

令和 5 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21051

研究課題名（和文）回転双極子磁場源・音源を用いた瓦礫埋没者探索

研究課題名（英文）Search for victims in rubble using rotating magnetic and acoustic dipoles

研究代表者

奈良 高明（Nara, Takaaki）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：80353423

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：地震災害において瓦礫埋没者を迅速に探索する手法の開発は重要な課題である。本研究では、多くの人が携帯するスマートフォンを瓦礫埋没者探索に用いる手法を提案した。探索者は回転双極子磁場源および双極子音源を用いて、位置推定が容易となるような磁場・音場を空間中に生成しておく。これらを埋没者のスマートフォンの磁気コンパスやマイクロフォンで観測し、探索者から見た埋没者の方向を推定し通信で知らせる。千葉県消防学校の震災訓練場において探索実験を行い、多数の瓦礫が山積された場合でも20m程度離れた位置からスマホに接近可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震災害時における要救助者の位置推定は、迅速な救助のための必須要件である。従来法として、音響探査、電磁波探査法などがある。これらは要救助者自身を探索する直接的な手法と言えるが、要救助者が声を出せないと推定できない、金属製瓦礫に囲まれると推定精度が悪化するといった問題があった。これに対し提案手法は、埋没者がスマートフォンを持っていないといけないという制約があるが、従来法で困難な状況でも探索が可能になるというメリットがある。これらを相補的に用いることで、迅速な瓦礫埋没者を実現できるようになるというのが本研究の学術的・社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：In urban earthquakes, searching for survivors buried in rubble is inevitable. This research proposed a method using smartphones of the survivors for their search. A rescuer uses a rotating dipole magnetic source and dipole sound sources to generate the magnetic and sound fields in the exploration space that can be used for localization. Then, the smartphones of the buried people detect those fields, calculate their directions viewing from the rescuer, and convey the direction information by communication. The experiments conducted in Fire Academy of Chiba prefecture showed that the rescuer was able to approach a smartphone in the range of about 20 m even when it was surrounded by rubble.

研究分野：逆問題

キーワード：逆問題 音源定位 磁場源定位 要救助者探索

1. 研究開始当初の背景

地震災害時において、瓦礫に埋没した人の位置を特定し迅速に救助する技術が求められている。現在、災害現場では、音響探査、電磁波探査などが用いられている[1, 2]。これらは要救助者自身を探索する直接的手法と言えるが、要救助者が声や音を出せないと推定できない、金属製瓦礫に囲まれると精度が悪化する、という問題があった。

現代、スマートフォン（以下スマホ）の所有率は高い。もしも埋没者のもつスマホのセンサを利用して位置推定できれば、要救助者が声を出せない場合や、金属瓦礫に囲まれた場合など、従来法で困難な状況でも探索が可能になる。ただし、屋外の定位のために通常用いられる GPS は、倒壊家屋や金属製瓦礫に囲まれた場合大きな誤差をもつため、電波以外の手法を用いたスマホ位置推定が必要である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、探索者が位置情報を埋め込んだ物理的な場を空間中に発生させ、埋没者もつスマートフォンでこれを計測し、位置を推定して探索者に知らせるというシステムを開発することを目的とした。物理場としては低周波磁場を用いる方法と音場を用いる方法の二種類の手法の開発を目指した(図1)。低周波磁場は、探索範囲は2-3 m 四方と狭いが金属製の障害物に囲まれても精度良く推定できる利点があり、一方の音場は障害物による回折と反射の影響を受けるものの電波に比べれば波長が長いいためその影響は比較的小さく、なおかつ低周波磁場よりも探索範囲が広いという利点をもつ。そこで磁場、音場それぞれを用いた手法を開発し、将来的な統合の基盤の確立を目指した。

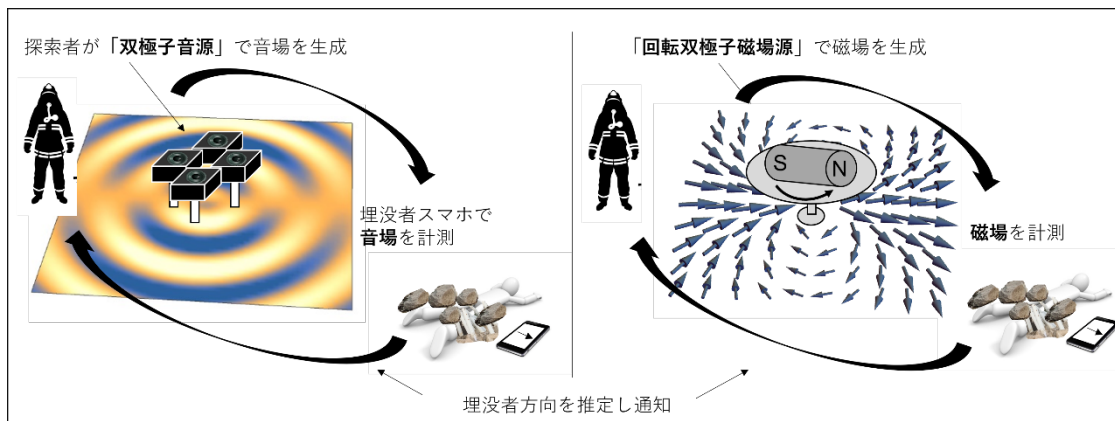


図1：音場および磁場を用いた瓦礫埋没者探索

3. 研究の方法

(1) 磁場を用いる方法[3, 4]

図2のようにネオジウム磁石をモータで回転させ、スマホの磁気コンパスで磁場ベクトルの3成分を観測する。計測磁場の回転周波数成分を検出し、探索者から見たスマホの方位角および天頂角を推定する手法を導出した。またモバイル端末で方向推定を行うアプリを実装し、実証実験を行った。

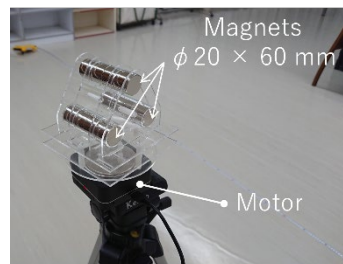


図2：回転磁気双極子磁場源

(2) 音場を用いる方法[5]

図3左のように、x軸方向に2台のスピーカを間隔 2ϵ で並べ、どちらも角周波数は ω_1 で、しかし逆相で駆動するx軸方向双極子音源を用意する。このとき2つのスピーカから等距離にあるy軸上では、逆相で振動された音圧同士がキャンセルし、音圧がゼロになる。一方、x軸上では2つのスピーカからの距離が若干ずれているため音圧はキャンセルされず、角周波数 ω_1 の音圧が観測される。空間全体で考えると、方位角が ϕ の方向では $\cos\phi$ に比例した音圧が観測されることになる。すなわち、探索者がx軸方向双極子音源により音圧分布

を生成した場合、探索者から見て方位角 ϕ の方向にいる埋没者のスマホで音圧の ω_1 成分を観測すると、方位角の情報が $\cos \phi$ の形で得られる。

同様に、図 3 右のように y 軸方向の双極子音源を用意する。ただし角周波数は x 軸方向双極子音源とは異なる ω_2 とする。このとき、方位角 ϕ 方向の音圧は $\sin \phi$ に比例するため、スマホで音圧の ω_2 成分を観測すれば埋没者の方位角の情報が $\sin \phi$ の形で得られる。

以上をあわせ、図 4 のように 4 台のスピーカ A, B, C, D を用いて 2 つの双極子音源を構成し、角周波数 ω_1 の x 軸方向双極子音源、角周波数 ω_2 の y 軸方向双極子音源を同時に駆動する。このときスマホで観測した音圧の角周波数 ω_1 , ω_2 成分 P_1 , P_2 から、 $\tan \phi = P_2/P_1$ として双極子音源から見たスマホの方位角 ϕ を推定する。

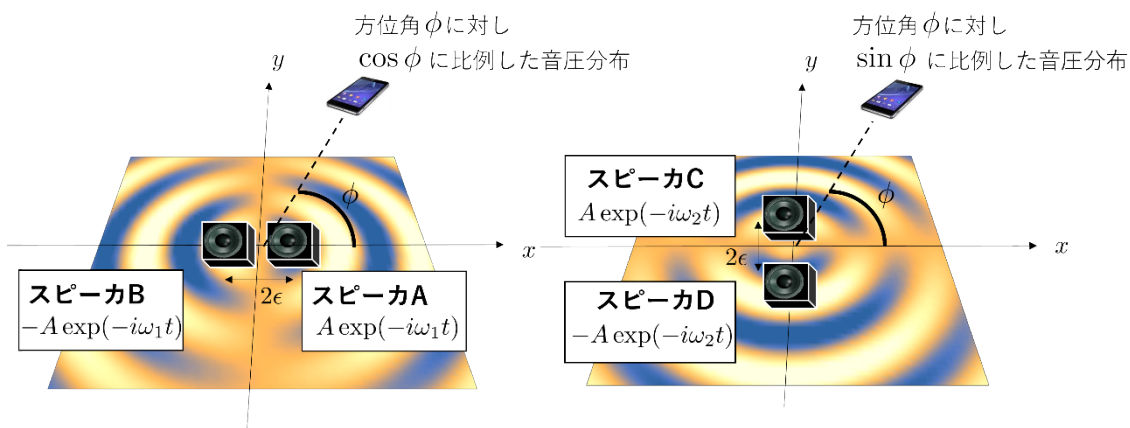


図3: (左) x 軸方向双極子音源, (右) y 軸方向双極子音源

実際はこの方法では方位角が 0 度から 90 度の範囲でしか決まらないため、さらに、スピーカ A・C の組と B・D の組を用いた斜め 45 度方向の双極子音源 (角周波数 ω_3)、およびスピーカ B・C の組と A・D の組を用いた斜め 135 度方向の双極子音源 (角周波数 ω_4) も併せて利用することで、方位角を 0 度から 180 度の範囲で決められるようにする。前方半空間と後方半空間のどちらに進むべきかは、音圧が大きくなる方向として判定可能である。

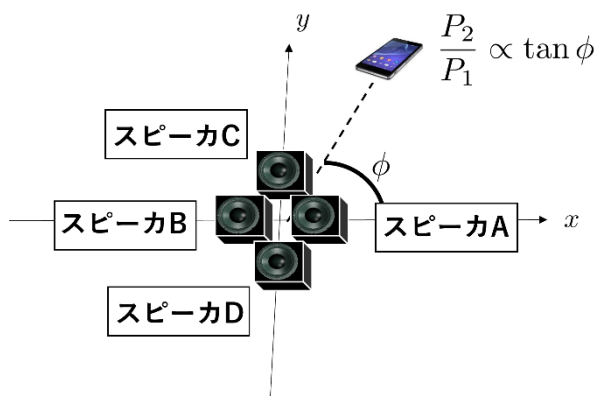


図 4 : 双極子音源を用いた方位角推定

4. 研究成果

(1) 回転磁気双極子を用いた定位

探索者をもつ回転磁気双極子から見たスマホの方位角 ϕ 、天頂角 θ が図 5 の式 (1), (2) で推定できることを示した。スマホの姿勢が水平面から傾いた時も、スマホの加速度センサを用い、かつ磁気センサを用いるか、単一の回転双極子を一度ずらして測定した結果を用いるか、もしくは、複数の回転双極子を用いるかにより、推定することができる。実験室環境において、約 3 m 程度以内の距離であれば、方位角が推定できることも示した。実験室には金属製品が多数あり、障害物が多数ある環境でも探索可能であることを示唆する結果である。

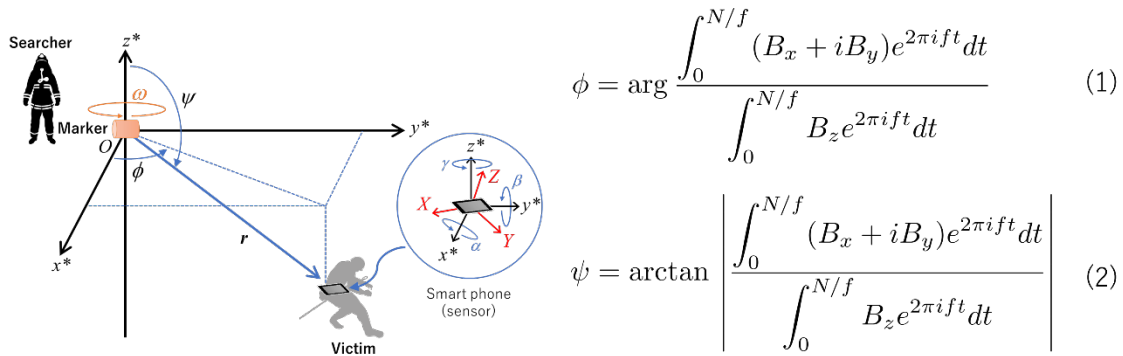


図5：回転磁気双極子磁場源による方位角・仰角推定

(2) 双極子音場を用いた定位

まず数値シミュレーションにより提案法の検証を行った。図6(a)のように原点を中心として4つのスピーカを配置し、距離4m、60度の方向に0.2m×1.5m×1.5mのコンクリート製ブロックを配置した。x軸、y軸、45度、135度双極子の周波数をそれぞれ360 Hz、350 Hz、370 Hz、380 Hzとし、音圧分布を有限要素法ソフトウェアCOMSOLを用いて計算した。半径5mの半円内の各点においてスマホで音圧を観測したときの方位角推定誤差を示したのが図6(b)である。概ねよく推定されているものの障害物の手前と背後に誤差が大きくなっている領域が帯状に発生することがわかる。手前に関しては、音源から障害物に向かう直接波と障害物による反射波により生じる定在波の節に相当する領域、背後に関しては障害物の両側から回折する音場により生じる定在波の節に相当する領域と考えられる。しかながら、仮にこの領域にスマホがある場合でも、誤差の大きい推定に基づき探索者が誤った方向にあるステップ幅だけ進行すると、音源と障害物の相対位置が変化することにより誤差は小さくなる。このように推定と進行を繰り返すことで障害物に接近できることも数値実験により示された。

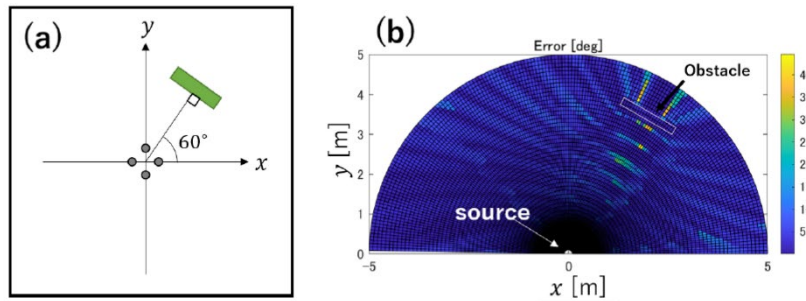


図6：障害物の影響の数値シミュレーション

4台のスピーカ (COVO-S, Micca) を用いた図7のような双極子音源を作成した。また図8左のようなスマホアプリ、図8右のような探索者用通信ソフトウェアを開発した。スマホアプリには4つの周波数の振幅、およびそれを用いた推定方位角が表示されている。方位角の推定値はBluetooth Low Energyを用いて探索者に通知され、図8右のソフトウェアに表示される。探索者はこの画面を見ながら、一定のステップ幅で動き、スマホに近づいていく。



図7：4台のスピーカによる双極子音源

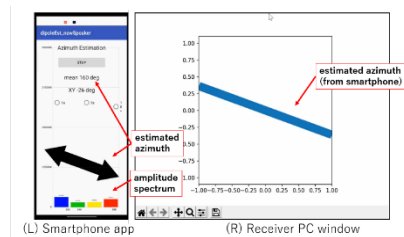


図8：(左)スマホアプリ、(右)探索者用受信ソフトウェア

基礎的な実験として、大学の広場において、スマホの周りに図9(a), (b), (c)のような障害物をおいた上で方位角推定を行った。結果を図10に示す。最大誤差は18.8度、誤差平均は7.14度であった。遮蔽物の有無・形状による推定精度の有意な違いは見られなかった。135度方向と90度方向では、距離に関わらず10度ほど推定がずれる傾向が見られた。これらの地点は象限判

定の境界値に近く誤判定が生じやすく、その影響と考えられる。標準偏差を見ると、角度 90 度方向での障害物(c)の推定結果において大きい値をとった。(c)は直接音が届かない遮蔽状態であるため、推定が不安定になった可能性が高い。60度方向の推定は、ほとんどの場合で正しく推定されていたが、距離 11 m の地点では誤差が少し大きくなる様子が見られた。この方向は数 m 先に建物があるため、壁面からの反射が影響した可能性が考えられる。



図9：模擬障害物

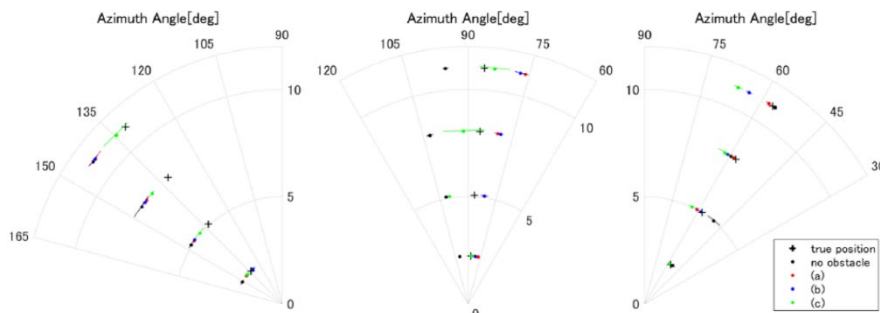


図10：推定結果

以上の基礎実験の下、瓦礫が多数ある環境で探索可能かを調べるため、千葉県消防学校の震災訓練場で実験を行った。図 11 のように瓦礫中にスマホを置き、20 m 程度離れた位置を初期値とし探索を行った。ステップ幅は 1 m とした。6 方向から探索を行ったが、いずれの場合もスマホ位置に到達することができた。途中で方位角の推定誤差が大きくなる地点も存在したが、シミュレーションと同様、1 m のステップ幅で動いて推定すると誤差の大きい領域を脱し、瓦礫が多数ある環境でもスマホに近づいていけることが示された。



図11：震災訓練場での探索実験

以上、本研究では磁場および音場を用い、瓦礫埋没者のもつスマホを探索する手法を提案した。当初は 2 個のスピーカで単一の双極子音源を構成し磁場源とともに回転させることを想定していたが、4 個の固定したスピーカで 4 通りの双極子音源を作ることにより、同等の機能が実現できることを示せた。本研究は、スマホを ID つきの磁場・音場センシング端末として要救助者位置推定に用いるという点で国内外においても例のない研究であり、複数の埋没者を同時に推定できるという利点をもつ。ただし、音場に関しては 180 度の不定性が除けていないため、複数の双極子音源を用いてまずおよその位置を決めた後、提案手法で探索を行うことは今後の課題である。また本研究では磁場、音場それぞれの手法の開発まで行ったが、これらを統合し、20~30 m 四方程度の領域でまず音を用いて探索し、3 m 四方程度まで接近した後、障害物に対しより頑健で精度の高い磁場を用いる手法を今後開発していく。さらに、埋没者自身を探索する従来法とスマホを定位する本手法を相補的に用いる手法の開発も重要な課題である。

参考文献

- [1] 全国救護活動研究会, CSRM ベーシックガイド, 東京法令出版株式会社.
- [2] N. T. P. Van, L. Tang, V. Demir, S. F. Hasan, N. D. Minh, and S. Mukhopadhyay Review - microwave radar sensing systems for search and rescue purposes, *Sensors*, 19, 2879, 2019.
- [3] 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.
- [4] A. Chiba and T. Nara, Localization of mobile devices based on a magnetic field generated by a rotating magnetic dipole, *IMEKO2021, Measurement: Sensors*, Vol. 18, 100213, Online, Aug. 30-Sep. 3, 2021.
- [5] K. Arikawa, K. Hasegawa, and T. Nara, Self-localization of monaural microphone using dipole sound sources, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 153, Issue. 1, pp. 105-118, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 K. Arikawa, K. Hasegawa, and T. Nara	4. 巻 153
2. 論文標題 Self-localization of monaural microphone using dipole sound sources	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 105-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0016812	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A.Chiba, and T.Nara	4. 巻 18
2. 論文標題 Localization of mobile devices based on a magnetic field generated by a rotating magnetic dipole	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement: Sensors	6. 最初と最後の頁 100213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measen.2021.100213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 千葉昭宏, 奈良高明	4. 巻 61
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 968-977
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20729/00204247	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 A. Matsumoto, K. Arikawa, H. Miyazako, K. Hasegawa, and T. Nara
2. 発表標題 Smartphone Localization System for Urban Search and Rescue
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本明弓, 有川和志, 宮廻裕樹, 長谷川圭介, 奈良高明
2. 発表標題 スマートフォンのマイクを用いた瓦礫埋没者の位置探索システム
3. 学会等名 第39回センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本明弓, 有川和志, 宮廻裕樹, 長谷川圭介, 奈良高明
2. 発表標題 瓦礫埋没者探索に向けたモノラルマイクの方位角推定システム
3. 学会等名 応用音響研究会 (EA)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A.Chiba and T.Nara
2. 発表標題 Localization of mobile devices based on a magnetic field generated by a rotating magnetic dipole
3. 学会等名 IMEK02021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部広暉, 長谷川圭介, 奈良高明
2. 発表標題 回転音源を用いたモバイル端末の位置推定
3. 学会等名 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

瓦礫埋没者探索
<http://www.inv.ipc.i.u-tokyo.ac.jp/naratheme.html#05>

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
研究分担者	長谷川 圭介 (Hasegawa Keisuke) (20733108)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師 (12601)	

	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
研究協力者	千葉 昭宏 (Chiba Akihiro)		
研究協力者	有川 和志 (Arikawa Kazuyuki)		
研究協力者	阿部 広暉 (Abe Koki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	松本 明弓 (Matsumoto Ayumi)		

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