

多重経路散乱場理論の基礎と応用

Fundamental and application of multi-static scattering field theory

木村建次郎^{1,3,4)}, 稲垣明里²⁾, 中島義晴³⁾, 弓井孝佳³⁾, 木村憲明^{3,4)}
 神戸大学 数理データサイエンスセンター¹⁾, 神戸大学大学院理学研究科²⁾
 (株) Integral Geometry Science³⁾, AMED 医工連携⁴⁾
 E-mail: kimura@gold.kobe-u.ac.jp

興味ある対象領域に、対象領域の淵から内部に向けて波動を照射し、対象領域内から跳ね返ってきた波動を淵で観測し、この観測結果から対象領域内の散乱体の構造を導く問題は、波動散乱の逆問題と呼ばれており、有効な解析法が見出されていない未解決問題とされてきた。近年、我々は、波動の照射行為と観測行為を、領域内部にまで概念的に拡張し、照射点、観測点、散乱点の座標変数によって波動の散乱現象を表現する散乱場関数に関して、基礎方程式とその解析解の導出に成功し、これら多次元空間における座標変数を対象領域の3次元空間の各点の座標に収束させることで、対象領域すべてを可視化する、多重経路散乱場理論を確立した^{[1][2]}。本理論では、以下の式(1)で示される偏微分方程式を、観測によって得られたデータを境界値として用いて解き、得られた解を以下の式(2)で示される極限操作によって映像化関数を導き出す。

$$\left[\frac{1}{4} \Delta_s^2 - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \partial_x^2 - (\partial_{y_1}^2 + \partial_{z_1}^2)(\partial_{y_2}^2 + \partial_{z_2}^2) \right] \bar{G} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{r}) = \lim_{t \rightarrow 0} [Tr [\bar{G}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t)]] = \bar{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, 0) \quad (2)$$

領域内部の可視化においては、従来の方法では、ビーム状に絞られた波動を対象物に照射し、その反射波の振幅と位相を、各点計測することで散乱体の形状を把握するが、散乱体の裏側にある別の散乱体や、原理的に検出できない反射方向をもつ散乱体が存在する。この重要な課題に対して、本研究で示す方法では、点光源から放射状に発した波動が散乱体に照射された際に、様々な方向に散らばる多重経路の波動の観測結果から、すべての散乱体の構造を決定することになるため、原理的に波動が届かない場合を除き、対象領域内のすべての点で数学的に焦点があうことになる。医療画像診断、自動運転、地質探査、顕微鏡分野等において重要な進展を期待することができる^[3]。これまで、本理論の社会実装として、老朽化が進むコンクリート構造物の非破壊検査技術^[4]、既存の乳癌画像診断のディファクトスタンダードであるX線マンモグラフィの課題「アジアの50歳未満の女性の8割を占める、高濃度乳房を持つ女性^[5]に適用することができない」を解決するマイクロ波マンモグラフィ^[6]、を開発した。講演では、詳細と共に様々な応用可能性について議論する。

参考文献

- 1) 木村建次郎, 木村憲明, “Multi-static Inverse Wave Scattering Theory and Microwave Mammography”, システム／制御／情報, 一般社団法人システム制御情報学会, 第64巻 第3号, 2020年.
- 2) 木村建次郎, 木村憲明, “Inverse Scattering field theory” 京都大学数理解析研究所講義録, No. 2186, pp.75~86, 2021年.
- 3) K. Kimura, “Discovering a theory to visualize the world”, Nature, Vol.588, pp.S124-S125, 2020.
- 4) 令和元年度 i-Construction 大賞, 国土交通省, 株式会社 Integral Geometry Science, “インフラ構造物の非破壊検査に向むけた世界最高性能-超広帯域レーダの実現”, 2020年1月14日.
- 5) J.A.Tice et al., “Using Clinical Factors and Mammographic Breast Density to Estimate Breast Cancer Risk: Development and Validation of a New Predictive Model”, Annals of Internal Medicine 148(5), 337-347, 2008.
- 6) 木村建次郎ら, 第一回日本医療研究開発大賞 日本医療研究開発機構理事長賞, 内閣官房健康・医療戦略室, “次世代乳癌スクリーニングのためのマイクロ波散乱場断層イメージングシステムの開発”, 2017年12月13日, 総理官邸.