

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04082

研究課題名(和文) 光学式磁界センサとゴーストイメージングを用いた三次元磁界分布情報の取得

研究課題名(英文) Acquisition of three-dimensional magnetic field distributions using an optical magnetometer and ghost imaging technique

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、信号源として生体内部の腫瘍に集積した磁気微粒子を想定し、その微粒子位置の推定に取り組んだ。生体内の微粒子位置推定について、生体面方向の位置推定は比較的容易に実現できるが、深さ方向の推定には微粒子から生じる磁界分布から推定する必要がある。磁界分布の測定には光学式磁界センサを用い、センサを微粒子付近に設置することでその位置の推定を磁界分布画像を用いて行った。ゴーストイメージングを取り入れることでロバスト性や高空間分解能化を実現し、さらに圧縮センシングを取り入れることで測定時間の短縮を実証した。得られた磁界分布画像から位置推定を行い、推定深さが一意に得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医学診断への応用のみならず、本研究において検討を行った圧縮センシングの手法は、従来のノイズ除去やコンストラクトの向上だけでなく、グラデーション情報の保持を目的としている。この試みは画像圧縮の分野における学術的意義を有しており、それによって得られるグラデーション画像の高速取得による応用の広がりや社会的意義を十分に有している。

研究成果の概要(英文)：The position estimation of magnetic particles gathering inside a human body is expected to be a strong tool for minimal invasive diagnosis.

The estimation of the position of particles can be achieved relatively easily in the direction of the body surface, but the estimation of the depth direction requires estimation from the magnetic field distribution outside of the body. We used an optical magnetometer to measure the magnetic field distribution, and placed the sensor near the particles to estimate positions using magnetic field distribution images. Robustness and high spatial resolution were achieved by incorporating ghost imaging technique, and measurement time reduction was demonstrated by incorporating compressed sensing technique. The position estimation was performed from the obtained magnetic field distribution images, and it was confirmed that the estimated depth was uniquely obtained.

研究分野：光計測

キーワード：光ポンピング磁力計 信号源位置推定 圧縮センシング ゴーストイメージング 単一画素計測 磁界分布計測 磁気微粒子イメージング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (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、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。このような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、内部に存在する磁界発生源の位置を検出できる。

### 2. 研究の目的

本研究は光学式磁界センサを用い、センサ内における三次元磁界分布情報の取得を目的とする。測定対象となる磁界は 100 kHz 程度の交流磁界とし、用いるセンサヘッドはアルカリ金属蒸気を封入したガラスセルとする。磁界分布情報を取得するため、デジタルマイクロミラーアレイデバイス (DMD) の反射光によってバイナリパターンを生成する。反射光はセンサヘッド内を透過し、それぞれのフォトディテクタ (PD) で受光される。得られた信号はゴーストイメージング (GI) を適用することでガラスセル内の光軸と垂直な方向の二次元空間分布として取得できる。ガラスセルへ 2 方向から照射し、セル内で交差する領域を考えると、それぞれの光が交差する領域は磁界に対して感度を持たない不感領域となる。これにより、ガラスセル内の三次元空間に対して直交する 3 平面のバイナリパターンの形成と、それらの出力信号を得ることが可能となり、GI を適用することで三次元磁界分布情報が取得できる。

### 3. 研究の方法

センサヘッドへのバイナリパターン照射とゴーストイメージング (GI) の適用による二次元磁界分布の画像化を行い、これまでの走査による画像化との比較を行った。比較には環境磁場ノイズとしてエアコン稼働時における画像化を行った。さらに、走査では  $32 \times 32$  画素での空間分解能が限界であったが、ゴーストイメージングによる高空間分解能化を試みた。

磁界分布画像の応用として磁気微粒子イメージングへ向けた基礎的検討を行った。測定対象には実際に臨床で用いられる磁気微粒子をセンサ付近に配置し、その微粒子からの信号取得を試みた。信号取得には励起磁場との分離が必要となるため、新たにロックインアンプの位相敏感検波機能を採用し、励起磁場と信号磁場の分離を試みた。信号磁場の分布画像取得について、測定時間を短縮するために圧縮センシングの手法を取り入れた。少ないデータ数で得られた画像を用いて磁気微粒子の位置推定を実施した。

### 4. 研究成果

励起磁場と磁気微粒子からの信号磁場の分離手法として新たにロックインアンプの位相敏感検波を利用した分離手法を提案し、その有効性を実証した。励起磁場強度は人に対する曝露量を考慮するために国際ガイドラインに定められた強度以下 (200 kHz において 15 nT) として磁気微粒子からの信号検出を実施した。これまでの数 mT の励起磁場強度と比較すると、磁気飽和が起きない弱い励起磁場であっても信号磁場を分離し検出できることを実証した。図 1 に励起磁場強度に対する磁気微粒子からの信号出力を示す。微粒子からの信号強度が負となるのは磁気微粒子の磁化が緩和によって励起磁場の位相よりも遅れるためであり、位相遅れの信号として負の信号強度を示す。励起磁場強度の増大にともない、信号強度が線形に変化することを確認した。このことから、励起磁場強度が 640 nT であっても磁気微粒子の磁気飽和が生じていないことが確認できる。

磁界分布の測定には光学式磁界センサに DMD を組み合わせ、センサを微粒子付近に設置した状態で磁界分布を取得し

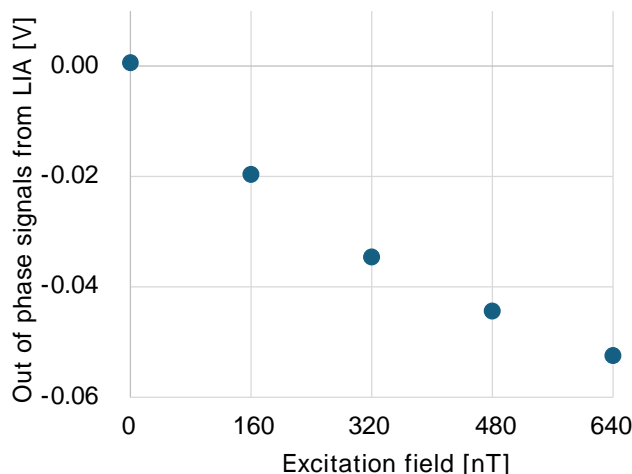


図 1. 励起磁場強度に対する磁気微粒子からの信号強度

た．図 2 に励起磁場強度を 640 nT, 200 kHz としたときの，磁気微粒子の有無による磁界分布画像を示す．図 2(a)では上方に設置した磁気微粒子によって信号強度の負の増大が確認でき，図 2(b)に示す磁気微粒子無しの時よりも明確に微粒子からの生じた信号磁場を示している．

磁界分布画像の取得にはゴーストイメージングを取り入れることでロバスト性や高空間分解能化を実現し，さらに圧縮センシングを取り入れることで測定時間の短縮を実証した．得られた磁界分布画像を解析することで位置推定を行い，推定深さが一意に得られることを確認した．

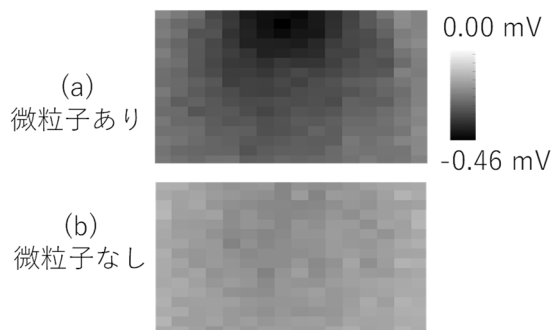


図 2. センサ上に(a)磁気微粒子を置いた場合と ,(b)磁気微粒子を置かない場合の磁界分布画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 田上周路、田中拓充、豊田啓孝	4. 巻 122
2. 論文標題 光学式磁界センサを用いた交流磁界分布の画像化 ~ 誘導コイルの周辺磁界による回路特性の評価 ~	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 57-62
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26件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Shuji TAUE, Takumi Tanaka, Hiroto Suzuki, Yoshitaka Toyota
2. 発表標題 Detection of AC magnetic field distribution using optical magnetometer with digital micro-mirror device
3. 学会等名 OPTM in OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022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の画像化 ~ 誘導コイルの周辺磁界による回路特性の評価 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 環境電磁工学研究会（EMCJ）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田上 周路, 田中 拓充, 鈴木 寛人
2. 発表標題 単一画素計測による磁界分布画像の取得
3. 学会等名 第16回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 光ポンピング磁界センサを用いた誘導コイル周辺の磁界分布測定
3. 学会等名 第10回 磁性材料の高周波特性活用技術調査専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大川令二, 田上周路, 星野孝総
2. 発表標題 磁界分布の単一画素計測における注目領域の抽出
3. 学会等名 第22回情報フォトンクス研究グループ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 光ポンピング磁気センサを用いた磁気微粒子検出の検討
3. 学会等名 第22回情報フォトンクス研究グループ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuji Taue
2. 発表標題 Magnetic field imaging with single pixel camera
3. 学会等名 The 12th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田上 周路、満井 照葉、笹山 瑛由
2. 発表標題 光ポンピング磁界センサを用いた磁気微粒子検出に関する基礎的検討
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 光ポンピング磁界センサを用いた交流磁界分布の画像化
3. 学会等名 一般社団法人日本オプトメカトロニクス協会 光センシング技術部会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuji Taue, Takumi Tanaka, Hiroto Suzuki, Yoshitaka Toyota
2. 発表標題 Detection of AC magnetic field distribution using optical magnetometer with digital micro-mirror device
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022, OPTM7-02（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

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 2021年

1. 発表者名 田中 拓充, 田上 周路, 豊田 啓孝
2. 発表標題 光学式磁界センサを用いたコイルによる磁界吸収の画像化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022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-極低周波な磁界変動に対するロバスト性の評価-
3. 学会等名 第21回情報フォトニクス研究グループ研究会
4. 発表年 2021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交流磁界分布の画像化-ロバスト性の評価-
3. 学会等名 第15回 新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田上 周路
2. 発表標題 交流磁界分布の画像化とその応用について
3. 学会等名 第13回デジタルオプティクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 交流磁界の光学測定と画像化
3. 学会等名 テラヘルツ光科学のトレンド2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田上周路, 滝沢優太, 大川令二, 星野孝総, 笹山瑛由
2. 発表標題 光ポンピング磁界センサを用いた磁気ナノ微粒子の位置検出
3. 学会等名 情報フォトニクス研究討論会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Reiji Okawa, Yuta Takizawa, Shuji Taue, Yukinobu Hoshino and Teruyoshi Sasayama
2. 発表標題 Single-pixel imaging with optically pumped magnetometer for magnetic particle imaging
3. 学会等名 The 14th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuji Taue, Reiji Okawa, Yuta Takizawa, Yukinobu Hoshino, and Teruyoshi Sasayama
2. 発表標題 Magnetic particle imaging using optically pumped magnetometer
3. 学会等名 2023 Information Photonics Conference (IP2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 滝沢 優太, 田上 周路
2. 発表標題 光学式磁界センサを用いた磁気微粒子からの磁界分布測定
3. 学会等名 第23回情報フォトニクス研究グループ研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大川 令二, 田上 周路, 片岡 将磨, 水谷 康弘, 星野 孝総
2. 発表標題 光ポンピング磁界センサを用いた磁界分布測定における圧縮センシングの基礎的検討
3. 学会等名 第23回情報フォトニクス研究グループ研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田上周路
2. 発表標題 交流磁界分布画像の取得と応用
3. 学会等名 A Series meeting on Advanced Key Technology (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田上周路, 大川令二, 滝沢優太, 星野孝総, 片岡将磨, 水谷康弘, 笹山瑛由
2. 発表標題 光ポンピング磁界センサを用いた磁性ナノ粒子からの磁界分布測定
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Reiji Okawa, Yuta Takizawa, Shuji Taue, and Yukinobu Hoshino
2. 発表標題 Single-Pixel Imaging of AC Magnetic Field
3. 学会等名 Digital Holography and Information Photonics 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuji Taue
2. 発表標題 Magnetic field imaging with optically pumped magnetometer and its applications
3. 学会等名 Digital Holography and Information Photonics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大川令二, 滝沢優太, 田上周路, 星野孝総
2. 発表標題 圧縮センシングを用いた磁界分布測定と信号源位置推定に関する研究
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22回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 3次元情報取得方法および3次元情報取得装置	発明者 田上周路	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-136555	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

高知工科大学 光計測工学研究室  
<http://www.sceng.kochi-tech.ac.jp/taue/>

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
---------	---------