

E 1 Bojarskiの恒等式を用いた伝導体のイメージング

竹中宏 山口芳雄 山田寛喜 阿達透

新潟大学工学部

1. はじめに

電波を使ったイメージングには色々な方法が提案されているが、再構成の定式化・散乱データの取得方法・再構成アルゴリズムの3項目を定義しなければならず^[1]、良好なイメージングを行うためには扱っている問題に適した方法を用いなければならない。本研究では、Bojarskiの恒等式・逆合成開口レーダ (ISAR) ・逆投影法、FFT法の場合を考え、良好なイメージング法を検討する上で、再構成アルゴリズムに注目し、アルゴリズムの違いによる比較を行い、どのアルゴリズムにおいて良好な結果が得られるのか検討を行った。

2. 再構成理論

2-1. 定式化

波動方程式にPO (physical optics) 近似を適用し、far field, monostatic, 物体として完全導体を仮定することにより、Bojarskiの恒等式^{[1][2]}を得ることができる。ここでは2次元問題を考え、測定法のISAR^[1] (図1) を適用することにより、Bojarskiの恒等式は、

$$\Gamma(k, \phi) = \int \int_V f(r, \theta) \exp[-j2kr \cos(\phi - \theta)] k dk d\phi \quad (1)$$

となり、物体内Vでの極座標表示の2次元フーリエ変換になる。ここで、物体関数 $f(r, \theta)$ は物体内を1、それ以外を0と仮定している。 $\Gamma(k, \phi)$ は、散乱波データを示す。また図1に示すように、 k は波数、 ϕ は回転角を示す。(1)式の逆変換を行うことにより、物体関数 f が得られるが、無限の周波数領域での散乱波が必要になる。そこで実際は、

$$f(r, \theta) = \int_0^{2\pi} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \Gamma(k, \phi) \exp[j2kr \cos(\phi - \theta)] k dk d\phi \quad (2)$$

として、近似の物体関数 f を得ることとする。

2-2. 再構成アルゴリズム

(2)式を実行すれば物体関数 f が得られるが、再構成に計算機を用いる場合、極座標のFFTはないため、1次の2つのアルゴリズムが考えられる。

2-2-1. 逆投影法^[1]

逆投影法は、(2)式の積分において、はじめに k に関する積分を行い、次に ϕ に関する積分を行う方法である。この方法は物理的意味を伴う。 k の積分は、任意の回転角 ϕ でのrange profileの推定(逆投影)を示しており、 ϕ の積分ですべての回転角のrange profileを重ねることを示す。

2-2-2. FFT法

FFT法は、(2)式の極座標表示を補間を用いた直角座標になおし、それから2次元逆FFTを施す方法である。ここでは3つの補間^[3]を考える。

最近傍補間は、最も近い格子点を選ぶものである。双一次補間は、隣接する4つの格子点を用いて、1次式により補間するものである。3次畳み込み補間は、隣接する周囲16個の格子点を用いて、3次式により補間するものである。

また、補間を行う前に(3)式を用いることで、周波数データ Γ の個数を 2^{β} 倍に増やし、 Γ のきめを細かくすることができる。

$$\text{FFT}\{\text{IFFT}[\Gamma] \text{ with zero-padding}\} \quad (3)$$

これにより、精度を上げられるとされている^[4]。

3. 実験

散乱波の測定は電波暗室内で、ネットワークアナライザ (HP8720C) を用いて行った。送受信にホーンアンテナを用い、アンテナ座標中心間を1.0mとした。この距離はfar field条件を満たすものである。掃引周波数を13~18GHz、周波数ポイント数を101点とし、物体は半径7cmの金属円柱を使用した。なお、座標中心と物体中心を一致させることにより対称性を利用して、データ取得は一方のみとした。

3-1. シミュレーション

上記で示した測定状況下でのシミュレーションを行った。FFT法の双一次補間 ($\beta=4$) の再構成像を図2、断面図を図3に示す。結果からわかるように、物体表面でピークを持つことがわかる。なお、他の方法でも同様な結果となった。以下、シミュレーション結果を理論値として比較を行う。

3-2. 実験結果の評価

再構成結果を定量的に評価する目安として、図2に示されている領域に対しての正規化絶対誤差と、推定した物体半径を考える。それぞれの結果を図4、表5に示す。この結果から、精度が良い方法として、FFT法の双一次補間・3次畳み込み補間 ($\beta \geq 2$) が挙げられる。再構成に要した計算コストを考えると、双一次補間が妥当と思われる。逆投影法は良好な結果は得られなかったが、物理的意味を伴うので有効と思われる。

4. まとめ

Bojarskiの恒等式を用いたISARによるイメージングには、FFT法の双一次補間が妥当と思われる結果を得た。

5. 参考文献

- [1] H. J. Li and G. T. Huang, "Microwave imaging understanding and its applications to various imaging schemes," *Int. J. Imaging Syst. Technol.*, pp. 231-224, April 1992
- [2] N. N. Bojarski, "A survey of physical optics inverse scattering identity," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, pp. 980-989, Sept. 1982
- [3] 高木幹夫, 他, 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 356-471, 1991
- [4] 仁木登, 水谷利雄, 高橋義造, 井上多門, "二次元フーリエ変換によるCTの高速画像再構成," 信学論(D), vol. J66-D, no. 6, pp. 707-714, 1983

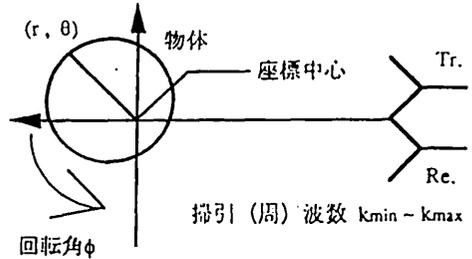


図1 ISARのモデル図

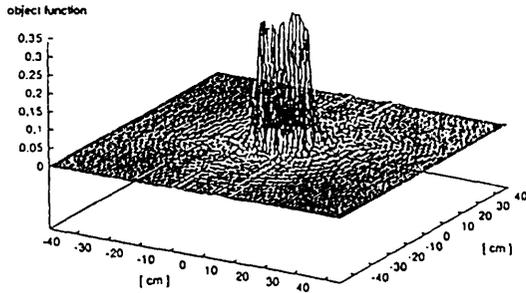


図2 再構成像

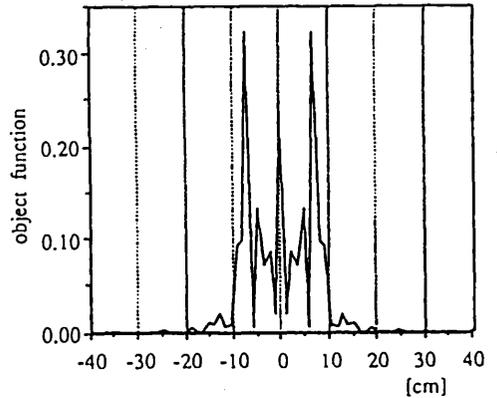


図3 断面図

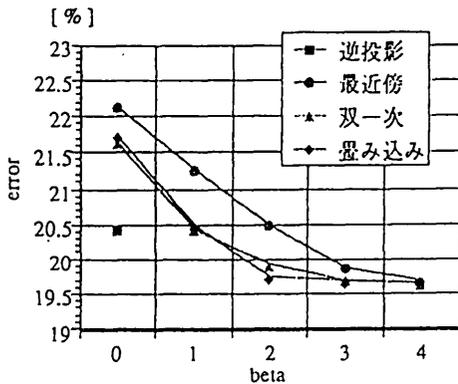


図4 正規化絶対誤差

| アルゴリズム | 物体半径 |
|--------|---------|
| 逆投影 | 7.34 cm |
| 最近傍 | 7.09 cm |
| 双一次 | 7.09 cm |
| 畳み込み | 7.09 cm |

表5 物体半径