で構成される。従来の電波センサのように、各アンテナに対して同相で信号を給電すると、正面方向に電波が照射される。一方で、給電位相差を与えると、各アンテナから放射される電波が空間的に合成され、波面が正面方向に対して傾き、照射方向を変化させることができる。受信側でも同様に、各アンテナで受信後の信号に対して適切に位相差を与えることにより、特定方向からの電波を受信することができる。本研究では、市販の電波センサにも使用されている 24-GHz 帯の使用を想定し、65-nm CMOS プロセスを適用した 24-GHz 帯で動作可能な回路設計・作製および評価検証を行うこととした。

(2) 測定対象位置特定技術

電子的方式であるビームフォーミング電波センサを用いた測定対象の位置特定への前段階として、機械的方式による位置特定アルゴリズムの開発を行った。まず、電波センサに回転機構を取り付け、一定速度で回転させ電波照射エリアを掃引することにより、広範囲の検出を可能とした。掃引中のセンサ出力強度の変化をモニタリングすることにより、電波センサと測定対象が正対する回転角度を検出し、位置特定を行う手法に関して動作検証を行った。

位置特定に要する時間を削減するために、見守り時のプライバシーの侵害の恐れが少ない赤外線カメラを併用し、熱画像から複数の対象者の領域を抽出し、座標計算により位置特定を可能とする手法に関して動作検証を行うこととした。

(3) 個人識別技術

複数対象者が同じ部屋に存在する環境において、電波センサにより取得する生体信号がどの対象者から得られたものであるかを識別する必要がある。一般に、心電計等で取得する心拍波形は各個人に固有のものであるとされており、この特徴から各心拍波形がどの個人のものであるかを特定すること（個人識別）が可能となる。そこで、電波センサにより取得した心拍データに対する深層学習を適用した個人識別システムを構築し、評価検証を行うこととした。

4. 研究成果

(1) ビームフォーミング電波センサ回路システム

本研究で検討を行ったビームフォーミング電波センサ回路システムのブロック図を図 1 に示す．出力信号の周波数安定度を高め，移相量誤差を低減するために，発振器に位相同期ループ (PLL) 構成を採用した．また，ポリフェーズフィルタ (PPF) により直交位相 (IQ) 信号を生成したのちに，I 信号と Q 信号の合成比を外部制御電圧により任意に変化させることで，信号移相量をアナログ的に調整可能なベクトル合成器 (VSY) を独自に考案した．65-nm CMOS プロセスのデバイスパラメータを用いたレイアウト設計を行い，チップ作製を行った．作製したビームフォーミング電波センサ回路における移相量制御特性測定結果を図 2 に示す．測定結果はポストレイアウトシミュレーション (PLS) 結果とよく一致しており，制御電圧 (V_{CSi}) を調整することにより $0 \sim 360^\circ$ の範囲で移相量を任意に設定可能であることを実証した．本結果により，電波照射方向の精密なコントロールが可能となり，より高精度な生体情報計測の実現に結びつくものと考えられる．

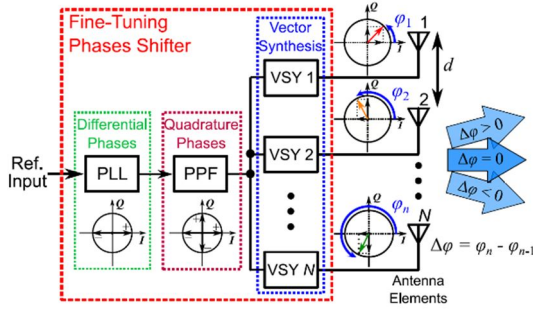


図 1 提案ビームフォーミング電波センサ回路システム

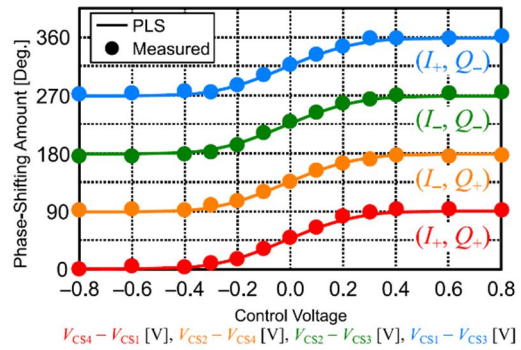


図 2 移相量制御特性測定結果

(2) 測定対象位置特定技術

電波センサを部屋の天井に取り付け，電波照射方向をサーボモータにより機械的に制御することを想定し，測定対象の位置特定を行うアルゴリズム (図 3) を考案した．まず，“時間領域判定 (T) モード”では，センサと対象者が正対したときに，反射波受信強度が大きくなるという性質を利用し，電波センサと測定対象が正対するような回転角度を決定する．つぎに，“周波数領域判定 (F) モード”では，T モードで掃引角度範囲を限定し，センサ取得信号に対して FFT (Fast Fourier Transformation) による周波数解析を行う．心拍周波数帯 ($0.8 \sim 2.0$ Hz) のスペクトル強度が一定値を超えたときのセンサ角度を決定し，より高精度に対象者位置を特定できるようにした．対象者位置特定実験結果を図 4 に示す．電波センサを部屋の天井に取り付けた場合のセンサの真下に相当する床位置では ± 8 cm 程度，真下から約 1.3 m 離れた位置では ± 20 cm 程度の精度で位置特定が可能であることが実験的に明らかになった．

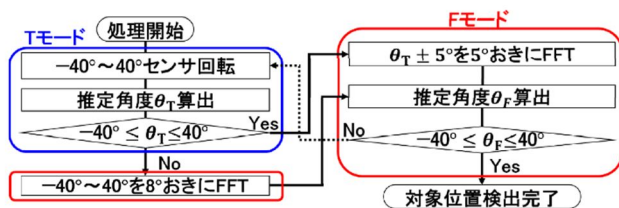


図 3 測定対象位置特定アルゴリズム

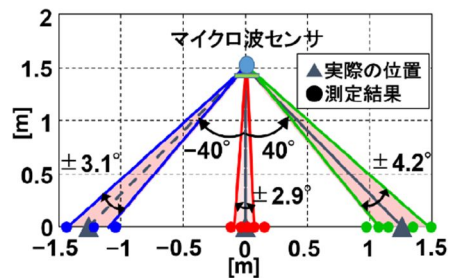


図 4 対象者位置特定実験結果

画素サイズ 160×120 ピクセル，水平画角 56° ，垂直画角 42° の赤外線カメラモジュールを使用し，汎用マイコンにより以下の計算処理を行った．まず，図 5(a) のような熱画像に対して，背景 (室温) と対象者領域 (体温付近) の温度差を利用し，閾値を設けることにより二値化画像に変換する．つぎに，図 5(b) に示すように，閾値を超えた隣接画素同士をひとまとまりとなるように扱い，それぞれに異なるラベルを割り当てる (ラベリング) ことで，対象者を区別できるようにする．そして，ラベリングされた各領域の中心座標を計算することにより，対象者位置を特定する．位置特定実験結果 (図 5(b)) より，対象者 2 名の位置特定を行えており，対象者同士が重ならない条件であれば，対象者数によらず画像内に存在する対象者の位置特定が可能となる．

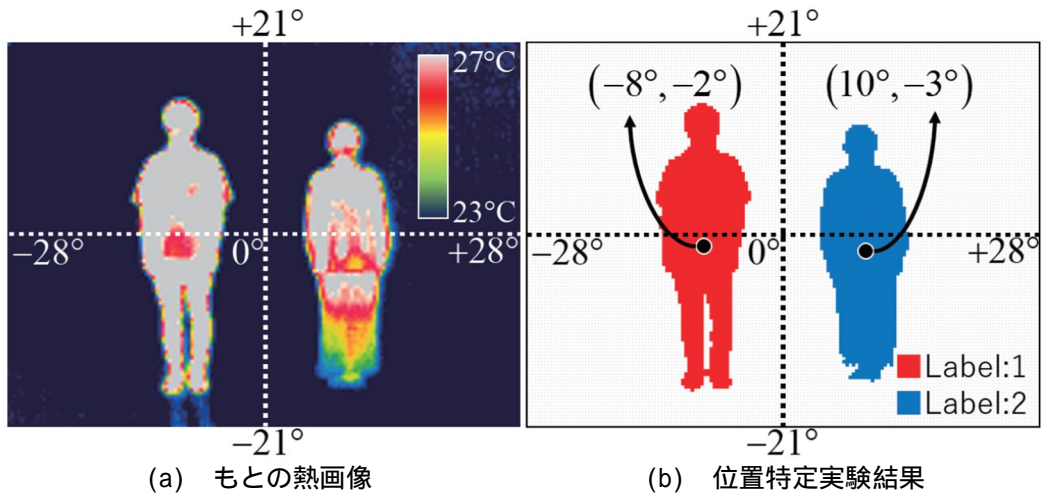


図5 赤外線カメラを用いた位置特定手法

(3) 個人識別技術

個人識別に適用する深層学習は、一般に GPU を搭載した大型計算機（深層学習用 PC）を用いて実行されることが多いが、消費電力が大きく、保育・介護施設の各部屋に設置するには規模が大きすぎる。そこで、PC と比較して小型かつ低消費電力で、深層学習における並列演算を高速に実行可能な FPGA を採用した個人識別システムの開発を行った。深層学習は学習過程と推論過程に大別される。まず、学習過程において、どの対象者から得た電波センサデータであるかを区別し（ラベル付け）、大量のデータを用いて分類器を作成した。つぎに、推論過程において、電波センサでリアルタイムに取得したデータを FPGA 内に作成した分類器に入力し、どの対象者（ラベル）のものであるかを分類させた。対象者 10 人に対応可能な個人識別システムを構築した場合の検証結果を表 1 に示す。FPGA 内で扱う変数の型として、浮動小数点型（Floating）と固定小数点型（Fixed）を用いた場合の FPGA 内リソース使用率、推論時間、正答率の比較を行ったところ、浮動小数点型（BRAM の使用率が 100% を超過しているため実装不可）で得られる正答率 92.3% と同程度で固定小数点型での実現が可能であることを実証した。また、固定小数点型に用いるビット数を 16 ビットまで削減した場合でも 87.0% の正答率が得られ、高速化およびリソース使用率低減に寄与できることを明らかにした。

表 1 提案個人識別システム検証結果（FPGA 内リソース使用率、推論時間、正答率）

Type	BRAM [%]	DSP [%]	FF [%]	LUT [%]	Time [ms]	Accuracy ^{*1} [%]
Floating	112	78	26	74	87.0 ^{*2}	92.3
Fixed 32 bits	96	55	34	96	43.3	92.2
Fixed 16 bits	45	42	17	70	38.9	87.0

^{*1} Average of 10-people identification

^{*2} Simulated on PC

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 U. Yoshimura, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine	4. 巻 10
2. 論文標題 A Method for Accelerating the Inference Process of FPGA-based LSTM for Biometric Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEIE Transactions on Smart Processing & Computing	6. 最初と最後の頁 416 ~ 423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5573/IEIESPC.2021.10.5.416	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K. Nishiguchi, T. Inoue, R. Yamazaki, K. Ogohara, A. Tsuchiya, and K. Kishine	4. 巻 21
2. 論文標題 Dynamic Memory Access Control for Accelerating FPGA-based Image Processing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Semiconductor Technology and Science	6. 最初と最後の頁 29 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5573/JSTS.2021.21.1.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine	4. 巻 20
2. 論文標題 Design Method for Active-shunt-feedback Type Inductorless Low-noise Amplifiers in 65-nm CMOS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Semiconductor Technology and Science	6. 最初と最後の頁 177 ~ 186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5573/JSTS.2020.20.2.177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 T. Inoue, K. Nomura, R. Noguchi, N. Koda, A. Tsuchiya, and K. Kishine	4. 巻 19
2. 論文標題 FPGA-Based Binary Labeling Signal Transmission System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Semiconductor Technology and Science	6. 最初と最後の頁 276 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5573/JSTS.2019.19.3.276	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 M. Okamoto, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 A Method for Implementing LSTM-Based Multiple-People Identification System for Non-Contact Health Monitoring on Small-Scale FPGA
3. 学会等名 19th IEEE International SoC Design Conference (ISOCC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Shimohane, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 Memory-Access Optimization for Acceleration and Power Saving of FPGA-Based Image Processing
3. 学会等名 19th IEEE International SoC Design Conference (ISOCC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Inoue, S. Nakashioya, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 A Fine-Tuning Phase Shifter with Vector Synthesizer Using 65-nm CMOS for Beamforming in 24-GHz Band
3. 学会等名 29th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上正隆, 井上敏之, 土谷亮, 岸根桂路
2. 発表標題 24-GHz帯マイクロ波センサのビームフォーミングに向けたアナログ移相量制御方式の検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本真尚, 井上敏之, 土谷亮, 岸根桂路
2. 発表標題 複数人対応見守りシステムに向けたFPGA深層学習推論処理におけるハードウェアリソース使用量削減手法
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kashiwagi, T. Inoue, M. Okamoto, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 Method of Estimating Positions for Multiple People in Non-Contact Vital Signs Monitoring Systems
3. 学会等名 21th International Conference on Electronics Information and Communication (ICEIC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上正隆, 井上敏之, 土谷亮, 岸根桂路
2. 発表標題 24 GHz帯マイクロ波センサビームフォーミングに向けたアンテナ給電移相量誤差が指向性に与える影響の評価
3. 学会等名 令和3年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本真尚, 井上敏之, 土谷亮, 岸根桂路
2. 発表標題 FPGA時系列データ機械学習推論処理システムの小規模・高精度化に向けたLSTMとGRUの性能比較
3. 学会等名 令和3年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ichii, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 5-Gb/s PAM4 Transmitter IC Using Compensation Circuit in an 180-nm CMOS
3. 学会等名 20th International Conference on Electronics Information and Communication (ICEIC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 U. Yoshimura, T. Inoue, A. Tsuchiya, K. Kishine
2. 発表標題 Implementation of Low-Energy LSTM with Parallel and Pipelined Algorithm in Small-Scale FPGA
3. 学会等名 20th International Conference on Electronics Information and Communication (ICEIC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏木雅哉, 吉村侑恭, 井上敏之, 土谷亮, 岸根桂路
2. 発表標題 マイクロ波センサ回転制御による広範囲検出手法の確立
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ichii, R. Noguchi, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 Suitable-compensation circuit design for a PAM4 transmitter in 180-nm CMOS
3. 学会等名 16th International SoC Design Conference (ISOCC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kimura, A. Imajo, T. Inoue, A. Tsuchiya, and K. Kishine
2. 発表標題 Frequency discriminator using a simple AD converter for interface systems
3. 学会等名 16th International SoC Design Conference (ISOC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nishiguchi, T. Inoue, A. Tsuchiya, K. Ogohara, and K. Kishine
2. 発表標題 Optimization technique of memory traffic for FPGA-based image processing system
3. 学会等名 16th International SoC Design Conference (ISOC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉村侑恭, 井上敏之, 土谷亮, 岸根桂路
2. 発表標題 非接触心拍計測システムにおけるデジタルフィルタ回路規模削減手法の検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 井上敏之, 荒内航貴, 土谷亮, 岸根桂路	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 598
3. 書名 ストレス・疲労のセンシングとその評価技術	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 非接触生体モニタリング装置、非接触生体モニタリング方法、及び、プログラム	発明者 井上敏之, 岸根桂路, 土谷亮	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2022-170033	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

滋賀県立大学 工学部 電子システム工学科 電子回路分野 ホームページ
<https://www.e.usp.ac.jp/~ectw>

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
---------	---------