

# 論文審査の結果の要旨

氏名 寺園 泰

本論文は、7章から構成される。

第1章は序論として、本論文の背景と目的を説明している。まず、生体の計測法として、無侵襲に電位や磁場を計測する脳磁場計測等の例を挙げ、次に、計測値からの生体内電流密度分布の推定が劣決定逆問題となることを確認している。そして、この問題に対し、提案手法が、忠実性・線形性という2つの性質に着目し、これらの同時最適化を行うものであることを述べている。

第2章では、生体磁場逆問題の問題設定を行っている。信号源である電流密度分布から計測値への線形な伝達関係についてモデル化することで、伝達方程式を立て、問題を劣決定線形逆問題として定式化している。ここでは、未知量である電流密度分布に対し、センサによる計測値はその一部の情報しか伝えず、推定が困難になっている状況が明確化される。また、続く第3章では、既存の解法について簡潔に概観している。

第4章では、提案手法の基盤となる、忠実性・線形性の同時最適化の枠組みを議論している。まず、計測・推定のプロセスが全体として考察される。これら2つのプロセス全体を、真値に対して推定値を与える写像として位置づけ、その持つべき理想的な性質が恒等性であることを述べている。次に、恒等性は以下の2条件と必要十分条件となることを指摘している。第1に基底忠実性、すなわち写像に不動な基底の存在。第2に線形性、すなわち重ねあわせの保存である。さらに、これらの条件が、実用面からも重要であると指摘している。例えば脳磁場逆問題では、電流密度分布がごく少数の電流双極子からなるという仮定がしばしばおかれ、この場合に基底忠実性が有効に働き、また、他のさまざまな様態の分布への対応能力が、線形性によって得られることを指摘している。ところが、劣決定性のために、基底忠実性と線形性は同時に成立させることはできない。そこで、有効な逆問題解法を得るために、両性質を最大限近似的に両立させることを解法の枠組みとしている。

第5章では、提案手法の詳細について述べている。まず、忠実性に関して、基底忠実性と重みつきL1-ノルムの関係を明らかにしている。重みつきL1-ノルムの最小化が標準基底について基底忠実性を達成することを、伝達行列の任意の2つの列ベクトルが一次独立という条件で証明している。従来、伝達行列の非退化性という条件に比べ、より弱い、すなわち計測系にとってより容易な条件となっている。さらに、信号源がベクトル場するとき、

空間中の 1 点で非零になる信号源を写像が保存することを拡張基底忠実性と名づけて明確に定義し、その達成のために評価関数の拡張している。また、任意の 2 つの格子点に対応する伝達部分行列の一次独立性のもとで、この忠実性を証明している。次に、線形性と 2 次形式の最小化について検討を行い、2 次形式の重み行列の設定法を提案している。線形写像は、線形制約条件の下での 2 次形式最小化により得られるが、重み一様における推定値は一般に片寄りを持つ。2 次統計量に注目すると、信号源の共分散行列を単位行列と仮定したとき、推定値の共分散行列の対角成分は一様となるのが理想である。これを達成する重み行列の反復的設定法を提案している。また、信号源がベクトル場である場合にはブロック対角成分が問題になると指摘し、ブロック対角のレベルで一様性を達成するように拡張している。この手法による推定密度分布のピーク位置や滑らかさの向上を確認するとともに、これらの一様化が共分散行列の非対角成分に悪影響を与えるというトレードオフを定量的に示している。さらに、忠実性と線形性の両性質を同時最適化する方法を 2 つ提示している。1 つ目は、各々に対応する評価関数を内分して新たな評価関数として用いる方法。2 つ目は、各々の最適化問題の最適性条件に着目し、その条件を反映する重み行列の内分により最適解の条件を定める方法である。両者とも凸関数の最小化問題となり、大域的最適解が求まる。これら 2 つの方法を計算例で検討し、従来手法にない推定性能を確認している。

第 6 章では、疎な解について議論を行っている。対数関数を利用した評価関数は疎な推定を与える。これを忠実性を担う新たな評価関数となる可能性を持つものとして位置づけると同時に、近似的に疎な解も有効に推定する性質の証明を行っている。

最後に、第 7 章では、以上の議論および成果を総括し、他の線形逆問題への適用についても展望している。

以上のように、本論文は、順問題伝達方程式が線形となる劣決定逆問題を一般化し、応用例として生体磁気逆問題を取り挙げ、解が望ましい性質を有するような非線形推定法を開発しており複雑理工学上貢献するところが大きい。なお、本論文の第 5, 6 章は、眞溪歩との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析及び検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。