# 回転磁気双極子とスマートフォンを用いた瓦礫埋没者探索

代表研究者	奈良	高明	東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻教授
共同研究者	千葉	昭宏	東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程

# 1 序

地震災害時に、瓦礫中に埋まった人を迅速に発見する手法の開発が望まれている. 瓦礫中に進入するロボ ット[1]の先端にカメラやマイクをつけて探索する,あるいは二酸化炭素センサを搭載して生存者の呼気を検 出[2]するという手法が提案されているが、これらの局所的計測に基づく方法は精確な反面,探索に時間がか かるという問題がある.これに対し、瓦礫を透過する電磁場を用いて、大域的に探索する手法も提案されて いる.狭帯域レーダを用い生存者の呼吸の動きを検出する方法[3],超広帯域レーダを用いた方法[4,5]など である.しかしながら、マイクロ波帯の高周波電波の特性として、金属に囲まれた状況での特定は困難であ り、また金属反射および水分による吸収が位置推定精度に大きく影響を与えるといった問題点があった.迅 速性、位置推定精度,探索者のもつ装置の可搬性・簡便性の観点から、瓦礫埋没者探索に決定版はまだない のが現状であり、これらの課題を克服する探索モダリティを開拓することは重要な課題といえる.

本研究では、瓦礫埋没者探索のために低周波磁場を利用する.ここで低周波とは、探索者と埋没者の距離 に対し、波長が十分に長いことを意味する.その最大の特長は、マイクロ波帯の電磁波に比べ、金属による 反射や水分中での減衰の影響が小さいことである.磁場源からの距離三乗分の一に反比例して振幅が減衰す るため探索レンジは限られるが、瓦礫中に多く含まれる金属の影響を受けずに正確な位置同定ができること は大きな利点である.

そして、多くの人がスマートフォンを携帯する現代において、地震に埋没したときにスマートフォンを低 周波磁場のセンシングデバイスとして用いることを提案する.探索者は磁石をモーターで回転させるだけの 簡易で可搬性の高い装置を持ち、空間中に磁場を生成する.このとき、この回転磁気双極子の性質から、磁 気双極子から見た三次元空間中にコーディングされる.そこで、埋没者のもつスマートフォンでこの磁場を 計測し、探索者位置を推定し、探索者に通知する.以上が本研究で目指すシステムである.その実現のため、 本研究では以下の三点を具体的な目的とした.

1)回転磁気双極子により生成された磁場を三軸磁気センサで計測し、回転周波数で直交検波した量を用いて、センサ位置から見た磁気双極子の方位角・天頂角・距離を計算するアルゴリズムを開発する.

2) 磁気インピーダンスセンサを用いた基礎的な原理検証実験を通して、定位可能な範囲や金属反射の影響の調査を行う.

3) スマートフォンのセンサを用いた定位システムを作成する.

# 2 理論[6]

スマートフォンによる探索者の位置定位のためには、通常の磁場源定位で用いられるような磁気センサア レイを用いることなく、局所的に置かれた磁気センサを用いた磁場源の定位が必要である.本研究では、探 索者が、水平面内で回転する磁石、すなわち回転磁気双極子をもつものとするとする.これにより、探索者 から見た空間中の位置を磁場にコーディングすることができ、これを局所的なスマートフォンで観測するこ とで磁気センサから見た磁場源の方向が決定できる.

#### 2-1 問題設定

図1のように、xy平面と平行な面内で回転する磁気双極子が作る磁場ベクトルを原点で観測し、回転磁気 双極子の三次元位置を推定する問題を考える.原点から見た回転双極子までの距離、方位角、天頂角をそれ ぞれ  $r, \theta, \phi$ とする.また磁気双極子は角周波数  $\omega$ で回転しているものし、磁気モーメントは

$$p(t) = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p\cos(\omega t + \theta_0) \\ p\sin(\omega t + \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix}$$
(1)

と表されるものとする. このときセンサ位置で観測される磁束密度は

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r},t) = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3(\boldsymbol{p}(t) \cdot \boldsymbol{r})\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|^5} - \frac{\boldsymbol{p}(t)}{|\boldsymbol{r}|^3} \right)$$
(2)

と書ける. ここで磁気モーメントp,回転周波数  $\omega$  は既知,初期位相  $\theta_0$  は未知であるとする.  $\omega$  は、センサで観測された磁束密度の時系列データに Fast Fourier Transform(FFT)を施し、ピーク周波数を観測することで決定可能である.なお、以下で述べるように、探索者が埋没者の方向のみ定め近づいていけばよいという応用場面では p は既知である必要はない.



図1. 問題設定

これまで、瓦礫埋没者探索とは応用は異なるが、磁気双極子を回転させ三次元定位に用いる手法が提案されている[7,8].しかしこれらの手法では、回転磁気双極子とセンサで時刻を同期させておき、センサ位置において磁束密度が最大・最小となる時刻における回転磁気双極子の方向を把握する必要があった.瓦礫埋没者探索において、探索者と埋没者スマートフォンが同期をとることは望めない上、交流磁界の最大最小検出は低SN時に精度高く行えないという問題があった.そこで本研究では、回転磁気双極子とセンサで時刻同期がとれていない、換言すれば、回転磁気双極子の初期位相  $\theta_0$  は未知である場合でも定位可能な手法を導出する.

## 2-2 磁束密度の回転周波数成分計測に基づく三次元位置推定

磁気双極子が左回りに回転していることを鑑み、 $B_x + iB_y$ を観測量とすることを考える.式(2)より、

$$B_x + iB_y = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \left( \frac{3\sin^2\psi}{2} e^{-i(\omega t + \theta_0 - \phi)} + \frac{3\sin^2\psi - 2}{2} e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)} \right) e^{i\phi}$$
(3)

と表されることから、その ±ω の角周波数成分は

$$\int_{0}^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin^2 \psi - 2}{2} NT e^{i\theta_0}, \quad \int_{0}^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin^2 \psi}{2} NT e^{-i\theta_0} e^{i2\phi}$$
(4)

と書ける. ただし、 $T = 2\pi/\omega$  は周期であり、N は検波時間を決定する整数である. 同様にして、磁束密度の z 成分は

$$B_{z} = \frac{p\mu_{0}}{4\pi r^{3}} \frac{3\sin\psi\cos\psi}{2} \left( e^{-i(\omega t + \theta_{0} - \phi)} + e^{i(\omega t + \theta_{0} - \phi)} \right)$$

と表され, その ±ω の角周波数成分は

$$\int_{0}^{NT} B_{z} e^{-i\omega t} dt = \frac{p\mu_{0}}{4\pi r^{3}} \frac{3\sin\psi\cos\psi}{2} NT e^{i\theta_{0}} e^{-i\phi}, \quad \int_{0}^{NT} B_{z} e^{i\omega t} dt = \frac{p\mu_{0}}{4\pi r^{3}} \frac{3\sin\psi\cos\psi}{2} NT e^{-i\theta_{0}} e^{i\phi}$$
(6)

と書ける.以上より、 $B_x + iB_y$ および $B_z$ の  $-\omega$ の角周波数成分を組み合わせることで、天頂角  $\psi$ が

(5)

$$\psi = \arctan \left| \frac{\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt}{\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt} \right|$$
(7)

と書けることがわかる. 同様にして,式(4),(6)より,方位角 ¢ は

$$\phi = \arg \frac{\int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t}dt}{\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t}dt}$$

により決定することができる.距離 r については、 $B_x + iB_y$ の  $\pm \omega$ の周波数成分から

$$r = \left[\frac{p\mu_0 NT}{8\pi} \sqrt{\frac{\left(3\sin^2\psi\right)^2 + \left(3\sin^2\psi - 2\right)^2}{\left|\int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t}dt\right|^2 + \left|\int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t}dt\right|^2}}\right]^3 \tag{9}$$

(8)

1

により定まる.こうして,磁気双極子の三次元位置を,観測量から陽に表現する再構成公式が得られた.観測量としては,磁場ベクトルの成分  $B_x, B_y, B_z$ を直交交検波することで得られる角周波数 ± $\omega$ のフーリエ成分のみで書かれており,高い SN 比で計測可能な量を用いて,陽な形で三次元位置を推定することができる. 従来法[7,8]では,回転磁気双極子モーメントの時々刻々の向きを把握した上で,これと同期した時刻をもつ センサを用い,磁場の最大値を検出しなければならなかった.これは埋没者探索においては実現困難な設定 である.これに対し提案法では,回転双極子の磁気モーメントの時間変化をセンサ側で把握する必要がなく, 埋没者のもつセンサで磁場だけを観測すればよい.また直交検波による観測量を用いるため,観測時間*NT*を 十分大きくとれば,ノイズの大きい環境下でもその影響を低減し推定可能であるという利点を有する.

ただし,探索者と埋没者が同一平面上にいるとき,もしくはこれに近い状況のときは注意が必要である. この場合,磁束密度はこの面内に限られ,したがって  $|B_z|$  が零になる.このとき,式(7)より, $\psi = \pi/2$  となり,同一平面上にいることは検知できるが,式(8)は不定になる.したがってこの場合は, $B_x, B_y$ だけを用いた方位角の推定が望まれる.ここで,式(4)より,

$$\int_{0}^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt \int_{0}^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt = \left(\frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{NT}{2}\right)^2 (3\sin^2\psi) (3\sin^2\psi - 2) e^{i2\phi}$$
(10)

が成り立つことに注目する. 天頂角  $\psi$  は求められているので,  $3\sin^2\psi - 2$ の正負に応じて

$$\phi = \frac{\arg \int_{0}^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt \int_{0}^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt}{2} \quad (3\sin^2 \psi - 2 > 0 \mathcal{O} \succeq \mathfrak{E})$$
(11)

$$\phi = \frac{\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt}{2} - \frac{\pi}{2} (3\sin^2 \psi - 2 < 0 \mathcal{O} \geq \mathbb{R})$$
(12)

として方位角を決定することができる.ただし、この場合、0<φ<πという制限がつくことに注意する.

### 3 実験

#### 3-1 磁気インピーダンスセンサを用いた基礎実験[9]

図2のようにネオジウム磁石を機械的に回転させる磁気双極子を作成した.パイプ型のネオジム磁石(長さ27mm,内径13mm,外径23mm)を四つ直列に接続した磁石を固定する治具をアクリルで作成し,これをモータ(KM-1,Keigan)に固定し,240rpm(4Hz)で回転させた.磁石付近での磁束密度の大きさは最大50.5mであった.

原理の基礎的検証のため,まず磁気インピーダンス (magnetic impedance: MI) センサ (MI-CB-1DH, Aichi

Micro Intelligent)を用いた推定を行った.図3に示すように、三つのMIセンサをそれぞれの磁場の計測 方向が直交するように配置した.三つのMIセンサを発振器(MI-CB-1DH-OSC, Aichi Micro Intelligent)に 接続し同期して計測した.それぞれのセンサの出力をAD変換ボード(NI9215, National Instruments)を用 いて2 kHz で同期してサンプリングした.





図4に実験環境の模式図を示す.回転磁気双極子を台車に載せ、xy平面に平行な平面上を移動させた.磁気双極子から発せられる磁場を、センサで1秒間計測し、FFTによりピーク周波数を計算した.次に、 $\omega$ をFFTで検出されたピーク周波数、NT = 1s として、磁束密度の角周波数  $\pm \omega$ のフーリエ成分を計算した.また磁場の計測と同時に、光学式の追跡装置(Flex 3, Optitrack)を用いて参照用の位置を計測し、提案手法によって推定された位置と参照用の位置の誤差を評価した.実験データの計測および推定は、MATLAB R2018bを用いて行った.

磁気モーメントの大きさ p は、x = -1000, -500, ..., 1000mm, y = 1000, 1500, ..., 3000mm, z = 350mm であらかじめ計測した磁束密度に対して、式(9)を用いて、最小自乗問題を解くことで決定した.

また、マーカがセンサに近づきすぎて、センサ出力の振幅が MI センサの出力の最大値および最小値である ±2.5V を超えてしまう場合は、以下の方法で信号の振幅を推定した:センサの出力が負から正、または、正 から負に変化する時刻を0秒とし、0秒付近のサチュレーションを起こしていない信号*d<sub>i</sub>*(*i* = 1,...,*M*)および

その時刻 
$$t_i$$
 に対して,最小自乗問題  $\sum_{i=1}^{M} |d_i - (A \sin \omega t_i + c)|^2 \rightarrow \min$ を解くことにより,信号の振幅Aと定数cを

求めた.

図 5 左に (x,y,z) = (0, 3000, 150)mm において観測された磁束密度の時系列を示す. MI センサの感度は 1V/  $\mu$  T なので,この例では、おおよそ 0.3  $\mu$  T の磁束密度が観測されていることになる.また図 5 右に磁気双極 子の軸上におけるセンサまでの距離と観測された MI センサの信号強度の関係を示す.



図 5 (左)(x, y, z) = (0, 3000, 150)mm において観測された磁束密度の時系列 (右)磁気双極子軸上 におけるセンサまでの距離と観測された信号の関係

磁気双極子をx = -2000, -1000, ..., 2000mm, y = 500, 1000, ..., 3000mm, z = 150mm で動かし, 式 (7), (9), (11), (12)を用いた位置推定結果を図4に示す.提案手法で推定された位置の平均値を〇印で, 光学 式の追跡装置で計測した参照用の位置を\*印で示した.また10回計測した際の標準偏差も併せて表した.推 定位置と参照位置の絶対誤差の平均は91.7mm,標準偏差は85.4mm であった.これは想定される埋没者人体 の大きさに比べれば十分小さいといえる.提案手法では,直交検波を用いることにより,センサとマーカの 距離が遠くSN 比が低い状況でも有効な位置推定を実現したと考えられる.4000mm×2000mm の範囲でこの程 度の精度で位置推定ができれば,埋没者探索の精度としては十分利用可能なものといえる.高精度だが近傍 (数十 cm 程度)の埋没者しか検出できない局所的探索と,金属反射の影響により人体の大きさほどの精度は出 せないが広範囲(数十 m)の埋没者が検出できる広域的探索の丁度中間的な精度と探索範囲が実現できてい ると言え,他手法との相補的利用が期待できる.

実験を行った部屋において, **y** = 3500 mmの直線上にスチール製の事務机が並んでおり,そして, **x** = -2500 mmの付近には,鉄製の除振台がある.このうち,定位結果に影響を与えているのは,1100 mm×700 mmの鉄板を備える除振台のみと考えられるが,磁性体の巨大な塊に対しては,局所的ながら影響を考慮すべきであると言える.筆者らは,固定双極子がつくる磁場に対する磁性体の影響を等価多重極でモデリングする手法[10]を提案しており,同様の議論を回転双極子に対して適用して,磁性体の影響を詳細に解析することは今後の課題としたい.



図6 位置推定実験結果.〇:提案法による推定位置(真値).\*:光学式センサを用いて計測した位置.

次に, **z** = 350mm のとき,式(8)を用いて方位角を推定し,三次元位置を推定した結果を図7に示す.推 定位置誤差は49.9±32.3mm であった.この場合は,第一象限から第四象限の全方向に対して位置推定ができ ていることがわかる.



図7 式(7),(8),(9)を用いた全方向の定位

## 3-2 金属による遮蔽の影響の確認

瓦礫埋没者探索を考える上では、回転磁気双極子とセンサの間に多数の金属があり、遮蔽された環境でも 定位できることが肝要である.そこで、図8左のように、厚さ2mmのアルミ製の金属板をセンサの周囲三 方に配置した環境で定位実験を行った.本節以降、方位角の推定には式(11)、(12)を用いた.結果を図8右に 示す.推定された位置と参照用の位置の絶対誤差の平均は94.7mm、標準偏差は81.5mmであり、アルミ板が ない場合とほとんど変わらない精度で定位できることが確認された.





図8 金属が定位精度に与える影響の評価実験:センサをアルミ板で囲い,回転磁気双極子から遮蔽した上で,定位実験を行った.金属板がない場合とほぼ変わらない精度で定位できていることがわかる.

次に、センサとマーカが完全に遮蔽されるような状態での実験として、センサを置いた部屋の外にマーカ を置いた状態で、マーカの位置を推定した. 図9左, 図9中央 に示すように、磁気双極子を部屋の外に配置 し、鉄筋コンクリートの壁と鉄製の扉、鉄製の棚で隔てられた部屋内のセンサで位置推定を行った. 双極子 位置を  $\mathbf{x} = -4000$ , 2000, ..., 4000 mm,  $\mathbf{y} = 4000$ , 5000 mm,  $\mathbf{z} = 860$  mm で移動させた. 部屋の外では光 学式の追跡装置を使用できなかったため、参照用の位置はメジャーを用いて測定した. 位置推定結果を図9 右に示す. このように視覚的に完全に遮蔽され、鉄製扉で隔てられた場合でもおおよその位置が推定できる 点は低周波磁場の利点であり、瓦礫埋没者探索に適した特性をもつことが示されたと言える.



図9 廊下においた回転磁気双極子を部屋の中のセンサを用いて推定する.(左)実験環境写真:磁気双極子 とセンサは,鉄筋コンクリートの壁,鉄製の扉,鉄製の棚で隔てられている.(中央)実験環境配置図.(右) 推定結果.

#### 3-3 スマートフォンを用いた定位

スマートフォンをもつ瓦礫埋没者の位置推定を行う場合,埋没者と探索者で座標系(xy 平面)が傾いている ことを考慮する必要がある.そこで、スマートフォンで観測される地磁気と加速度計、および回転双極子位 置における地磁気を用いて両座標系の傾きを補正する手法を開発した.回転双極子の xyz 軸に対して、スマ ートフォンの XYZ 軸が α,β,γ 傾いているとき、スマートフォンで観測される重力加速度を

 $g = |g|(g_x, g_y, g_z)^T$   $\forall$   $\forall$  t

$$\sin \alpha = -\frac{g_y}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}}, \ \cos \alpha = -\frac{g_z}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}}, \ \sin \beta = g_x, \ \cos \beta = \sqrt{g_y^2 + g_z^2}$$
(13)

により $\alpha$ ,  $\beta$ を決定できる.また、スマートフォンで観測される地磁気を $B_s$ 、探索者位置で観測される地磁気を $B_d$ とすれば、

$$\boldsymbol{B}_{s} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \boldsymbol{B}_{d}$$
(14)

と書け、これよりγも決定できる.以上より、探索者側の地磁気情報を送信しておけば、スマートフォンの 座標軸の傾きを決定できる.そこでスマートフォンで観測された磁場を探索者座標系での磁場に変換するこ とができ、提案定位法を用いることができる.

Android スマートフォン(Xperia SO-04J, ソニーモバイルコミュニケーションズ)を用い定位実験を行った. MATLAB Mobile を用い,サンプリング周波数 100Hz で 30 秒間,磁束密度おおよび加速度を計測し,時系列デ ータを探索者 PC に伝送した. PC 側で matlab を用い,姿勢の補正を行った上でスマートフォンの位置を推定 した.ただし, yの推定には,上記の地磁気を計測する方法とは異なる複数の方法を試している.この手法 および結果は未発表のため本報告書での詳述は割愛するが,おおよそ 3m 離れた位置からスマートフォンの位 置推定が可能であり,この情報に基づき探索者が回転磁気双極子をもちながら移動し,スマートフォンの位 置に接近できることを確認した.

### 4 結論

本研究では、回転磁気双極子によって生成される磁束密度を観測し、センサ位置から見た回転磁気双極子 の三次元位置を推定する手法を提案した.磁束密度の回転周波数成分を直交検波で検出することで、天頂角、 方位角、距離が陽に求められることを示した. MI センサを用い、水平面内で回転する磁石の位置が定位でき ることを実験的に検証し、金属による遮蔽に強い位置推定が実現できることを示した. スマートフォンの磁 気センサを用いても同様にして位置推定ができることを示した. 瓦礫埋没者のスマートフォンを用いて、探 索者のもつ回転磁気双極子を定位するシステムの基礎が構築できたと言える. 高精度だがごく近傍の埋没者 しか検出できない局所的探索と、金属反射の影響により精度は低下するが広範囲の埋没者が検出できる広域 的探索の丁度中間的な精度と探索範囲が実現でき、他手法との相補的利用も期待できる.

# 【参考文献】

[1] M. Konyo, K. Isaki, K. Hatazaki, S. Tadokoro, and F. Takemura, Ciliary Vibration Drive Mechanism for Active Scope Cameras, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.20, No.3 pp.490-499, 2008.

[2] H. Toda and G. Capi, Development of a high resolution human breath gas sensor considering application for rescue robotics in disaster zones, 2010 IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, pp. 1-5, 2010.

[3] I. Arai, Survivor search radar system for persons trapped under earthquake rubble, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2001), Vol.2, pp. 663-668, 2001.

[4] E. Zaikov and J. Sachs, UWB radar for detection and localization of trapped people, Ultra Wideband, ed. B. Lembrikiov, Intech, 2010.

[5] A. Nezirovic, A. G. Yarovoy, and L. P. Lighthart, Signal processing for improved detection of trapped victims using UWB radar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, pp. 2005-2014, 2010.

[6] A. Chiba and T. Nara, Three-dimensional localization of a rotating magnetic dipole from the Fourier integrals of its magnetic flux density with acceleration data, AIP Advances, Vol. 10, No. 2, 025020, 2020.

[7] E. Paperno, I. Sasada, and E. Leonovich, A new method for magnetic position and orientation tracking, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 1938–1940, 2001.

[8] K. Watanabe, K. Hiroi, T. Kamiyama, H. Sano, M. Tsukamoto, M. Katagiri, D. Ikeda, K. Kaji, and N. Kawaguchi, A Smartphone 3D Positioning Method using a Spinning Magnet Marker, Journal of Informa-tion Processing, Vol. 27, pp. 10–24, 2019.

[9] 千葉昭宏, 奈良高明, 磁束密度のフーリエ成分に基づく回転磁気マーカの位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 4, pp. 968-977, 2020.

[10] T. Nara, H. Takeda, and S. Ando, Effect of ferromagnetic objects in rubble on rescue beacon searches, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 52, No. 1-2, pp. 61–66, 2016.

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Three-dimensional localization of a rotating magnetic dipole from the Fourier integrals of its magnetic flux density with acceleration data	AIP Advances	2020 年 2 月
磁束密度のフーリエ成分に基づく回転 磁気マーカの位置推定	情報処理学会論文誌	2020年4月
Localization of Rotating Magnetic Marker from the Fourier components of its Magnetic Flux Density	Proceedings of MMM2019	2019年11月
磁束密度のフーリエ係数を用いた回転 磁気マーカの三次元位置推定	第 36 回センシングフォーラム	2019年8月

〈発 表 資 料〉