

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500424

研究課題名(和文) マイクロ波CT用再構成アルゴリズムの高速化および精緻化に関する研究

研究課題名(英文) Researches on development of high-speed and high-resolutive reconstruction algorithm for microwave CT

研究代表者

工藤 孝人 (KUDOU TAKATO)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：60225159

研究成果の概要(和文)：CSI法と呼ばれる最適化法に基づく再構成アルゴリズムを複数の周波数の散乱データを用いる手法に改良するとともに、低周波の散乱データの重み付けを高くすることでアルゴリズムの収束が速くなることを示した。また、この手法にTV正則化法と呼ばれる手法を組み込み、アルゴリズムの安定化と再構成像の精緻化を図った。これらの他、モルタル製の2次元物体モデル(円柱)に対してマイクロ波照射実験を行い、散乱データの特徴を抽出した。更に、電磁シールドやノイズ軽減についても検討した。

研究成果の概要(英文)：We have improved a reconstruction algorithm based on CSI (Contrast Source Inversion) method to the one that using multifrequency scattering data, and shown that the convergence of algorithm becomes fast by weighting low-frequency scattering data. Also, we have intended to stabilize the algorithm and get high-resolutive reconstructed images by applying TV (Total Variation) regularization to the algorithm. In addition, we have gotten microwave scattering characteristics through experiments in which some circular cylinders made of mortar were radiated by some electromagnetic waves. We have also investigated about electromagnetic shielding and noise reduction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：電磁波工学

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：アルゴリズム、電磁波工学、逆散乱問題、再構成、画像診断

1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロ波CTと電磁波逆散乱問題

生体内部を無侵襲で可視化する装置にはX線CT(X線断層撮影)、MRI(核磁気共鳴イメージング)、PET(陽電子放出断層撮影)、超音波画像診断装置などがある。これらは医用診断に際して大いに有効であるが、X線CTでは放射線被曝、MRIやPETでは造影剤の注入

に伴う患者への身体的負担、超音波画像診断装置では解像度が低いなどの問題がある。また、超音波画像診断装置を除き、装置自体が大型かつ高価であり、メンテナンスにも高額の費用がかかる。

本研究課題の申請時において、マイクロ波CTはこれらの問題の多くを解決する次世代の無侵襲医用診断装置として注目され、その

技術開発が望まれていた。この状況は現在でも変わっていない。

マイクロ波 CT による生体内部の可視化は、電磁波逆散乱問題と呼ばれる分野に属する。この問題は、制御工学的な見方をすれば、既知の入力（入射波）と出力（散乱波）の情報を用いて伝達関数（生体内部の媒質定数分布）を求めることと等価である。電磁波逆散乱問題は通常、散乱波の測定値と推定値との残差ノルムで汎関数を定義することにより、汎関数が最小値をとる媒質定数分布を再構成（推定）する最適化問題に帰着する。

一般に媒質定数と散乱波の関係は非線形であり、また取得可能な情報量が限られるため、電磁波逆散乱問題は悪条件（ill-posed）の問題となることが知られている。

(2) 電磁波逆散乱問題に関する国内・国外の研究動向

電磁波逆散乱問題の解法に関する理論的研究は、計算機の発達に伴って 1970 年代から活発になり、①ボルン（Born）近似やリトフ（Rytov）近似を用いる手法（対象物体内部の媒質定数の不均質性が弱い場合のみ適用可能）の時代を経て、1990 年代以降、②非線形方程式を逐次線形化して反復的に最適解を求める手法（対象物体内部の媒質定数の不均質性がある程度強い場合にも適用可能）が主流になっている。

近年では上記②に加え、③問題の不適切性を軽減するための手法に関連した取り組みが盛んに行われている。不適切性を軽減する一般的な方法として広く知られているのは正則化である。電磁波逆散乱問題における正則化は基本的に再構成結果の平滑化を意味するため、過度の正則化は解像度の低下を招く。この点において特に有効性が示されているのがエッジ保存正則化法や TV（Total Variation）正則化法である。

これらの正則化法は再構成結果の選択的平滑化を行う手法であり、媒質定数が不連続に変化している部分を際立たせる効果を有する。しかし、実際問題としては測定装置の制約等により、取得可能な情報も限られる上にノイズの影響も無視できないため、精緻な再構成結果を得るのは容易ではない。よって、計算負荷が少なく（高速）、耐ノイズ性に優れた適用範囲の広い再構成アルゴリズムが必要とされていた。

(3) 本研究の位置づけ

上記 (2) の最後に述べた課題に対し、研究代表者は本研究課題を申請する以前に、

Barzilai-Borwein 最急降下法と呼ばれる反復法とエッジ保存正則化法を組み合わせた新しい再構成アルゴリズムを開発し、シミュレーションによりその有効性を示していた。このアルゴリズムで再構成できる最大の比誘電率は、5 程度であった。医用診断へ適用するには、再構成可能な比誘電率の最大値を 60~80 程度にまで引き上げる必要がある。このため研究代表者は、CSI（Contrast Source Inversion）法と呼ばれる降下法と正則化法を組み合わせた新たな再構成アルゴリズムを構築し、アルゴリズムの高速化、アルゴリズムの適用範囲の拡大、および再構成結果の高解像度化を図る計画を立てた。

2. 研究の目的

本研究課題の申請時における当初の研究目的は次の 2 点であった。

(1) マイクロ波 CT 用再構成アルゴリズムの適用範囲の拡大、および高速化を図る。具体的には、比誘電率が最高で 10~20 程度の物体の再構成を、パーソナルコンピュータレベルの計算機を用いて数分~十数分程度で可能にする。

(2) 腕や脚などの生体を模擬した物体モデルによるマイクロ波散乱データを実験により取得し、これを用いた再構成を行ってアルゴリズムの有効性と改善点を把握する。

3. 研究の方法

本研究課題の申請時における当初の研究方法は次のとおりであった。

(1) CSI法の改良による再構成アルゴリズムの高速化

電磁波逆散乱問題は、散乱波に関する汎関数が最小となる媒質定数分布を求める最適化問題に帰着する。媒質定数分布は通常、降下法と呼ばれる手法により反復的に更新されるが、多くの再構成アルゴリズムではその都度、対象物体内部の散乱波を計算し直さなければならない。これが計算量の増加につながり、再構成アルゴリズムの高速化を阻んできた。これに対しCSI法は、媒質定数分布を更新しても対象物体内部の散乱波を直接的に求める必要がないため、計算量を軽減できる。降下法に基づく電磁波逆散乱問題の解法においては一般に、離散化した媒質定数分布（ベクトル）に初期値を与え、これに修正量を次々に付加することによって反復的に媒質定数分布を更新していく。CSI法にはまだ

改良の余地が残されており、更なる高速化が期待できる。

(2) エッジ保存正則化の効率的適用による再構成結果の精緻化

電磁波逆散乱問題を汎関数の最小化問題に帰着させて解く場合、求める解が真値ではなく局所的な最小値に収束してしまうことがある。この現象は媒質定数の推定を行う際の情報量の不足や散乱データに含まれるノイズの影響など、電磁波逆散乱問題に特有の悪条件性に因るところが大きい。これを克服するため、多くの解法で正則化の手法が用いられている。正則化とは基本的に、散乱波に関する通常の残差ノルムと正則化項との和によって汎関数を定義し、それに降下法を適用して解の収束性を改善する手法である。

最も有名な正則化手法の1つにティホノフ (Tikhonov) の正則化がある。しかし、この手法には、媒質定数が階段状に変化している部分 (エッジ) が曖昧になり全体的にぼやけた推定結果しか得られないという、いわゆる過平滑化の問題がある。

本研究では画像処理の分野でよく用いられているエッジ保存正則化をCSI法に組み込む。エッジ保存正則化項に用いられる関数にはいくつかの種類があり、その効率的な適用方法は未だ明らかにされていない。この点を明らかにし、再構成結果の精緻化を図る。

(3) 多周波散乱データの利用による再構成アルゴリズムの適用範囲の拡大

上述した手法を多周波に拡張する。低周波 (波長が物体のサイズと同程度) から高周波 (波長が物体サイズの数分の1) にわたるいくつかの周波数の散乱データ (シミュレーションにより取得) を用い、媒質定数分布を再構成する。このとき、多周波散乱データの同時使用と逐次使用の両方について検討する。再構成結果を精査し、高コントラストな物体にも本アルゴリズムを適用可能にする。研究期間内の目標は、比誘電率の最大値が10~20程度の物体の再構成である。

(4) 生体を模擬した物体モデルによるマイクロ波散乱データの取得

腕や脚などの生体を模擬した物体モデルを作製し、これにマイクロ波を照射したときの散乱データを実験により取得する。この実験は、低周波から高周波にわたるいくつかの周波数について行う。物体モデルの作製と散乱データの取得は専門の業者に依頼する。また、実験に必要な測定機器および電波暗室は

借用する。

(5) 再構成アルゴリズムの改善点の把握と改良

実験により取得した散乱データを用いて再構成を行い、アルゴリズムの有効性を検証するとともに、改善すべき点を把握する。また、散乱データに意図的にノイズを付加してノイズが媒質定数分布の再構成に与える影響について定性的・定量的に考察し、アルゴリズムのロバスト性を高める。

(6) マイクロ波CTの試作機作製に向けた協体制の構築

研究期間内に得られた成果を総括し、マイクロ波CTの試作機作製に向けた検討を開始する。大分大学地域共同研究センターや島根大学産学連携センターの産学コーディネーターらと連携して、民間業者との共同研究開発も視野に入れた協体制の構築を図る。

4. 研究成果

(1) CSI法の改良による再構成アルゴリズムの高速化、適用範囲の拡大、およびノイズの影響に関する考察

①CSI法に基づく再構成アルゴリズムに対し、均質誘電体円柱の再構成を例に、複数の周波数の散乱データに重み付けをして同時使用した場合の効果について数値的に解析した。その結果、散乱電界に関する誤差ノルムの低周波成分のウェイトを高くすることで、誤差汎関数の収束が全体的に速くなることを示した。この成果は電気関係学会九州支部連合大会 (2008年9月) において発表した。

②CSI法に基づく均質誘電体円柱の再構成問題に対し、多周波散乱データの組み合わせの効果について数値的に解析した。その結果、低周波の散乱データが再構成アルゴリズムの適用範囲の拡大に重要であることを示した。この成果は電子情報通信学会総合大会 (2009年3月) において発表した。

③多周波散乱データの重み付けについて重点的に検討し、比誘電率が7程度までの物体であれば、安定的に再構成可能であることを確認した。しかし、目標としていた比誘電率の最大値が10~20程度の物体の再構成については、残念ながら達成できなかった。今後も鋭意改良を続ける所存であるが、それと並行して、コンクリート建造物の非破壊検査などへの応用も検討していく予定である。マイクロ

波帯におけるコンクリートの比誘電率は7～9程度であり、本研究で開発したアルゴリズムが適用可能な範囲であると考えている。

④多周波散乱データを用いるCSI法に基づく再構成アルゴリズムに対し、均質誘電体円柱の再構成を例に、ノイズの影響について数値的に解析した。その結果、本アルゴリズムはノイズに対する耐性が比較的高い手法であることを示した。ノイズの影響については今後更に調査を重ね、成果がまとまり次第、学会などにおいて発表する予定である。

(2) 正則化法の適用による再構成結果の精緻化

多周波化したCSI法に基づく再構成アルゴリズムに対し、TV正則化法を組み込むこと(定式化)に成功した。ただし、正則化項の関数設定等、効果的な適用方法については未解明の部分が多い。この点については今後更に解析を重ね、成果がまとまり次第、学会などにおいて発表する予定である。

(3) 物体モデルによるマイクロ波散乱データの取得

モルタル製の2次元物体モデル(円柱)を3種類(均質、金属芯、空洞芯)作製し、低周波(波長が物体モデルの直径の数倍)から高周波(波長が物体モデルの直径と同程度)にわたる複数の周波数のマイクロ波をこれら物体モデルに照射した際の散乱データを実験により取得した。その結果、実験に使用したすべての周波数において、内部構造の違いが散乱波の振幅および位相の違いとして、特定の角度方向に強く抽出されることを明らかにした。この実験結果については今後更に分析を進め、再構成アルゴリズムへの効果的な利用法を検討する。また、成果がまとまり次第、学会などにおいて発表する予定である。

(4) 電磁シールドおよびノイズ軽減に関する検討

再構成結果の精緻化には散乱データ取得時のノイズ軽減が不可欠であることから、電磁シールドに関する数値解析を行うとともに、医療機器の不良接地が引き起こす様々な問題について調査した。これらの成果については、電子情報通信学会(2009年9月)、医療情報学連合大会(2009年11月)、日本生体医工学会(2010年6月、2010年12月)において発表した。また、2011年5月にも韓国で開催される国際会議において成果を発表する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計7件)

- ① Takato Kudou and Eisuke Hanada, FDTD simulations for constructing appropriate medical/healthcare electromagnetic environment, 2011 Asia-Pacific EMC Symposium (APEMC2011), 2011年5月18日(採択済), 韓国・済州市
- ② 工藤孝人、花田英輔, MRI用シールドサッシに関する電磁環境シミュレーション、日本生体医工学会 医療・福祉における電磁環境研究会、2010年12月4日、東京都
- ③ Keisuke Kitani, Takato Kudou, Eisuke Hanada, and Shigetaka Hirotsato, FDTD analysis of a waveguide antenna used in a RFID sensing system, 第49回日本生体医工学会大会、2010年6月26日、大阪市
- ④ 花田英輔、加納 隆、工藤孝人、不良接地により医療機器とブラウン管テレビ受像機が生じる電磁界と対地起電力、第29回医療情報学連合大会、2009年11月24日、広島市
- ⑤ 工藤孝人、花田英輔、広里成隆、MRI室用電磁シールドサッシのFDTD解析、2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2009年9月18日、新潟市
- ⑥ 山下直人、財津陽丞、工藤孝人、花田英輔、CSI法による誘電体柱の再構成における多周波散乱データの組合せに関する一考察、2009年電子情報通信学会総合大会、査読無、2009年3月20日、松山市
- ⑦ 財津陽丞、山下直人、工藤孝人、重み付けした多周波散乱データを用いたCSI法に基づく誘電体柱の再構成、平成20年度電気関係学会九州支部連合大会、2008年9月24日、大分市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 孝人 (KUDOU TAKATO)
大分大学・工学部・准教授
研究者番号：60225159

(2) 研究分担者

花田 英輔 (HANADA EISUKE)
島根大学・医学部・准教授
研究者番号：90244095

(3) 連携研究者

なし