

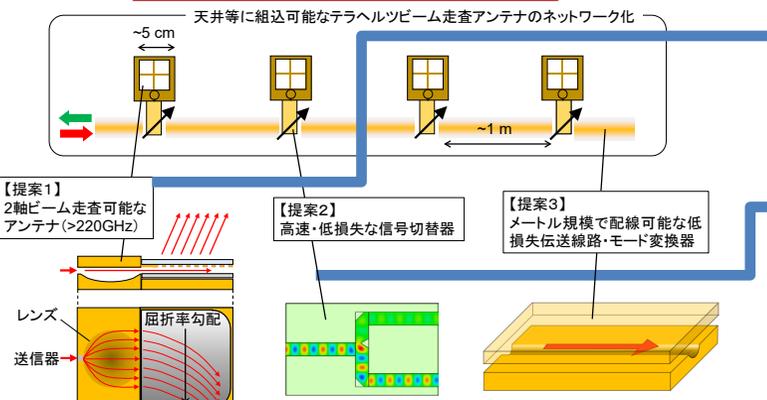
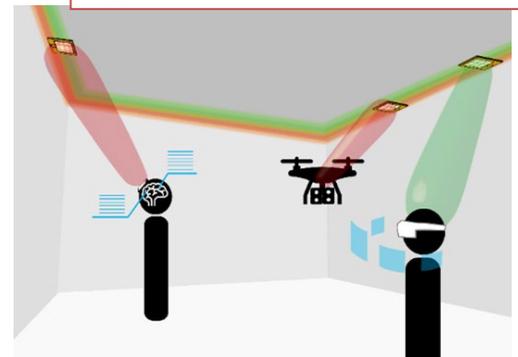
1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名 サイバネティック・フロントエンドを無線化する追従型テラヘルツリンクの研究開発
- ◆受託者 国立大学法人東京大学
- ◆研究開発期間 令和4年度～令和5年度 (2年間)
- ◆研究開発予算 (契約額) 令和4年度から令和5年度までの総額200百万円 (令和5年度100百万円)

2. 研究開発の目標

物理世界と情報世界の間で人を取り巻くサイバネティック・フロントエンドを無線化するための研究開発を行う。現象や体験をありのまま記録する計測 (例えばライトフィールドカメラ、モーションキャプチャ、レーダー、超音波エコー、多点生体電位計測、BMI等) は空間的にも時間的にも大容量のデータを生成するが、それゆえデータ伝送に有線接続が不可欠となり計測対象が狭まる。本研究開発では、分散配置可能なテラヘルツビーム走査アンテナをネットワーク化することで、ポリュメトリックセンサデータの無線伝送基盤を構築する。この技術基盤を活用することで、人の身体的・社会的な活動を妨げることなく認識行動を支援・拡張することを目指す。

3. 研究開発の成果

①追従型テラヘルツリンク	目標	成果
 <p>天井等に組込可能なテラヘルツビーム走査アンテナのネットワーク化</p> <p>~5 cm</p> <p>~1 m</p> <p>【提案1】 2軸ビーム走査可能なアンテナ (>220GHz)</p> <p>【提案2】 高速・低損失な信号切替器</p> <p>【提案3】 メートル規模で配線可能な低損失伝送線路・モード変換器</p> <p>レンズ</p> <p>送信器</p> <p>屈折率勾配</p>	<p>点励振を2次元平面波に変換し、導波構造中の偏向導波部の傾斜および漏れ波放射部の平板間距離を変位を制御することで、280GHzにおいて水平方向に±37°、垂直方向に18°程度の2軸ビーム走査を達成した。</p> <p>テラヘルツ波の信号を切替可能な切替器を実現した。平均スイッチング時間は36.8msで、270GHzにおいてオン状態の挿入損失2.6dB、3dB帯域幅110GHz以上。オフ状態におけるアイソレーションは20dBを達成した。</p> <p>送受信機間の距離が動的に変化する状況において、半波長ごとに生じる受信感度の低下を抑えるために、位相シフタを発振器後段かつ周波数逡倍器前段に挿入する信号位相追従同期検波回路を開発した。</p>	<p>研究開発項目1-a) 2軸ビーム走査アンテナ</p> <p>点励振を2次元平面波に変換し、導波構造中の偏向導波部の傾斜および漏れ波放射部の平板間距離を変位を制御することで、280GHzにおいて水平方向に±37°、垂直方向に18°程度の2軸ビーム走査を達成した。</p> <p>研究開発項目1-b) 中継伝送システム</p> <p>テラヘルツ波の信号を切替可能な切替器を実現した。平均スイッチング時間は36.8msで、270GHzにおいてオン状態の挿入損失2.6dB、3dB帯域幅110GHz以上。オフ状態におけるアイソレーションは20dBを達成した。</p> <p>研究開発項目1-c) ビームトラッキング</p> <p>送受信機間の距離が動的に変化する状況において、半波長ごとに生じる受信感度の低下を抑えるために、位相シフタを発振器後段かつ周波数逡倍器前段に挿入する信号位相追従同期検波回路を開発した。</p>
<p>②ポリュメトリックセンシングに基づく認識行動支援</p>  <p>大容量センサデータの無線伝送により、サイバー・フィジカルスペースのシームレスな統合を実現。</p> <p>ケーブル等でユーザを身体的に拘束することなく、運動・知覚を拡張できることを実証。</p>	<p>4GSa/sの高速DAC・ADCが内蔵されたFPGAボードを用いて、1GBaudの速度で16QAM方式でテラヘルツ波を変復調できるようにし、10GbEthernetの packets を乗せて伝送できることを実証した。</p> <p>運動学習拡張のために2軸駆動可能で低慣性モーメントの装着型パラレル機構を作製し、ユーザに対して外力を提示しつつ、運動を3次的に方向に誘導可能であることが示唆された。</p> <p>空間知覚拡張のため、シースルー型HMDによる画像編集に基づくインタラクションシステムを設計し、試作に着手した。</p>	<p>研究開発項目2-a) 高速有線インタフェースの無線化</p> <p>4GSa/sの高速DAC・ADCが内蔵されたFPGAボードを用いて、1GBaudの速度で16QAM方式でテラヘルツ波を変復調できるようにし、10GbEthernetの packets を乗せて伝送できることを実証した。</p> <p>研究開発項目2-b) 運動学習の拡張</p> <p>運動学習拡張のために2軸駆動可能で低慣性モーメントの装着型パラレル機構を作製し、ユーザに対して外力を提示しつつ、運動を3次的に方向に誘導可能であることが示唆された。</p> <p>研究開発項目2-c) 空間知覚の拡張</p> <p>空間知覚拡張のため、シースルー型HMDによる画像編集に基づくインタラクションシステムを設計し、試作に着手した。</p>

① 追従型テラヘルツリンク

研究開発項目1-a) 2軸ビーム走査アンテナ

テラヘルツ波を2軸ビーム走査するための平面アンテナを提案・設計し、試作・評価した(図1)。提案構造は導体板間をTEモードで伝搬する2次元導波構造をベースとし、給電部・偏向導波部・漏れ波放射部の3要素からなる。給電部では、導波管フランジから給電されるテラヘルツ波を平面波に変換する。偏向導波部では、導体板間の微小な傾斜により実効屈折率分布に勾配を設け、通過する伝搬波の軌跡を曲げる。そして、導体メッシュ層からなる漏れ波放射部より、平板間距離に依存した指向性ビームを放射する。提案手法により、280GHzにおいてビームを水平方向に $\pm 37^\circ$ 、垂直方向に 18° 傾けられることを明らかにした。その3dB帯域幅は9、7GHz、10dB帯域幅は17.3GHzであった。

また、給電部として平板間距離を連続的に変化させて実効屈折率分布による実効レンズを実装し、トポロジ最適化に基づいて広帯域化する手法を提案し、250-300 GHzにかけてビーム幅12mm(約11波長)の均一なビームを形成できることを実証した。

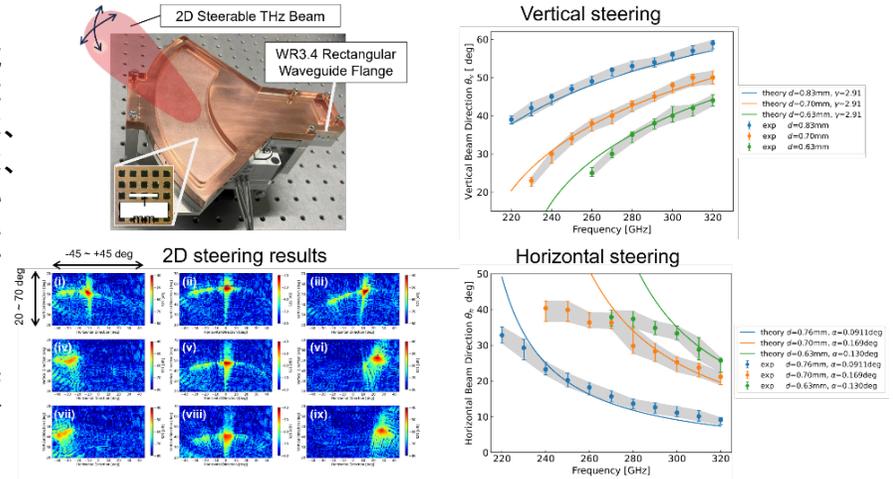


図1 2軸ビーム走査可能な平面アンテナ

研究開発項目1-b) 中継伝送システム

テラヘルツ波を2方向にスイッチング可能な導波管切替器を提案・設計し、試作・評価した(図2)。T字分岐導波管をベースとし、分岐部に設けた可動先端部を微小変位させることにより出力ポートを切替可能にした。平均スイッチング時間は36.8msで、オン状態における270GHzでの挿入損失は2.6dBであり、3dB帯域幅はWR3.4帯での測定帯域幅110GHzよりも広がった。オフ状態におけるアイソレーションは20dBであった。

また、別プロジェクトとして進めていた研究により、変調テラヘルツ波を水に照射すると光音響効果により水中超音波を生成できることが分かった。本研究開発では、その広帯域性を実験・理論両面から解析し、水中通信に応用できることを新たに原理実証した。伝送帯域幅はkHz~MHz帯に制限されるものの、本来テラヘルツ波だけでは通信圏外となる水中にも通信圏内を拡大する一つの方法となりうることを示した。

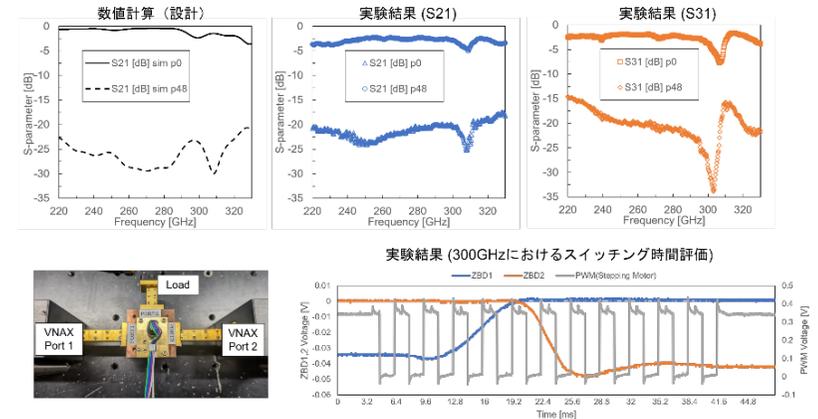


図2 導波管切替機

研究開発項目1-c) ビームトラッキング

送受信機間の距離が動的に変化する状況において、半波長ごとに生じる受信感度の低下を抑える手法を実現した(図3)。具体的には、位相シフタを発振器後段かつ周波数通倍器前段に挿入する信号位相追従型同期検波回路を開発した。通信データをパケット化して先頭に同期信号を付与し、同期信号の期間に位相シフト電圧をスイープすることで、振幅が最大になる点を見つけて固定する。これにより、周波数通倍型のテラヘルツ帯無線通信機全般に対して適用可能な、ミキサ1台によるホモダイン検波回路構成を実現した。以上の内容について特許を出願するとともに、自由空間に電波を放出しながら実験を行うために必要な免許を取得した。

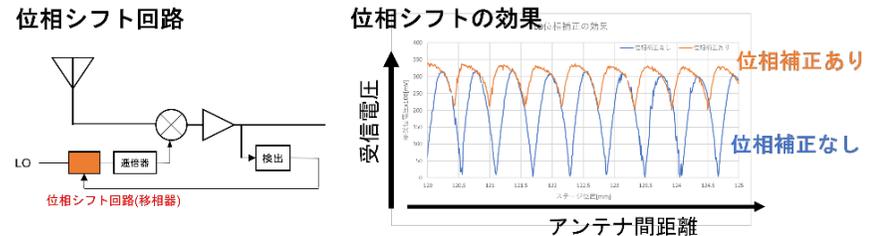
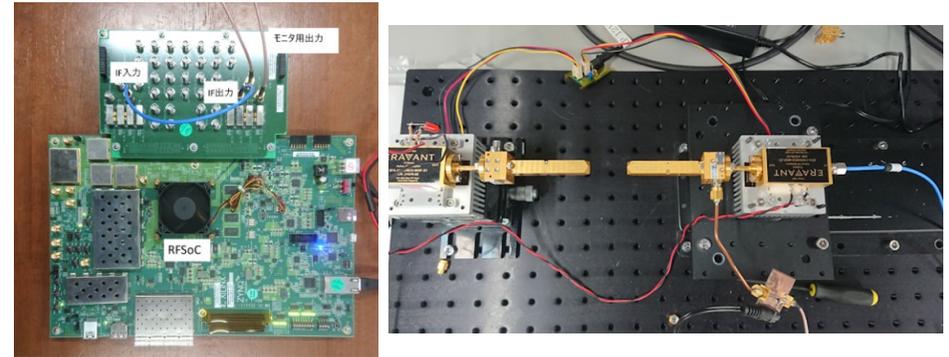


図3 位相追従型同期検波回路

②ポリュメトリックセンシングに基づく認識行動支援

研究開発項目 2-a) 高速有線インタフェースの無線化

4GSa/sの高速DAC・ADCが内蔵されたFPGAボードを用いて、250Mbaud 16QAM (1Gbps) でデジタル変調されたIF (中間周波) 信号を生成できることと、IF信号からベースバンド信号を復調できることを確認した。また、AMC (Amplifier Multiplier Chain) とSHM (Sub Harmonic Mixer) を用いて220 ~320GHzのテラヘルツ波を生成できることと、SHMを用いてテラヘルツ波からIF信号へのダウンコンバートが可能であることを確認した (図4)。上記テラヘルツ波に10Gイーサの packets を乗せて伝送できることを確認した。



研究開発項目 2-b) 運動学習の拡張

道具を用いた運動技能を汎用的に支援するための装着型システムを考案した。具体的な実装として、図5に示すようなユーザによって把持される道具に対して前腕から力覚提示を行う装置を開発した。装置および把持した道具の位置・姿勢は外部のモーションキャプチャシステムによって約300Hzで計測され、それをもとに提示する力フィードバックが計算されることで運動介入や支援、ユーザへの触力覚提示を行う。開発した装置の刺激提示・運動介入性能、およびユーザが知覚しうる刺激の特性を評価するため、基礎的な評価実験を実施した。その結果、装着装置でありながらユーザに対して外力として知覚されるような力覚を提示できることがわかった。また、本システムにより、ユーザの運動を任意の3次元方向に誘導可能であることが示唆された。

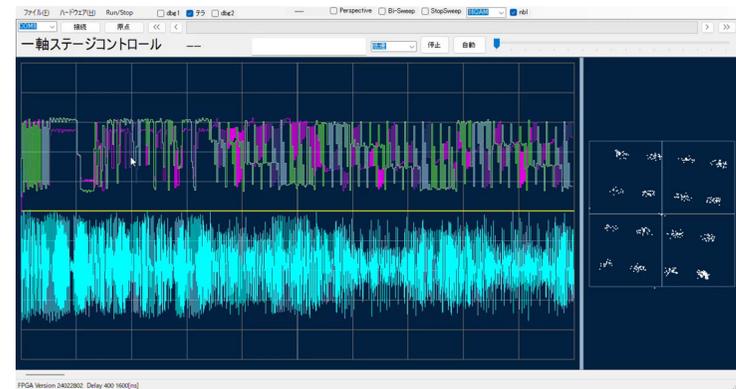


図4 FPGAを用いる 220-300 GHz 変調回路

研究開発項目 2-c) 空間知覚の拡張

シースルー型HMDと画像編集技術を用いて、遠隔地にいる複数のユーザが、それぞれの環境と体験を相互共有可能な対称型ウェアラブル・テレプレゼンス・システムを開発した (図6)。このシステムでは、各ユーザが360°カメラとARグラスを装着して映像の送信と受信を同時に行い、自身の視界に他者の視界を重畳表示する。これにより自身および他者が存在している複数の空間を同時に知覚できるようになる。このシステムによって生み出される体験やコミュニケーションの調査を目的としたフィールドスタディでは、参加者が自分の環境の探索と他ユーザーの動画配信の視聴をシームレスに切り替え、時には他ユーザーのARコンテンツを自分の環境に重ね合わせることで、一緒に歩いている感覚を得られたことが示唆された。



図5 道具を用いた運動支援のための装着型システム



図6 複数のユーザが相互の視界を通して環境と体験を共有することで空間知覚を拡張するシースルーHMDの実装

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
0 (0)	2 (2)	1 (1)	20 (11)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	1 (1)

※成果数は累計件数、（ ）内は当該年度の件数です。

(1) 本委託研究の核となる成果であるテラヘルツ2軸ビーム走査について国際会議IRMMW2024にて口頭発表した結果、当該会議の中から顕著な成果を集めるIEEE Transactions on Terahertz Science and Technology誌の特集号に招待論文の執筆を依頼された。当該論文は現時点で査読中のため上記には含めていないが、2024年7月頃に出版される見込みである。なお、同誌には本委託研究に関連して他2件の論文を投稿中である。

(2) 本委託研究の核となる、テラヘルツ無線技術と人間拡張工学との共進化についての考え方を説明する解説論文の執筆を電子情報学会通信ソサイエティより依頼され、上記には含めていないがソサイエティマガジンB_Plus No. 70に掲載予定である。

(3) 送受信機間の距離が動的に変化する状況において、半波長ごとに生じる受信感度の低下をミキサ1台のみを用いて抑制する手法を実現した。具体的には、位相シフタを発振器後段かつ周波数数倍器前段に挿入する信号位相追従型同期検波回路を開発した。この内容について2件の米国特許出願を行うとともに、2024/2/29の電子情報通信学会マイクロ波研究会にて発表した。

(4) テラヘルツ波を直接変調して10GbEthernetを伝送する実証実験を世界に先駆けて行い、2024/3/5の電子情報通信学会総合大会にて発表した。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究開発で実現したビーム走査技術について、今後はデバイスの製造方法に限らず、ビーム走査に基づくトラッキングアルゴリズムなどについても実用的な仕様を定め、関連知財を出願するほか学術論文・国際会議にて発表していく。そのうえで、SNS等を用いたオンライン発信に加えて、各種展示会などでの展示・実演を行って広く周知していく。

また、現時点で、研究開始当初には着想していなかったビーム走査法を2つ着想しており、計3通りのアプローチを試している。これらについて、今後迅速な知財化ならびに論文発表を行うとともに、最適な方法を選定しシステム化していく。提案するビーム走査技術は、通信キャリアと端末メーカーのそれぞれの事業において必要となる技術である。前者では例えば街灯や建物の天井などに組み込まれ、後者ではスマートフォンやARグラスなどのモバイル・ウェアラブル端末に搭載される見込みがある。これらの事業者との協業により5G通信の実現に貢献する。また、具体的な応用イメージを喚起することで、関連技術の開発を促進させる。

同時に、高速大容量・低遅延に感覚情報を送受信する基盤を応用することで、本研究開発で取り組んできた運動学習・空間知覚の拡張について、より実践的な取り組みを進めていく。例えば、視覚の時間分解能を超えたフレームレートのデータや複数人分の視界データなどを伝送しつつ、その情報を感覚に還元するアプローチを検討する。また、力触覚を介した運動感覚支援によって特定の技能・拡張体験の実現やモチベーション支援を行うアプローチを検討する。これらを通して、高速大容量・低遅延なデータ伝送がユーザの認識や行動にもたらす変化を考察していく。