

論文内容要旨 (和文)

2018年度入学 大学院博士後期課程

バイオ工学専攻 応用生命分野

氏 名 榎山 誉



論文題目

テラヘルツ波3次元イメージングを用いたインフラ構造物の非破壊検査応用に関する研究

近年、トンネル、橋梁、道路といった社会インフラ構造物の老朽化や維持管理が、世界中で深刻な社会問題になっている。特に日本では、1960年代の高度経済成長期に大量に建設されたインフラが耐用年数といわれる50～60年を迎えようとしている。しかし、インフラの建設には膨大な時間と費用がかかるため、建て替えは容易ではない。従って、点検と補修などのメンテナンスによって現行インフラを長寿命化（ライフサイクルを長期化し、安全に長く使用）することは、トータルコストの削減において非常に重要である。インフラ構造物の壁面剥落は、そのような問題の一つであり、人命に関わる重大な事故につながる危険性がある。現在、このような事故を防ぐため、目視点検や打音検査などの各種試験が定期的実施されている。しかし、これらの検査方法は「熟練作業員の人員不足」や「作業の安全性確保」などの課題がある。そのため、作業員の技量に依らない非接触かつ非破壊で3次元(3D)の内部情報を取得可能な検査方法のニーズが高まっている。本研究では、剥落事故防止に貢献することを目的とし、テラヘルツ (THz) 波を活用したインフラ構造物壁面内部の空隙検知方法について考察した。THz波は周波数 100 GHz～10 THz 程度の電磁波であり、周波数 0.1～1 GHz 程度のマイクロ波レーダと比較して高い空間分解能での撮像が期待できる。また、タイルやモルタルといった建設材料に対して、数十 mm 程度の透過性があることが知られており、壁面の非破壊検査応用への可能性がある。特に THz-SS-OCT (THz swept source optical coherence tomography) は、小型、低コスト及び、高 SNR を特徴とした反射型 3D イメージング法であり、検査応用に適している。一方で、従来のフーリエ変換による解析方法では、光源の帯域幅によって深さ分解能を制限されるという課題がある。

本研究では、周波数 75–110 GHz の可変周波数光源を用いて THz-SS-OCT システムを構築した。また、深さ分解能向上のための解析方法として、バンドパスフィルタと特異値分解を用いたノイズ除去とアニヒレーティングフィルタを組み合わせた深さ超解像解析方法 (DSRA: depth super-resolution analysis) を提案し、その効果を検証した。DSRA の深さ分解能を評価するため、プラスチック製の段差サンプルを用いて測定を行った結果、厚さ 1 mm の表面と裏面を分離することに成功した。これは従来のフーリエ変換による深さ分解能の 1/3 を達成したことに相当する。さらに、繰り返し測定における不確かさを評価した結果は 46 μm であり、DSRA が従来比 1/70 の非常に高いポテンシャルを有していることを実証した。また、セラミックタイルの裏側に疑似欠陥（空隙）を設置した多層構造サンプルの 3D イメージングを行い、従来法よりも非常に鮮明な深さ方向の界面を描出できることを示した。他方、THz-SS-OCT の到達深度については、厚さ 50 mm の乾燥モルタルを用いて評価を行った。結果、モルタル裏面からの反射信号が検出されたことから、深さ 50 mm までの測定が可能であることを確認した。

より具体的な応用を検討するため、道路トンネルの壁面検査にフォーカスして、THz-SS-OCT による移動体計測システムに求められる仕様を調査した。結果として、測定の長距離化と高速化が特に重

要であることが明らかとなったため、それらの可能性を検討した。測定の長距離化においては、目標の測定距離 4 m で横分解能 70 mm を得るための光学系の設計を行い、光学シミュレーションから目標を達成可能であることを示した。また、高速化においては、目標の移動体速度 5 km/h を達成するための掃引光源を高速化 (100 μ s/sweep, 繰り返し 10 kHz) を実証した。

論文内容要旨 (英文)

2018年度入学 大学院博士後期課程

バイオ工学専攻 応用生命分野

氏 名 榎山 誉



論文 題 目

Study of nondestructive inspection for infrastructure using Terahertz-wave three-dimensional imaging

In recent years, the deterioration of social infrastructure such as tunnels, bridges, and roads have become a serious social concern all over the world. Especially in Japan, the infrastructures constructed in large numbers during the age of high economic growth in the 1960s are approaching the end of their useful life, which is said to be 50–60 years. However, the reconstruction of social infrastructure is challenging because of the substantial time and expense required. Thus, in order to reduce the total cost, it is very important to extend the life cycle of the existing infrastructure and to keep their safety by maintenance such as inspection and repair. The exfoliation of wall surfaces of infrastructure is one of such problems, which may lead to fatal accidents involving human lives. To detect possible wall exfoliation, various inspection techniques such as visual inspection and hammering tests are performed regularly. However, the effectiveness of these inspections is constrained by two issues: the manual and subjective performances by individual experts, and the insufficient number of available experts for building and infrastructure inspection. Thus, it is imperative to develop a novel inspection technique for contactless and nondestructive measurement of three-dimensional (3D) internal structures without depending on the skill of workers. In this study, we considered a method for detecting voids inside the wall of an infrastructure utilizing terahertz (THz) waves to contribute the prevention of exfoliation accidents. THz waves are electromagnetic waves in the frequency range about 100 GHz to 10 THz and can be expected to be imaged with higher spatial resolution than microwave radars in the frequency range about 0.1 to 1 GHz. In addition, it was reported that construction materials such as tiles and mortar have a penetration depth of about several tens of mm, which holds the potential for non-destructive inspection of walls. In particular, THz-SS-OCT (THz swept source optical coherence tomography) is a reflective 3D imaging method characterized by its small size, low cost, and high SNR and it is suitable for inspection applications. On the other hand, the conventional analysis method by Fourier transform has an issue that the depth resolution is limited by the bandwidth of the light source.

We constructed a THz-SS-OCT system using a frequency-tunable source operating in the frequency range of 75–110 GHz. In addition, as an analysis method for improving depth resolution, we proposed a depth super-resolution analysis method (DSRA: depth super-resolution analysis) that combines noise reduction processing using a bandpass filter and singular value decomposition and an annihilating filter, and its effectiveness was verified. In order to evaluate the depth resolution of DSRA, measurements were performed using a plastic step sample. As a result, the 1 mm thick front and back surfaces of the sample were resolved. This resolution is approximately 1/3 that of conventional Fourier transform. Furthermore, the uncertainty in repeated measurements was evaluated to be 46 μm , demonstrating that DSRA holds a very high potential of 1/70 of the conventional value. In addition, 3D imaging of a multilayered sample with

pseudo-defects (voids) on the backside of a ceramic tile was performed, and reconstruction of a significantly sharper cross-sectional void image than in the conventional analysis was succeeded. To evaluate the penetration depth of the THz-SS-OCT, measurements were performed using dried mortar with a thickness of 50 mm. As a result, the reflection signal from the backside of the mortar was detected, and it was confirmed that the measurement of 50 mm depth was possible.

In order to examine more specific applications, we focused on the wall inspection of road tunnels and investigated the specifications required for mobile measurement systems using THz-SS-OCT. According to the result, it was found that the extension of working distance and the improvement of measurement speed are particularly important, so those possibilities were examined. For the extension of working distance, we designed the optical system to obtain the target measurement distance of 4 m and the lateral resolution of 70 mm, and the optical simulation showed that the target can be achieved. To achieve the target moving velocity of 5 km/h, we demonstrated a high-speed sweep (100 μ s/sweep, 10 kHz repetition).

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和3年1月27日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 湯浅 哲也

副査 大谷 知行

副査 横山 道央

副査 渡部 裕輝

副査 姜 時友

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	バイオ工学専攻・応用生命分野 榎山 誉		
論文題目	テラヘルツ波3次元イメージングを用いたインフラ構造物の非破壊検査応用に関する研究		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和3年1月19日～ 令和3年1月27日
論文公聴会	令和3年1月27日	場 所	工学部7-301教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和3年1月27日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

急速に老朽化が進む高度経済成長期に建設されたインフラ構造物や建築物に対して、国や自治体は逼迫する財政の中でそれらの修繕・更新・廃棄への速やかな対応を迫られている。とくに、多発する壁面の剥落は、死亡事故に至る事態も発生し看過できない状況にある。重大な事故を未然に察知・防止するために、壁面の状態を非破壊的・非接触的・効率的に検査する技術が強く望まれている。榎山氏の研究動機は、タイルやコンクリートなどに比較的高い透過性を示す周波数帯である THz 波を用いた、安全性・定量性・高速性および可搬性を兼ね備えた壁面内部状態の検査方法の確立である。本研究では、眼科分野で広く用いられている OCT (Optical Coherence Tomography) の撮像原理を用いて、到達深度と深さ分解能を両立する新しい壁面非破壊検査方法を提案した。

建設材料の測定において 50 mm の到達深度を確保するためには 90 GHz 帯の電磁波を用いることが有利である。そこで、75-110 GHz 帯光源を用いた周波数掃引型 OCT を構築し、基本的な撮像特性を実験により調査したところ、焦点深度 81.6 mm、横分解能 7.4 mm、深さ分解能 3.3 mm であり、目標である深さ 50 mm にある 5 mm 程度の空隙を検出するに十分な特性を示した。すでに深さ分解能は理論値に到達しており、ハードウェアは最適化されているが、本システムにより得られた信号に対して、ノイズ抑制処理および超解像処理を適用することで深さ分解能 46 μm を実現した (従来方式の約 70 倍の改善)。最後に、道路トンネルの壁面検査に特化した車載型計装システムに求められる諸元を精査した後、プロトタイプを製作した。本計装システムは周波数掃引速度 100 μs 、測定距離 4 m、横分解能 70 mm の撮像性能を示した。さらに、本システムは、新規に考案された、放物面と楕円面を組合せた走査光学系を有し、理論上、速度 5 km/h で走行する車両に搭載してトンネル壁面内部を検査できる設計になっている。

本研究で提案・実現された THz-OCT は、THz 波を用いた超解像断層撮像システムという学術的新規性を有するだけでなく、インフラ検査法として実用に耐えうる撮像特性を有している。これより本研究は博士論文に相応しい成果を挙げたと判断できる。また、学位論文は、上で述べた学術的成果を余すところなく論理展開している。さらに、研究成果はすでに学術論文および国際学術会議において筆頭著者として発表していることから学位申請のための要件も満たしている。以上に鑑み、本学位論文審査を合格と判定する。なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ない。

最終試験の結果の要旨

博士論文公聴会における質疑応答および個別面接試問を通して、問題の分析力、研究の進め方、関連する専門知識とその応用力、論理構成力について博士後期課程に要求される能力を十分に備えていると認められた。また、筆頭著者として執筆した 2 本の原著論文を英語で執筆したこと、また、これまでに複数回の国際会議において口頭発表したことから、研究を国際的に遂行するための十分な外国語能力を有すると判断された。以上に鑑み、合格と判定した。