

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：26402  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18K04166  
研究課題名(和文) 光学投影による磁界の三次元分布情報の取得と磁気微粒子の高精度位置検出への応用  
  
研究課題名(英文) Optical measurement of magnetic field distributions for position estimation of magnetic particles  
  
研究代表者  
田上 周路 (Taue, Shuji)  
  
高知工科大学・システム工学群・准教授  
  
研究者番号：80420503  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：開発したシステムによる信号検出と位置推定を検証するため、直径0.5 mmの金属線に20 mA、70 kHzの交流電流を印加し、金属線から発生する磁界分布をサブmmの空間分解能で測定できた。取得した磁界分布画像から、金属線の位置推定を逆問題解法を用いて実施した結果、深さ方向の推定位置が実際の1.25 mmに対して1.41mmとなり、推定位置は用いた金属線内部となった。さらに、測定に用いるロックインアンプからの位相出力を解析することで、測定感度を有する2方向を分離して検出することを検討した。磁界の強度と方向の分布を取得し画像化することで、金属線を取り囲む磁界のベクトル表示を実証できた。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

「磁界の可視化」は、機器から発生する電磁波の空間的評価や、生体内に存在する信号源の位置検出といった産業・医療分野に利用される。しかし、磁界センサの多くはセンサ部分に金属配線を使用するため、測定対象磁界の歪みや減衰が生じてしまう。本研究では、交流磁界の空間分布を、光学式磁界センサによって非侵襲に高分解能で取得する実証実験を行った。磁界分布を得る新規手法として、測定空間の磁界分布をミラーアレイデバイスを用い、ミラーの走査によって高精細な画像化を実現できた。得られた情報から逆問題を解くことで信号源の位置推定を高精度に実証できた。本手法は簡便な画像診断装置への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：To verify signal detection and position estimation by developed system, a weak magnetic field with 70 kHz from a fine metal wire was measured with a sub-mm spatial resolution. As a result of position estimation from the obtained field distribution, the position in the depth direction is 1.41 mm compared to the actual 1.25 mm, and the estimated position is the inside of the used metal wire. Furthermore, by analyzing the phase output from the lock-in amplifier, we demonstrated the detection of vector images of the magnetic field surrounding the metal wire.

研究分野：光計測

キーワード：交流磁界分布 光学式磁界センサ ミラーアレイデバイス 位相検波 ベクトル分布画像

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

磁界分布を画像化することは、電磁波をはじめとする交流磁界の信号やノイズ成分を、パターン認識的に空間評価することが可能となるため、産業分野において大きな意義を有する。さらに、物質内部の見えない位置に存在する発生源の位置特定も、漏出した磁界分布から可能となる。例えば、本研究で実施する磁気微粒子からの非線形磁化特性を利用した位置検出は、CTやMRIに匹敵する高精度な画像診断装置として注目されている。検出する微粒子はMRIの造影剤として使用される酸化鉄のナノ粒子であり、検出対象組織に特異吸着する抗体を修飾することで患部マーカーとして用いられている。検出対象が測定表面から深さ数 cm にある直径数 mm の乳癌組織と仮定すると、微粒子は癌組織全体に凝集体として存在しており、測定対象へ数 kHz の交流磁界を励起磁界として印加することで、微粒子集合体の非線形な磁化特性に起因する 3 倍の高調波が信号磁界として発生する。この信号磁界の分布情報を外部のセンサの走査もしくはセンサの複数個配置によって取得し、得られた分布情報から逆問題を解くことで、生体内部に存在する微粒子の位置を検出できる。

磁界センサには実用化されているものだけでも、誘導起電力を利用したコイルや、半導体の特性を利用した電子素子といった多くの種類が存在する。これらのセンサで磁界を測定する場合、センサ部の金属配線によって測定対象となる磁界に空間的な歪みや強度減衰が生じる。このため、センサを密に配置して多点を同時に測定することは精度の低下を招いてしまう。そこで、前述の磁気微粒子の三次元位置推定に必須となる磁界分布の三次元情報の取得には、測定対象もしくはセンサを機械的に走査することで磁界分布の取得を試みる研究が行われている。

一方、光学式磁界センサは 1970 年代から研究されており、ガラスセル内に封入した極微量のアルカリ金属蒸気に光を通してスピン偏極を行うことで、その透過光の強度や偏光状態から、ガラスセル内部に印加される磁界が光学的に測定できる。このため、従来センサで問題となっていたセンサ内金属による磁界への影響を極限まで減らすことができる。また、アルカリ金属の電子スピン偏極の大きさが検出レーザーの分極の回転に反映されることにより、レーザーの偏極方向の回転は極めて高精度での測定が可能であることから、冷媒を用いずに SQUID を超える高い感度が示されている (I. K. Kominis et al., Nature, 422, 2003)。本センサを用いた磁界分布の画像化に関しても、複数のセンサの配置 (G. Bison et al., APL, 95, 2009) や、測定対象の機械的走査 (業績 22, 26) による二次元画像化が実施されている。近年では撮像素子を用いて 1 つのガラスセル内の磁界の二次元分布を取得した報告はあるが (C. Deans et al., APL, 108, 2016)、三次元分布情報を取得し、信号源の位置推定までを行った報告は無い。

### 2. 研究の目的

磁気微粒子から発生する微弱な磁界信号の検出および空間分布の取得を目指し、アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる非侵襲で高精細な二次元磁界分布の光学投影を実施し、その上でサブミリメートルの空間分解能を持つ三次元磁界分布情報の取得を目的とする。信号の空間分解には、画素構造を有するミラーアレイデバイス (DMD: Digital Mirror Device) を新たに適用し、機械的走査なく分布情報の取得にむけた実験系の構築を行う。得られた磁界分布画像を用いて信号源の位置推定を実施し、高精度化へ向けた検討を実証する。

### 3. 研究の方法

測定に用いるセンサヘッドには分光測定用の立方体ガラスセルを用い、アルカリ金属としてセシウムを封入する。同時に封入する窒素やヘリウムといったバッファガスの量をコントロールすることで検出感度や感度帯域幅が変化する。これまで報告されている封入量を参考にしてセンサヘッドの作製を行う。

磁界信号を発生する磁気微粒子凝集体を想定し、直径 0.5 mm の極細金属線に微弱交流電流を印加することで微小信号源からの磁界を測定対象とする。また、直径 10 mm の微小コイルを用いて局所的な磁界強度分布を作り出し、空間的な分布評価に用いる。

測定に用いる実験光学系を新たに構築する。光源には 50 mW の出力が得られる分布帰還型 (DFB) レーザを用いて出力波長をセシウムの共鳴波長に調整する。DFB レーザからの光は偏光ビームスプリッタ (PBS) によって強度調整と直線変更となり、その後 1/4 波長板 (QWP) によって円偏光となる。金属線や微小コイルから発生した磁界を投影するため、測定領域となるガラスセルを配置し、セル内部へレーザー光を平行光にして照射する。ガラスセル内の磁界強度情報を投影した透過光を、DMD のミラーアレイ面へ照射する。照射した光のうち、画像要素領域のミラーによって反射したものを、1 つのフォトディテクタ (PD) を用いて受光し、得られた光信号はロックインアンプ (LIA) によって位相検波することで特定周波数の信号強度成分を要素領域の信号として取得する。画像要素となるミラーをラスタースキャンすることで各領域の信号を取得し、ガラスセル内の磁界分布として画像化する。

磁界分布画像の分解能は画像要素領域の高精細化によってサブミリメートルの分解能を有する磁界分布情報が取得できる。DMD の画素数から従来以上の分解能が期待できるが、高分解能化

にともない検出光強度の低下が懸念される。一方で、光強度を増大させることで検出光強度の向上が見込まれるが、光学式磁界センサの特性上、光強度の増加による磁界感度の低下が懸念される。このため、用いる光源の光強度によって取得できる最高分解能での分布画像を取得する。さらに、位相検波による測定磁界の2方向成分の分離を実施し、取得磁界分布のベクトル表示に關しても実証する。

得られた磁界分布画像を用いて逆問題を解き、信号源の位置検出を行う。計算によって得られた位置と実際の信号源位置を比較し、位置検出の精度を評価する。

#### 4. 研究成果

直径0.5 mmの金属線に20 mA, 70 kHzの交流電流を印加し、金属線から発生する磁界分布をサブmmの空間分解能で測定できた。取得した磁界分布画像から、金属線の位置推定を逆問題解法を用いて実施した結果、深さ方向の推定位置が実際の1.25 mmに対して1.41 mmとなり、推定位置は用いた金属線内部となった。さらに、測定に用いるロックインアンプからの位相出力を解析することで、測定感度を有する2方向を分離して検出することを検討した。感度を有する2方向に信号磁界発生用のヘルムホルツコイルを新たに作製し、それぞれの方向からの磁界を分離して検出できるかの実証実験を行った。2方向の磁界に対して位相検波を行うことで、アンプの出力である振幅と位相から2方向を分離できることを確認した。2方向磁界成分の分離の応用例として、先述の金属線から出力された磁界のベクトル分布画像を取得し、図1に示すように金属線を取り囲む磁界のベクトル表示を実証できた。

一方で、これまで画像化に用いてきたミラーアレイデバイスの画像要素領域を走査する方法では、解像度が高くなるにつれて取得できる信号光強度が低下する問題が生じた。さらに、解像度に比例して測定時間も増大するため、極低周波の環境磁場ノイズによる取得画像への影響も確認できた。そこで、まず高解像度化による信号光強度の減少に対応するため、シングルピクセルイメージングの手法を導入した。数値計算と実験による結果より、走査では測定できない空間分解能においても信号光強度は十分に取得できることが確認でき、これまで走査によって実証してきた磁界の強度およびベクトル画像に關しても同様に取得できることを確認した。

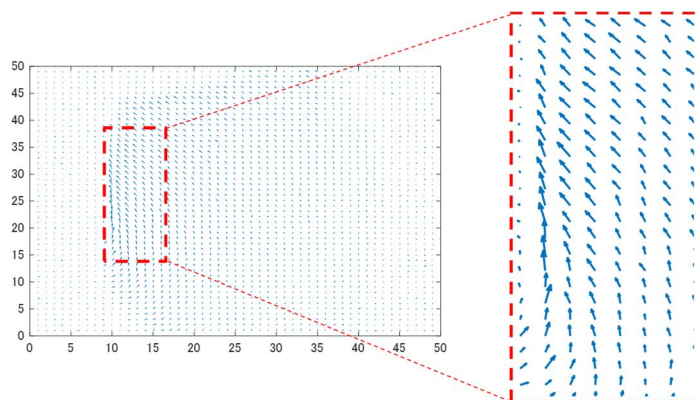


図1 取得した磁界分布のベクトル画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田中拓充, 田上周路, 豊田啓孝	4. 巻 5
2. 論文標題 アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布の投影 - 信号源位置推定に向けた検討 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報 IEICE Technical Report PEM2020-05	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shuji Taue and Yoshitaka Toyota	4. 巻 27
2. 論文標題 Signal-source estimation from magnetic field image obtained using atomic magnetometer and digital micro-mirror device.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 258-263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-020-00591-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田上周路、豊田啓孝	4. 巻 PEM2018-5
2. 論文標題 アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布の投影 - 信号源位置推定に向けた検討 -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 信学技報 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 4件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 田上 周路, 田中 拓充, 豊田 啓孝
2. 発表標題 ゴーストイメージングを用いた磁界分布の画像化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田上 周路, 田中 拓充, 豊田 啓孝
2. 発表標題 光学式磁界センサを用いた交流磁界分布計測へのゴーストイメージングの適用
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 202 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中拓充, 田上周路, 豊田啓孝
2. 発表標題 アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布測定 ~ ミラーアレイデバイスへのランダムパターン適用によるノイズフロアの低減 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員会 第2回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takumi Tanaka and Shuji Taue
2. 発表標題 Optical Detection and Ghost Imaging of AC Magnetic Field Generated from Coil
3. 学会等名 Information Photonics 2020 (IP'20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中拓充、田上周路
2. 発表標題 ゴーストイメージングを用いた磁界分布の画像化
3. 学会等名 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第18回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中拓充, 田上周路
2. 発表標題 光学式磁界センサを用いた磁界強度分布の単一画素計測
3. 学会等名 2019年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 交流磁界分布の光計測
3. 学会等名 光科学の最新トレンド 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuji Taue
2. 発表標題 Visualizing AC magnetic fields by using atomic magnetometer and micro-mirror device
3. 学会等名 The 13th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuji Taue, Nao Arita, and Yoshitaka Toyota
2. 発表標題 AC magnetic field imaging by using atomic magnetometer and micro-mirror device
3. 学会等名 EMC Europe2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中拓充、田上周路
2. 発表標題 光学式磁界センサを用いた交流磁界強度分布測定
3. 学会等名 情報フォトンクス研究グループ研究会（秋合宿）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中拓充、田上周路
2. 発表標題 光学式磁界センサを用いた単一画素計測による交流磁界強度の画像化
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中拓充、田上周路
2. 発表標題 ゴーストイメージングを用いた磁界分布の画像化
3. 学会等名 第18回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田上周路，豊田啓孝
2. 発表標題 アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布の投影 ～ 信号源位置推定に向けた検討 ～
3. 学会等名 第二回光応用電磁界計測研究会（PEM研究会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Taue and Yoshitaka Toyota
2. 発表標題 AC Magnetic Field Projection with Atomic Magnetometer
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 光を用いた磁界分布測定
3. 学会等名 四国オープンイノベーションワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Taue
2. 発表標題 Magnetic field imaging with micro mirror array
3. 学会等名 The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>光計測工学研究室  <a href="http://www.ele.kochi-tech.ac.jp/e1elabo/taue/index.html">http://www.ele.kochi-tech.ac.jp/e1elabo/taue/index.html</a>          Optical Measurement and Engineering Lab.  <a href="http://www.sceng.kochi-tech.ac.jp/taue/">http://www.sceng.kochi-tech.ac.jp/taue/</a></p>
---



6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------