



Title	Toward Higher Resolution Millimeter-wave and Terahertz Imaging System for Imaging Applications
Author(s)	王, 雅珩
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101669
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name	(WANG YAHENG)
Title	Toward Higher Resolution Millimeter-wave and Terahertz Imaging System for Imaging Applications (イメージング・アプリケーションのためのミリ波・テラヘルツ波イメージング・システムの高解像度化に向けて)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>In practical applications, the demand for high-resolution imaging has grown considerably, particularly in millimeter-wave (MMW) and terahertz (THz) research. MMW and THz imaging technologies, with their unique advantages in non-destructive testing, materials analysis, biomedical imaging, and security screening, have garnered widespread attention. MMW imaging, capable of penetrating non-metallic materials, is well-suited for industrial inspection and body scanning. In contrast, the THz spectrum offers high-resolution imaging and material spectral analysis, demonstrating significant potential in biomedical and materials sciences. Despite the FMCW MMW radar's strong performance in range measurement and object recognition, it still faces challenges in resolution, scanning speed, and noise control. Likewise, THz continuous wave (CW) systems face limitations in imaging speed and depth of focus, making them insufficient for high-speed industrial inspection, while THz time-domain spectroscopy (TDS) systems remain largely confined to biological sample analysis and cannot yet resolve individual cells. To address these technological constraints, this research proposes innovative imaging techniques utilizing MMW FMCW radar and THz-CW and TDS systems, emphasizing improvements in imaging resolution. These advancements are anticipated to drive the application of MMW and THz technologies across industrial and biomedical fields, meeting the growing demand for high-performance imaging systems.</p> <p>This dissertation is composed of seven chapters:</p> <p>Chapter 1 provides an overview of MMW and THz imaging fundamentals, highlighting the research objective: developing higher-resolution and more efficient MMW and THz imaging systems to overcome current technological limitations.</p> <p>Chapter 2 reviews FMCW MMW radar and THz-CW and TDS systems, analyzes challenges related to resolution, speed, and application scope, and introduces innovative solutions designed to advance these systems.</p> <p>Chapter 3 details the development of a high-resolution 3D point cloud imaging algorithm based on MMW FMCW data, presenting the principles of FMCW radar and elaborating on 2D and 3D point cloud reconstruction methods. Multi-angle scans and data reconstruction achieve a resolution below 1 mm, with clear imaging results for human and concealed objects.</p> <p>Chapter 4 explains the process of classifying 3D reconstructed objects using the PointNet++ deep learning model. By optimizing training datasets and sampling points, the model achieved high accuracies of 0.998 on the training set and 0.996 on the test set, successfully classifying objects within a box containing concealed objects.</p> <p>Chapter 5 showcases the development of a high-speed 600 GHz THz imaging system with enhanced focal depth. Using a polygon mirror to accelerate data acquisition and an integrated off-axis parabolic mirror to replace the traditional f-theta lens, the system achieves a 170 mm focal depth and a resolution of 2 mm and successfully detects metallic objects in high-speed motion.</p> <p>Chapter 6 focuses on high-resolution single-cell imaging with the THz-TDS system. This chapter introduces the system and cell samples used, presenting imaging results of four different cell types, each approximately 10 μm in size. Furthermore, the non-local means denoising algorithm was introduced, effectively removing noise while preserving cellular features, thereby enhancing the imaging quality.</p> <p>Chapter 7 presents the conclusions and prospects for future research.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (WANG YAHENG)		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	斗内政吉
	副査 教授	尾崎雅則
	副査 准教授	村上博成
	副査 教授	小島一信
	副査 教授	森勇介
	副査 教授	片山光浩
	副査 教授	丸山美帆子
	副査 教授	片山竜二
	副査 教授	近藤正彦
	副査 教授	森伸也
	副査 教授	廣瀬哲也

論文審査の結果の要旨

イメージングの応用において、高解像度イメージング技術への需要は特にミリ波 (MMW) とテラヘルツ (THz) の研究分野で顕著に増加している。MMW イメージングは非金属材料を透過でき、産業検出や人体スキャンに適している。テラヘルツイメージングは高解像度と分光分析能力を持ち、バイオメディカルや材料科学分野で大きな可能性がある。FMCW (周波数変調連続波) ミリ波レーダーは距離測定やターゲット識別に優れているが、解像度、スキャン速度、ノイズ制御に関しては依然として課題がある。同様に、テラヘルツ連続波 (CW) システムはイメージング速度や焦点深度に制限があり、高速産業検出には十分ではない。また、テラヘルツ時域分光 (TDS) システムは生物サンプル分析に使用されているが、単一細胞の解像度には至っていない。これらの技術的課題に対し、今回の研究では MMW FMCW レーダーおよびテラヘルツ CW と TDS システムに基づく革新的なイメージング技術を提案し、特に解像度向上を目指した。以下は主な研究成果の概要である。

まず、ミリ波イメージング分野では、3D イメージングアルゴリズムを開発し、4 GHz 帯域幅の FMCW レーダーを使用して 1 mm の解像度を持つ 3D 点群イメージングを実現している。さらに、16 の異なる角度から衣服を着た人物をスキャンし、人体表面の 3D 再構築を成功させ、表面の不規則な特徴を鮮明に示している。この結果を基に、人工知能をミリ波イメージングに初めて組み合わせ、PointNet++アーキテクチャを用いてミリ波レーダーでスキャンした箱内の隠れた物体の分類を行い、分類精度は訓練データセットで 0.998、テストデータセットで 0.996 を達成している。

次に、テラヘルツ CW イメージング分野では、600 GHz のテラヘルツイメージングシステムを開発し、高解像度を維持しながら、高速イメージングと長焦点深度を実現している。多面鏡を導入することで、250 Hz のスキャン周波数と 500 mm/s のプラットフォーム速度で約 2 mm の空間解像度を達成した。また、設計した統合型離軸放物線鏡 (OAP 鏡) は 170 mm の焦点深度範囲内で 2 mm の解像度を実現している。さらに、このシステムは異なる厚さのポリエチレン繊維の下に隠れた金属物体を成功裏にイメージングし、実用性を示している。

最後に、テラヘルツ TDS イメージング分野では、SPoTS 顕微鏡の単一細胞イメージングへの応用を探求し、初めて 10 μm のマウスマラノーマ細胞に対して透過モードで高解像度のイメージングを実現している。非局所平均法によるノイズ除去アルゴリズムを組み合わせ、画像の鮮明度をさらに向上させた。また、反射モードでは、テラヘルツ分光を使用して、1 μM の cytochalasin D を処理した細胞の特徴的な違いと、異なる転移性条件下での顕著な変化を分析している。

以上のように、本論文はミリ波およびテラヘルツイメージング分野において、高解像度イメージング技術の多くの革新的な成果を達成している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。