



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A Study on the Design Optimization of the Bipolar Permanent Magnet Type Low-field MRI Device [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	孔, 晓涵
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15695号
Issue Date	2023-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91230
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Xiaohan_Kong_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学)

氏名 孔 曉涵

審査担当者 主 査 教 授 五十嵐 一

副 査 教 授 野口 聡

副 査 教 授 北 裕 幸

副 査 教 授 近 野 敦

学位論文題名

A Study on the Design Optimization of the Bipolar Permanent Magnet Type Low-field MRI Device (バイポーラ永久磁石型低磁場 MRI 装置の設計最適化に関する研究)

本学位論文では、バイポーラ永久磁石型低磁場核磁気共鳴イメージング (MRI: Magnetic Resonance Imaging) の新しい最適設計法を提案している。低磁場 MRI は現在病院で広く用いられている MRI とは異なり、永久磁石で発生した数 10 ミリテスラ程度の弱磁場を用いるものである。低磁場 MRI 装置は軽量で比較的安価であるため、災害現場や救急車、開発途上国等での活用が期待されている。本論文では、バイポーラ永久磁石型の低磁場 MRI に焦点を当て、磁気シールド用積層鋼板による磁気歪および渦電流の影響を考慮した傾斜磁場コイルの最適設計法、磁場の一様性を高めるためのヨークおよび永久磁石の最適設計法、および磁場の一様性をさらに高めるための高速な調整法 (シミング法) を提案し、その有効性を実証している。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、磁気歪を低減するための傾斜磁場コイルの最適設計法について述べている。MRI では直線的に変化する 3 方向の磁場を傾斜磁場コイルで発生させる必要がある。傾斜磁場コイルが発生する変動磁場はヨーク等に渦電流を発生するため、この渦電流を抑制するために積層鋼板から成る磁気シールドを傾斜磁場コイル近傍に設置する。従来の傾斜磁場コイルの設計では、この磁気シールドの磁化が傾斜磁場に与える影響を無視していたため、MRI 画像が歪む問題があった。そこで著者は傾斜磁場コイル電流により磁気シールド中に発生する磁界を鏡像電流でモデル化し、傾斜磁場コイル電流と鏡像電流の和が所望の傾斜磁場となるように、傾斜磁場コイルの形状を最適設計した。さらに著者はこの最適設計法により得た傾斜磁場コイルを製作し、MRI 画像の実測を行った。この結果、従来法により設計された傾斜磁場コイルによる MRI 画像に比べて、歪が少ない画像が得られることを実験的に示した。

第 3 章では、Z 方向 (鉛直方向) の傾斜磁場コイルの最適設計法を提案している。Z 方向傾斜磁場コイルの設計においては、発生する磁場が一様で、Z 方向への変化率が大きいこと (傾斜効率) と、高速な動作を実現するために時定数が小さいこと、すなわちインダクタンスが小さいことが求められる。本研究では一様性 (線形性)、傾斜効率、インダクタンスに対する要求を同時に満足するような傾斜磁場コイルの最適設計法を開発した。この方法ではまずコイルの直径、巻き数、コイル設計のための正規化係数を設計変数に選び、3 次元の設計空間中の格子点で、線形性、傾斜効率、インダクタンスを独立な目的関数として評価し、対応する 3 次元の目的関数空間の点を生成する。つぎにこれらの点から 3 つの目的関数に関するパレート解を選択し、さらにパレート解から最適解候補を選ぶ。最後に

最適候補に対して渦電流損失の過渡解析を行い、最も損失が低い傾斜磁場コイルを最適解として選択する。このように設計された傾斜磁場コイルを作成し、従来法で設計したコイルの MRI 画像と比較した。この結果、提案の最適設計法により画像歪を低減できることを実験的に示した。

第 4 章では、磁場の一様性を高めるためのヨーク (鉄心) および永久磁石形状の最適設計法を提案している。従来の設計法では、これらの形状を幾何パラメータで表し、生成される磁場の一様性が高くなるように幾何パラメータを決めていた。しかしこの方法では最適化結果が幾何パラメータの選択に強く依存し、また新規形状を得ることが難しかった。そこで著者は幾何パラメータを導入せず、自由に形状を変形して最適構造を決めるトポロジー最適化をヨークと永久磁石の設計に適用した。このとき、要求される磁場の一様性が極めて高いため、一度の最適化では要求を満足させることが難しい。そこで、著者は最適設計を 2 段階に分け、第一段階ではヨークの大規模構造を決定し、第二段階では第一段階で得られたヨークを固定して永久磁石の細かな構造を決定した。この多重忠実度 (multi-fidelity) トポロジー最適化により、ヨークおよび永久磁石の 3 次元最適構造を決定し、これにより所望の一様性を持つ磁場が実現できることを示した。

第 5 章では、磁場の一様性をさらに改善するための、受動シミング設計法を提案している。従来の受動シミングでは、永久磁石の設置と磁場計測を繰り返すため、シミング作業に長い時間が必要であった。本手法では、永久磁石近傍に設置する小さな永久磁石ブロックの配置を最適化するため、まず永久磁石が発生する磁場を近似的な解析解で表現し、永久磁石ブロックの配置を最適化する。つぎに得られた永久磁石がつくる磁場を有限要素で精密に評価し、追加する永久磁石ブロックの位置を最適化する。この段階的な最適化を繰り返すことで、受動シミングを高速に実現できることを示した。

これを要するに著者は、低磁場 MRI の画像を改善するため、傾斜磁場コイル、ヨーク・永久磁石および永久磁石ブロックの新しい最適設計法を提案し、それらの効果を実証している。著者による本研究は、生体計測工学、電気電子工学、情報科学に寄与するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格ある者と認める。