

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18307

研究課題名（和文）生体信号の非接触パターン計測を実現する電磁反射位相検出アレイの確立

研究課題名（英文）Study of Electromagnetic Reflection Phase Detection Array for Non-Contact Measurement of Biological Signals

研究代表者

門内 靖明（Monnai, Yasuaki）

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：90726770

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：生体計測の多くは体表に密着する電極やトランスデューサの利用を前提としており、安定性や再現性が課題となるのみならず、リハビリやスポーツといった動的な場面での活用が制限される。本研究ではそれを回避するため、テラヘルツ帯を中心とする電磁波に基づく新たな非接触生体計測技術に取り組んだ。具体的には、テラヘルツレーダーにより体表の微小振動を非接触に検出する手法と、テラヘルツ音響効果により体内に超音波を非接触に生成する手法とを並行して検討し、高い時空間解像度の非接触生体計測を行うための技術基盤を構築した。加えて、SN比の向上に向けて偏波面の制御やパルスピークパワーの向上のための要素技術の確立にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、生体信号を非接触にパターン計測するための技術を研究開発することで、例えば一瞬先の身体運動の推定や、筋疲労状態を計測してパワードスーツなどの制御入力として利用したり、リハビリテーションやスポーツトレーニングの負荷を調整したり、心疾患の兆候を早期検出したりすることを目指す点で社会的意義が大きい。また、要素技術が未だ不足しているテラヘルツ帯において、構造の工夫などを通してその課題を回避しながらレーダーの実装を進めたことや、一般にテラヘルツ波は水に強く吸収されるため体内用途には不向きと考えられていたものの、その吸収性をむしろ積極的に活用して超音波生成に用いた点などは学術的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：Biosensing is largely based on the use of electrodes and transducers that are attached to the body surface, which not only pose stability and reproducibility issues, but also limit their use in dynamic situations such as rehabilitation and sports. In order to avoid this problem, this study addressed a novel non-contact biosensing technology based on electromagnetic waves, mainly in the terahertz band. Specifically, we have developed a method for non-contact detection of minute vibrations on the body surface using terahertz radar and a method for non-contact generation of ultrasound waves inside the body using the terahertz acoustic effect, in parallel, to establish a technical basis for non-contact biosensing with high temporal and spatial resolution. In addition, we have established elemental technologies for controlling the polarization plane and increasing the pulse peak power to improve the signal-to-noise ratio.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツ波 生体計測 光音響効果 ビームステアリング アンテナ

1. 研究開始当初の背景

筋電や心電、あるいは脳波など、生体中には様々な信号が生じている。それを計測することは、ヘルスマニタリングのみならず、リハビリやスポーツトレーニングの評価、あるいはパワードスーツの制御など広範な場面において重要である。生体信号の非侵襲計測には皮膚に密着した電極が用いられることが多いが、その性能や結果は電極の貼り付け位置や状態に大きく依存するため安定性や再現性に課題がある。また、電極の脱着には手間がかかることに加え、運動や発汗を伴う場合には特にずれが生じやすく計測を行うことは困難である。同様の問題は、超音波エコーをはじめとする音響計測においても存在しており、体表にプローブを密着させて身体内外の音響インピーダンスを整合させなければ高いSN比の音響計測を行うことは困難である。

2. 研究の目的

本研究では、従来の生体計測で前提となっていた電極や超音波トランスデューサのような体表密着型のプローブを用いることなく、電磁波を用いて生体信号を非接触にパターン計測するための技術を研究開発することを目的とする。それにより、例えば一瞬先の身体運動の推定や、筋疲労状態を計測してパワードスーツなどの制御入力として利用したり、リハビリテーションやスポーツトレーニングの負荷を調整したり、心疾患の兆候を早期検出したりすることが可能になると考えられる。本研究では、それに向けた足掛かりを得ることを目指す。

その際、身体の外側ならびに内側において考えられる様々な作用機序を考察し、入射する偏波や異なる深さにパワーを伝達するための条件等について検討する。それにより、非接触でありながら安定的に生体信号を計測できるようにしつつ、臓器や筋の境界を解像可能な mm オーダの分解能を達成することを目指す。加えて、より高いSN比での計測を可能にすべく偏波面を制御したりパルスピークパワーを向上させたりする要素技術の確立にも取り組む。

3. 研究の方法

テラヘルツレーダーによる体表の微小振動計測、およびテラヘルツ音響効果による体内の超音波計測について要素技術を確立しながら並行して取り組む。テラヘルツレーダーでは、体表におけるテラヘルツ波の反射位相の変化を高速にパターン計測することにより微小振動を読み取る。テラヘルツ波をプローブとするレーダーを構築すると、波長がマイクロ波よりも短いため、計測の高解像度化とアンテナの小型化とが可能になる。テラヘルツ帯ではサーキュレータやフェーズシフタやなどの要素技術がまだ実用水準に達していないものの、これまでの研究代表者らの研究によって漏れ波アンテナに基づくシステム構成(図1)により測定対象の方向、距離、並びにサブ波長変位(位相シフト)を検出できることが分かっている。本研究ではまず、周波数掃引と解析を高速化し、それに伴って生じるトレードオフについて実験的に考察する。

テラヘルツ音響効果では、体表にテラヘルツ波を変調照射する際に生じる光音響効果を介して体内超音波を生成し、体内の情報を読み取る。光音響効果とは、光を吸収体に照射すると熱膨張を介して音波に変換される現象であり、例えば赤外パルス吸収時のヘモグロビンの発音に基づく血管イメージング等に応用されている。しかし、そのような顕著な吸収体のない臓器や組織の観察には、従来通りトランスデューサを体表に密着させて体内超音波を生成してエコー検出する必要がある。ここで、生体の主成分である水はテラヘルツ波を強く吸収することに注目すると、体表にテラヘルツ波を照射すれば皮膚が時定数の短い発音体となって体内超音波を非接触生成できる可能性がある。特に、近年進展の著しい高周波電子技術を活用することで、連続波のテラヘルツ波を用いて超音波を生成することが可能となり、コンパクトなシステムを構築できると考えられる。

4. 研究成果

【テラヘルツレーダーの時間・空間分解能の拡張に向けた取り組み】

一般に、レーダー計測においては反射信号位相のフレーム間差分を算出することで、対象物の位置や反射率などの微小変化を検出することができる。その際、測定間隔を短くするほど同一時間内に生じる変位が小さくなるため、より細かな変位を検出できるようになる一方で、差分値の小さい信号はノイズに埋もれやすくなる。このように、変位の速度と測定の間隔にはノイズレベルによって定められるトレードオフが存在する。高速化のために、測定データを複数のスレッドに分割して処理するための並列プログラムを作成し、リアルタイムに解析および可視化を行えるようにした。システムの動作速度はAD変換速度および周波数掃引速度に依存し、現在は後者がボトルネックとなっているものの、1ms程度の間隔での測定を行うことができる。

構築されたシステムにより高速な

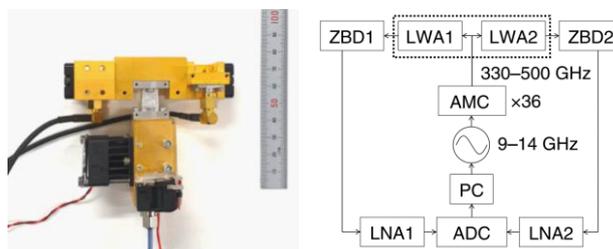


図1 漏れ波アンテナに基づく集積型テラヘルツレーダー

計測を行えるようにし、胸部からの反射信号を観測したところ、心電図と相関性の高い体表変位が顕著に観測されることを確認した(図2)。

なお、信号変化を多点並列的にパターン計測するために、中空導体板間に構成される導波構造中において多重反射伝搬するモードに着目して実効屈折率分布に基づくレンズを実装し、入力ポートから励振される波を2次元ビームに変換する構造を試作した。そして、反射波と参照波との非線形検波を行って位相を計測できるようにし、試験物体として配置した振動子の振動位相を読み取れることを原理実証した。しかし、取得された信号強度が低かったことから、漏れ量が最適化された導波構造の作製が必要となることが明らかとなった。

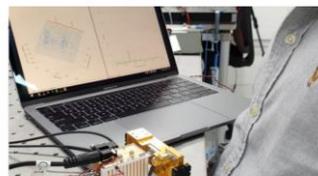
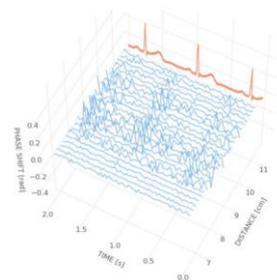


図2 非接触聴診器としてのレーダー応用

【テラヘルツ偏波面の電子制御】

送受信器間での無線伝送における S/N 比の向上や、キラル・複屈折性を有する物質の評価において偏波の制御は重要である。そこで、テラヘルツ波の偏波面を電子的に制御する方法を提案・実証した。具体的には、ハイブリッドカップラを介して結合する2台のガンダイオード発振器の結合位相をバラクタダイオードへの印加電圧によって制御することで、ハイブリッドカップラの2つの出力ポートに接続された直交偏波アンテナペアへのパワー分配率を連続的に制御し、直線偏波方向を任意に変えられることを実証した(図3)。

一般に、フリーラン発振周波数を調整可能な2台の発振器を結合発振させると、フリーラン発振周波数差に応じた位相差が生じる。ここで、ハイブリッドカップラを介して2台の発振器を結合させると、2つの出力ポートは2つの入力の和と差に対応するので、位相差を調整することによって出力ポート間の電力比を任意に調整することが可能となる。ここで、2つの出力ポートに直交する一対のホーンアンテナを接続することで、任意の偏波比が得られるようになる。今回、最大で31.8dBの偏波比を観測した(図4)。垂直方向と水平方向の偏波を完全に切り替えるには、94.3GHz付近で26.6MHz(0.03%)の周波数シフトを伴うことが分かった。提案手法により、サブテラヘルツ帯の信号の方向分岐や偏波比を、機械駆動を用いることなく導波構造上で電気制御できるようになる。本研究では原理実証のために導波管ベースの素子を用いて装置を構築したが、例えばマイクロストリップ線路ベースのハイブリッドカップラなどを用いることでよりコンパクトな集積化が可能と考えられる。

また、近年、人間の発汗状態がテラヘルツ帯で顕著なスペクトル変化から検出できる可能性が報告されている。本研究では、特に汗腺などの皮膚下の組織構造が円二色性を有する可能性に着目し、その検出に向けて左右円偏波を高速切替可能な手法を提案して原理実証した。今後は検出系と組み合わせ、体動などのアーティファクトを除去しながら計測を行うことに取り組んでいく。

【高強度パルス生成を可能にする共振スイッチングの提案と超音波帯での取り組み】

テラヘルツパルス源を高強度化できれば生体計測に資するが、一方で従来と同様の原理に基づく装置の巨大化を免れなくなる。そこで、連続波のエネルギーを共振器に蓄積し、瞬時に解放することでパルスのピークパワーの向上させる原理を考

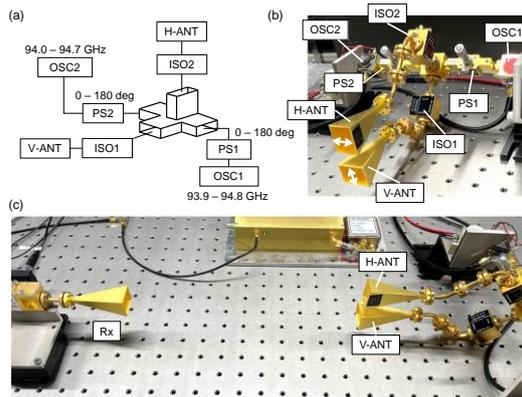


図3 テラヘルツ偏波面制御のための実験系。

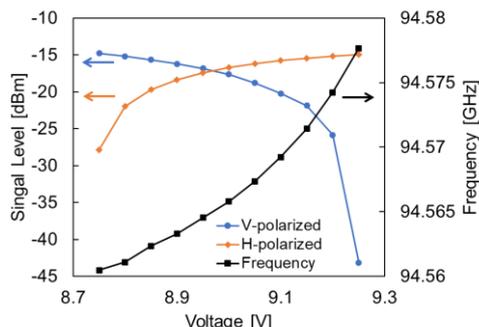


図4 バイアス電圧の変化による垂直(V)・水平(H)偏波の切替の様子。

また、近年、人間の発汗状態がテラヘルツ帯で顕著なスペクトル変化から検出できる可能性が報告されている。本研究では、特に汗腺などの皮膚下の組織構造が円二色性を有する可能性に着目し、その検出に向けて左右円偏波を高速切替可能な手法を提案して原理実証した。今後は検出系と組み合わせ、体動などのアーティファクトを除去しながら計測を行うことに取り組んでいく。

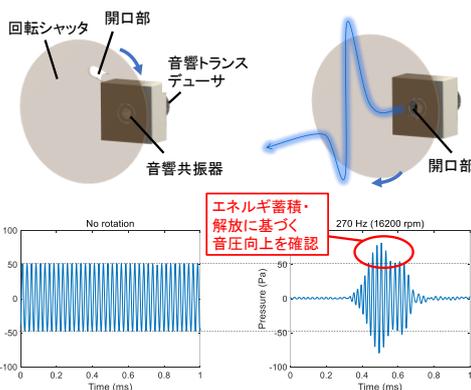


図5 音響エネルギーの蓄積・解放に基づく音響パルスの音圧向上。

案した。しかし、研究期間内にそれをテラヘルツ帯 De 実装することは技術的なハードルが高かったため、そのアナロジーとして、同程度の波長を有しつつも周波数が低く実験が容易な超音波を用いて原理実証を行った。

具体的には、音響トランスデューサに対して音響共振器を装着し、その前面の開口部を回転シャッターで覆って高速開閉すると、シャッターの回転速度が十分速ければ入力された連続波の 2.5 倍のピークパワーを持つパルスを生成できることを実証した (図 5)。その際、導波管フランジのチョーク構造と同様の音響チョーク構造を導入することで音響共振器の Q 値の低下を抑制した。一般に、トランスデューサで空中超音波を生成する際には音響インピーダンス不整合による効率低下が課題となるが、提案手法を用いると、一般的なトランスデューサを用いながらも入力より高いピークパワーの超音波パルスを空中に放出できることを明らかにした。Q 値を高めることでさらなる向上が見込まれる。今後は、同様の考え方を音響波ではなく電磁波に対して、7 桁短い時間スケールで実装する方法を検討していく。

【テラヘルツ音響効果の実証と応用への取り組み】

体表にテラヘルツ波を変調照射することで体内超音波を非接触生成する方法を提案・実証した (図 7)。これにより、従来の超音波エコーとは異なり、トランスデューサを体表に密着させることなく体内超音波を生成することが可能なことを原理実証した。一般にテラヘルツ波は水に強く吸収されるため、体内用途には不向きと考えられているが、ここではその吸収性を光音響効果としてむしろ積極的に活用した。他方、テラヘルツ波は布やプラスチックなど多様な材料を透過できるため、それらの境界越しに超音波を非接触生成することが可能となる。

その原理実証のため、まず変調テラヘルツ波を容器中の水に照射すると水中に超音波が生じること、ならびにその電磁・音響変換効率や周波数応答の実験値が理論計算に従うことを確認した。また、複数の硬さのゼラチンゲルに対してテラヘルツ波を照射して生成される音響信号を識別することで、試料に触れずに硬さを推定できることを原理実証した (図 7)。また、人間の手の甲側においてテラヘルツ波を変調照射スポットを走査させながら、手のひら側においてハイドロフォンを用いて取得された超音波を統合することで、手の内部の解剖学的イメージングが可能になることを原理実証した (図 8)。さらに、非接触超音波を水中ドローンや体内埋込式デバイスのための無線通信手段として使用する可能性についても原理実証を行った。これは、従来の無線通信では困難な、ウェットな環境下でも計測・通信を可能にする足掛かりとなり、将来的にはカプセル内視鏡のような体内のセンサ・ロボットとの通信にもつながる可能性が考えられる。

以上のアプローチを今後さらに深化・統合することで、日常生活中やスポーツ中などの場面に溶け込める体内超音波技術を実現し、予防医療や身体スキルの向上などへの貢献を引き続き目指していく。

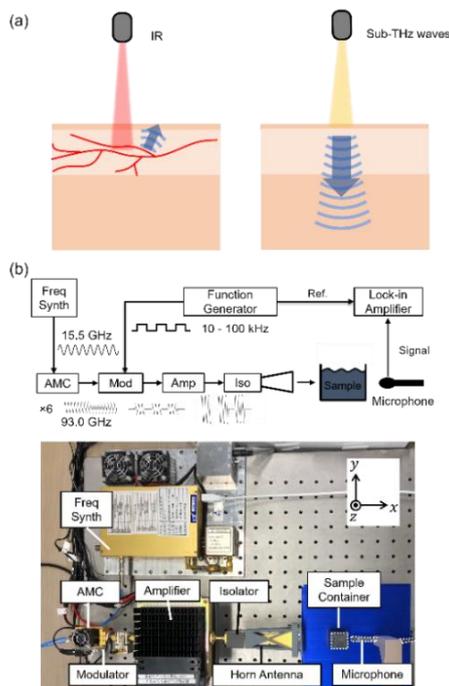


図 6 水分にテラヘルツ波を変調照射して超音波を非接触生成する実験系。

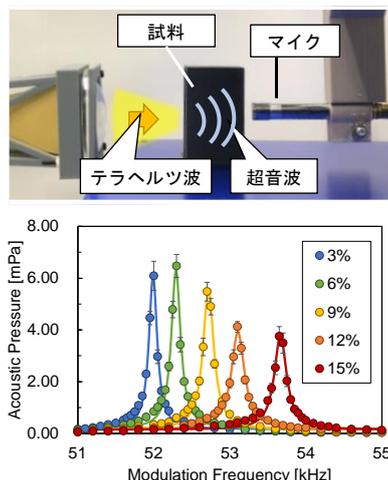
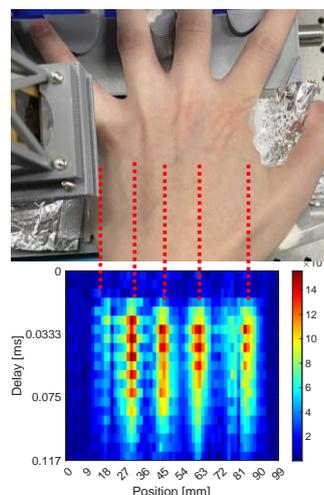


図 7 ゼラチンにテラヘルツ波照射する際に生じる音響スペクトル。



検出された超音波の強度マップ。骨の直下で弱くなっている。

図 8 手にテラヘルツ波を変調照射して非接触生成された超音波による解剖学的イメージングの原理実証。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hirata Tomoya, Inami Masahiko, Monnai Yasuaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Sub-terahertz photoacoustic effect enabling broadband ultrasound generation for underwater communication	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 96106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0160360	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 Ichikawa Natsumi, Monnai Yasuaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Generating <i>in vivo</i> continuous ultrasound based on sub-terahertz photoacoustic effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 86105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0157652	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 Sasao Keisuke, Monnai Yasuaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Voltage-Controlled Polarization at 0.1 THz Based on Phase-Tuned Coupled Oscillation via a Magic Tee	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 587 ~ 591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TTHZ.2022.3191233	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hashimoto Yuki, Monnai Yasuaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Airborne ultrasound pulse amplification based on acoustic resonance switching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-23277-8	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoki Tanaka and Yasuaki Monnai
2. 発表標題 wo-Dimensional Fixed-Frequency Terahertz Beam Steering Based on Displacement Controlled Leaky-Waveguides
3. 学会等名 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 2023, Montreal, Canada, 20.09.2023. (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 門内 靖明
2. 発表標題 テラヘルツ無線技術による身体近位空間の計測と通信
3. 学会等名 テラヘルツテクノロジーフォーラム 第15回テラヘルツビジネスセミナー (THz-biz 2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平田智也、門内靖明
2. 発表標題 連続変調テラヘルツ波による光音響効果の情報伝送への応用に関する検討
3. 学会等名 計測自動制御学会センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Itoh and Yasuaki Monnai
2. 発表標題 Dynamic Phase Measurement for Vibrometry Based on Leaky-Wave Terahertz Radar
3. 学会等名 2021 Asia Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤優希, 門内靖明
2. 発表標題 高速掃引型テラヘルツ漏れ波レーダーによる動的位相差計測
3. 学会等名 テラヘルツ応用システム研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Information Somatics Lab Projects https://star.rcast.u-tokyo.ac.jp/category/project/
--

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