

# 論文内容要旨（和文）

平成 20 年度入学 博士後期課程

専攻名 システム情報工学

氏 名 範 洪輝



論 文 題 目 木柱を対象としたML-EM法による伝搬時間超音波CTの研究

木材は、金属や石材などに比べ害虫や風雨による影響を受けやすい。そのため木造建造物は数世紀を経て相当の被害を受ける。このような損傷をいかにして建造当時の姿に保ちながら修復するかが、文化財を保存する上で最大の問題の一つであり、文化財を傷つけることなく調査するための探査技術が大変重要である。木造文化財の修復では腐朽部分を切り出し、その部分に新しい木材を埋め込むという方法がよく用いられている。修復の際、その範囲を最小限にとどめるために腐食部分の推定が必要となってくる。そこで、正確に腐朽の程度や位置を把握し、定量的に腐朽部分の推定、表示できる非破壊検査の測定システムが求められている。

本論文の研究では木造建築物、文化遺産などの非破壊検査を可能とする超音波 CT システムの開発を行う。探査技術開発のため、我々は超音波 CT を使い画像化することで、木柱内部の損傷を探査することを検討してきた。超音波 CT では伝搬時間 TOF を測定し、その伝搬経路を直線とみなした上で、音速の逆数 (slowness) の分布を画像として再構成している。本研究では画像再生方法に着目して、ML-EM(Maximum Likelihood Expectation Maximization)法、最尤推定-期待値最大化画像再生方法を検討した。また、ML-EM 画像再生方法と従来のフィルタ逆投影法 (FBP: Filtered Back Projection) 方法を比較した。

本研究では、測定系で起こりうる物理現象を織り込んでおくことにより、様々な補正ができる像再生アルゴリズムの検討を行った。木材に特有の特性として、木材中の音響波の伝搬方向と年輪の方向の関係によって音速に違いが生じる音速異方性が挙げられる。その結果、超音波音速 CT では音速の空間的変動を画像化しているため、木材のような音速異方性をもつ対象では再構成された像にリング状のアーチファクトが現れてしまう。この問題を解決するため、音速異方性をシステムに考慮に入れて、TOF データ補正して音速分布画像化する。補正した TOF 値を変換することでアーチファクトを除去することを検討した。この方法では、音響波の伝搬速度が木中の中心を通るパスでは速く、縁では遅くなることに注目して、リング状のアーチファクトを除去するための非線形処理を像再生プログラムに導入し、問題となっているアーチファクトの除去に成功した。

ML-EM 法では像再生を良好に行うためには、十分な測定パス数が必要である。しかしながら、測定時間などを考慮すると、現時点のシステムにおける測定点数 306 が実測の場合の限界と考えられる。ML-EM 法で像を再構成システム中で、TOF データを増えるため TOF データ角度補間を行った。実測では 300 程度の伝搬パスの測定しか行うことが出来ない。そこで、足

りないデータを角度補間によって補い、ダイナミックレンジの高い再生像を得るように改良した。また、リング状のアーチファクトを取り除くための非線形処理をMLEM法にも導入し、アーチファクトを取り除くことに成功した。補間処理を用いた画像は精細化され、線状のアーチファクトも除去され、欠陥部がはっきりと表れている。この結果、木中の波長とほぼ同程度の大きさの人工的な空洞を発見できるようになった。補間間隔を変えて検討した結果、ML-EM法を適用するには、5度間隔程度の細かいデータが必要なことが分かった。

また、音速平均値方法と補間の両者を同時に組み込んだ結果は、単一の方法を使った補正の結果より、画質が向上した画像を得られた。音速異方性と補間の効果を確認することができた。

これまでの手法では、音線の伝搬経路が直線であると仮定して像再生していた。実際には、超音波は波動性を持っているため、木柱中の伝搬音線が直線ではなく曲線となる。この伝搬経路の曲がりやが画像に影響を与えると考えられる。これまで、再構成画像中の欠陥部が正しい位置より外にずれることが分かっている。そこで、超音波の波動性を考慮にいた、再構成画像への波動性の影響減少方法を検討した。検討した方法ではHankinsonの式に基づいて、直線の伝搬経路の位置を移動することで伝搬経路の曲がりを補正する。このような簡便な手法により、画像中の欠陥位置のずれが補正されることが確認できた。

以上のように、本論文で提案したシステムは、木柱を対象とした超音波CTにおける幾つかの問題を解決している。音速異方性への対応と、FBP法で問題となっていたアーチファクトの除去が、実用的な測定時間で可能になった。画質が向上し、超音波の波長と同程度の小さな欠陥を発見できるようになり、伝搬経路の曲がりによる欠陥位置のずれも補正される。以上の成果を活用することで、木造文化財の虫害や腐食の初期段階の検査に非常に有用なシステムが可能になると考えている。

# 論文内容要旨 (英文)

平成 20年度入学 博士後期課程

専攻名 システム情報工学

氏 名 範 洪輝



論 文 題 目 Time of Flight Ultrasonic CT Based on ML-EM for Wooden Pillars

Ultrasonic is widely used in detecting inner quality of various objects for non-destructive test. With ultrasonic CT, we can obtain velocity distribution of objects. In our research, we proposed an approach for wooden inspection by using ultrasonic CT based on ML-EM algorithm. In addition, ML-EM image reconstruction algorithm and the conventional FBP algorithm were compared.

The sound velocity in wood changes with the direction of the ultrasound propagation path. The sound velocities are different between the transmission path near the center and the transmission path near the edge of a wooden pillar. Since the spatial distribution of sound velocity was reconstructed by ultrasonic CT, some ring artifacts appeared in the image because of the anisotropic acoustic property of wood. To reduce the artifacts, anisotropic acoustic property is considered for the purpose of improving the image quality of the ultrasonic CT scans of a wooden pillar. We propose a velocity anisotropy correction method of TOF data for image reconstruction on the basis of the ML-EM method. The feasibility of velocity anisotropy correction and TOF data interpolation are examined in detail using wood phantoms.

In ML-EM method, in order to obtain high quality reconstruction images sufficient measurement paths are necessary. But, it takes about two hours to obtain 306 TOF values in actual measurement. So, the number of data that can be measured is thought that 306 were near the upper bound timely and spatially. However, the number of these measurement data is very few compared with the medical application. Therefore, many artifacts were observed in the reconstructed images. Then, we used interpolation in the ML-EM imaging process. The relation between artifact level and the number of interpolations was examined in detail by using numerical and wooden phantoms. We also examine the effect of the interpolation of the TOF data, since the density of the TOF data has a considerable effect on image quality in the ML-EM method.

The CT image was reconstructed based on the assumption that an ultrasonic wave was transferred along a straight propagation path. However, an ultrasonic propagation path was bent from a straight line due to the skewing effect. As the result of the path bending, the position of the defect on the CT images was shifted to the surface of the specimen. Hankinson's equation was used to adjust the distribution of TOF to solve the problem.

By using as above techniques proposed in the paper, the accuracy of defect detection in wood can be significantly improved.