

# 音響式信号機を利用したスマートフォンの格納状態と 音の減衰率の関係の基礎調査

大崎 有一朗† 勝間 亮‡  
Osaki Yuichirou Katsuma Ryo

## 概要

スマートフォンを用いて音情報を取得し、騒音レベルの推定や周囲の状況認識を行う際、音量は非常に重要である。しかし、集音において計測者の特別な行動を必要としないパッシブな形式では、様々なスマートフォンの格納状態が、計測される音量に影響を及ぼす。そこで本稿では、音響式信号機を利用したスマートフォンの格納場所および計測された音量の減衰度合いの推定を目的とし、実測データの収集および3箇所のスマートフォンの格納場所の推定精度を調査した。

## 1. はじめに

マイクロフォンで取得した音情報をもとにして、行動や環境を推定する音のセンシングが注目されている。特に近年、スマートフォンの普及により、多くの人がセンシングに参加することが可能となっている。その例として、歩行者のデバイスを使用して周囲の状況（工事、渋滞等）を推定し、状況確認マップの作成を行う等がある。このとき、計測者からどの程度の距離でイベントが発生したかの等の推定には音量の情報が非常に重要である。

音のセンシングにおいて、計測者の特別な行動を必要とするアクティブな形式ではデバイスを手に持つことで集音部が露出した状態で高品質な集音が可能である。しかし、センシング可能な時間が、計測者の行動が要求に従っているとき限定されるという短所がある。それに対して特別な行動を必要としないパッシブな形式では常時センシング可能であるが、デバイスの格納場所が様々であり、それによって取得情報が変化する。特にスマートフォンが何かに包まれた状態であれば計測される音量が減少し、デバイスを手に持って集音部が露出した状態とは大きく異なる。その結果、状況の推定精度が悪化することが問題となる。これを防ぐために、計測された音量の情報に格納状態に応じた補正をかける必要がある。それには、音量が既知の音に対して、計測される音量がどの程度になるかのキャリブレーションが必要となる。しかし、パッシブな形式の音センシングではキャリブレーション作業は望ましくなく、自動でキャリブレーションを行うことが求められる。

そこで本研究では、音響式信号機を利用したスマートフォン音センシングにおける音量キャリブレーションについて検討・調査する。このキャリブレーションには音発生源の位置と、計測する位置が既知である必要がある。音響式信号機は設置場所が固定されているため、事前に収集可能である。一方で計測位置はスマートフォンのGPSを利用した地図アプリ等を用いることで取得することができる。さらに、屋外の広範囲に設置され、周期的に同じ音を発す

る点で音響式信号機がキャリブレーションに適していると考えた。本稿では、音響式信号機から発せられる音を実際に収集し、キャリブレーションに基づくスマートフォンの格納場所の推定精度の調査に関して述べる。

この音響式信号機を用いたキャリブレーションの手法が確立されれば、スマートフォンを利用した音響センシングの応用範囲がパッシブな形式にまで広がり、より多くの場面で有用な情報を提供できるようになると期待される。

## 2. 関連研究

スマートフォンを用いたアクティブ形式の音響センシング技術について、現状の研究と課題を整理し、音量キャリブレーションや音響センシングにおけるスマートフォンの性能に関する研究を概観する。

スマートフォンを用いたアクティブ形式の音響センシングの研究は多く存在する。R. Dubey[1]や Eunyoung Shim[2]らは、専用の機器を用いずに、スマートフォンのみで騒音レベルを測定し、特定の地域の騒音マップを作成している。彼らの研究は、スマートフォンが常に外にあることを前提としており、スマートフォンを手に持った状態での音の測定を行っている。これに対し、本研究ではスマートフォンが常に手に持たれているわけではない現実の生活環境を考慮し、スマートフォンがポケットやリュックの中に格納されている場合でも音響センシングが可能であることを示すことを目指している。このようなアプローチは、日常生活における音響センシングの精度を向上させ、より広範な応用が期待できる。

また、アクティブ形式の音響センシングの応用例として、Joan Bordoy[3]らは音響エコーを利用してスマートフォンの位置を特定し、マイクの自己校正を行う手法を提案している。この手法により、屋内環境での高精度な位置推定が可能となる。また、Jinbo Zuo[4]らはスマートフォンを用いた騒音マッピングの新たな手法を提案し、通常的手法と比べて低コストで高精度なマッピングである事を示している。さらに、Chen Qiu[5]らは、音響センサを領して室内の位置推定を行うことで、既存のWi-FiやBluetoothに依存せずに高精度な位置推定が可能となる。

音響センシング機器として、スマートフォンは用いられる事が多い[6]が、集音を行う際に音のキャリブレーションが必要となる場合がある。その際に、外部校正マイクの追加[7]や、ノードベースとクラウドソーシングベースの二種類で校正を行う研究[8]、音情報の処理手順に着目し適切なアルゴリズムを用いて校正を行う研究[9]が存在する。[7][8]の研究では、スマートフォンと専用機器との音響測定精度を比較し、同程度の精度を達成することが示されている。しかし、これらの研究においてスマートフ

†大阪府立大学, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

‡大阪公立大学, Osaka Metropolitan University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

ンのみでの音の測定は行われていない。本研究では、スマートフォンのみを用いた音の測定を行い、音情報からスマートフォンの格納場所を推定することを目指している。これにより、専用の校正機器を必要とせず、より容易に音響センシングを行うことが可能となる。

音響センシングにおいて、音の大きさは極めて重要なパラメータとなっている。音量の変動を正確に測定することで音源の位置やその強度を推定することが可能となる。

Ayoub Boumchich[10]らは、スマートフォンを利用した環境音響測定のためのスマートフォンアプリケーションにブラインドキャリブレーション手法を適応することで、測定精度が大幅に向上することを示した。音量の精度が高まることで、騒音源の特定やその影響範囲の評価がより正確に行えるようになる。また、スマートフォンのマイクを用いた音響センシング技術を応用することで、様々な分野での利用が期待されている。

音響センシング技術は、将来的に様々な分野での応用が期待されている。例えば、環境モニタリングにおいては、リアルタイムでの騒音レベルの把握や騒音源の特定が可能となり、都市環境の改善に大きく寄与すると考えられている。また、室内ナビゲーションや位置推定においては、既存の技術と組み合わせる事で更なる精度向上が期待される。

### 3. 音響式信号機の調査

音響式信号機とは、信号機が青になったことを視覚障害者に知らせる為、誘導音を出す装置がついている信号機を指す。音響式信号機は令和5年3月末、全国に21,023基(メロディ式278基、擬音式20,745基)設置されており、約99%が擬音式となっている。設置場所は主に視覚障害者の利用頻度が高い、盲学校、リハビリテーションセンター、役所等の公共施設を含む地域に優先的に設置される。音響式信号機の発する音はメロディ式の2種類(とおりゃんせ、故郷の空)と擬音式(ピヨピヨ、カッコー)となっている[11]。

十字路の交差点には2つか4つの音響式信号機が設置されていることが多い。図1は大阪公立大学中百舌鳥キャンパス中百舌鳥門前の音響式信号機の撮影画像であり、2つの音響式信号機が設置されている様子を示す。この音響式信号機は高い音と低い音が連続して1回ずつ鳴ることを周期的に繰り返す擬音式(カッコー)であり、この音をiPhone13で10回録音した結果、高い音は1180~1191.5Hz、低い音は940~950Hzの周波数成分が安定して大きいことが分かった。また、スマートフォンを手に持ち、集音部が露出している状態で、音響式信号機の直下で10回録音した際の音の大きさは平均47.62 db、標準偏差±2.48 dbであった。高い音と低い音が1回ずつ鳴る1周期では0.7秒、カッコーが鳴り終わってから次の鳴り始めには2.3秒、音が鳴り続ける時間は25秒であった。



図1：十字路における音響式信号機

## 4. 問題設定

スマートフォンは内蔵されているマイクロフォンを利用することで周囲の音を録音し、ストレージに記録することができる。また、位置情報を用いたアプリケーションを利用することでスマートフォンの位置情報を入手することができる。実験を行う際には、スマートフォンは身体のすぐ近く(例：ポケットやリュック等)に格納されており、音やデータ取得中は格納場所が変化しないとする。

音響式信号機は音青信号点滅や赤信号時には音を発せず青信号点灯時に音を発する。また、音響式信号機の設置場所は決まっていることから、音響式信号機の設置場所の位置情報は事前に容易に入手することができる。

本研究では、音響式信号機が発した音とスマートフォンの位置情報、事前に求めた各格納場所における音の減衰式を使用することで、スマートフォンの格納場所を推定する。

## 5. 実験

### 5.1 実験目的

本実験は、音響式信号機の音とスマートフォンの位置情報からスマートフォンの格納場所を推定することを目的として行った。

### 5.2 用語の定義

#### 【1周期】

音響式信号機は周期的に決まった音を繰り返し発している。本実験では周波数の大きい音と小さい音が交互に鳴る音響式信号機を用いた。周波数の大きい音と小さい音が1回ずつ鳴った区間を1周期とする。

#### 【外】

スマートフォンの格納状態の1つとして、手に持っており集音部が露出している状態を外と表現する。

### 5.3 実験環境

本実験では大阪公立大学中百舌鳥キャンパス中百舌鳥門の音響式信号機(図2)から $d=0, 2.9, 4.1, 6.9, 9.8, 10.4$  mの6地点、スマートフォンの格納場所は図3, 4, 5に示すように外、ポケット、リュックの3箇所とした。

信号機の周囲の人間の行動は、信号待ちでの停止状態か、歩行状態に大きく分けられる。その2種類の状態を想定したスマートフォンの格納場所の推定を行った。5.5節では各格納場所における減衰式の導出、5.6節では停止状態を想定した音響式信号機からの距離と音圧から格納場所の推定を行い、5.7節では歩行状態を想定したスマートフォンの移動に伴う音圧の減衰度合いからの格納場所の推定につ

いてそれぞれ述べる。



図 2：測定に使用した音響式信号機



図 3：手に持った状態



図 4：ポケット



図 5：リュック

#### 5.4 減衰式導出

収録される音圧の距離に応じた減衰率を調査した。iPhone13 と Pixel 7 を用いて 6 地点における音響式信号機の音を 10 回ずつ録音し、Audacity を用いて 1 周期分の録音に分割した。1 周期分の録音に対して周波数分析を行い、1 周期に含まれる高音箇所 (1188.0 ~ 1191.5Hz) における最大音圧を抽出した。図 6, 7, 8 は各格納場所で 10 回ずつ録音を行った際の音圧の変化を表している。横軸は音響式信号機からの距離、縦軸は音圧である。

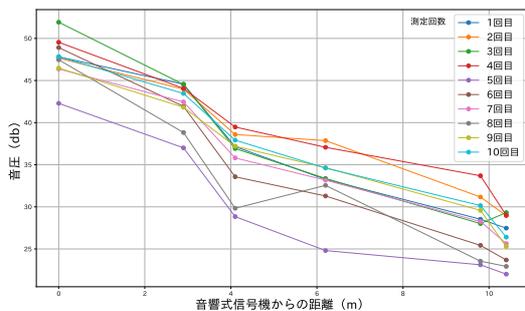


図 6：外における音圧の変化

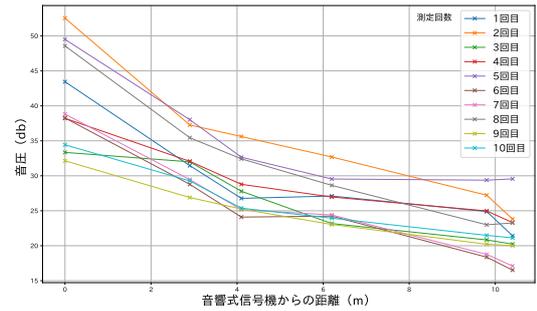


図 7：ポケットにおける音圧の変化

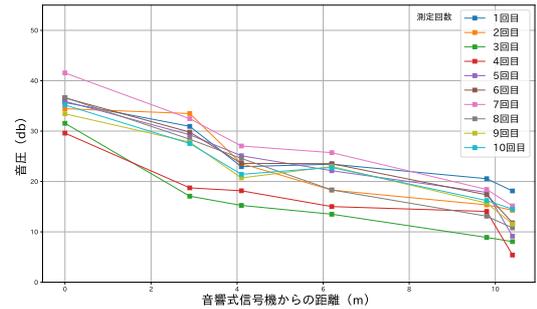


図 8：リュックにおける音圧の変化

各地点、各格納場所における抽出した音圧から指数近似を用いて、外、ポケット、リュックにおける減衰率の近似式を求めた。その結果を式(1), (2), (3)にそれぞれ示し、図 9 で視覚的に表現する。x は音響式信号機からの距離、y は音圧である。

$$y = 47.66 e^{-0.0576 x} \quad (1)$$

$$y = 38.45 e^{-0.0566 x} \quad (2)$$

$$y = 35.38 e^{-0.0960 x} \quad (3)$$

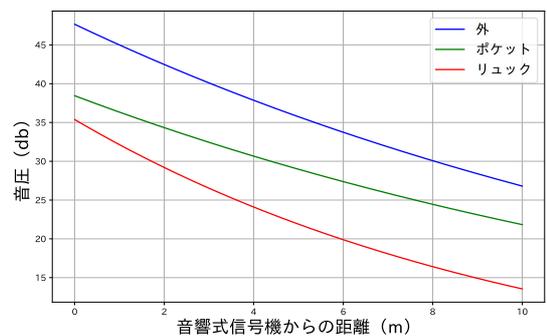


図 9：各格納場所における減衰式

図 9 および式(1), (2), (3)より、スマートフォンが手に持たれている場合とポケットやリュックに格納されている場合とで、音響信号の音圧の減衰量がそれぞれ異なることが確認された。具体的には、スマートフォンを手を持っている状態では音響信号がクリアに取得できる一方で、ポケットやリュックの中に格納されていると音が遮断され、信号強度が低下することがわかった。この現象は、音響信号の伝播特性と遮蔽物の材質・構造に起因するものであり、今後の音響センシング技術の設計において重要な考慮事項となる。

## 5.5 距離と音圧からスマートフォンの格納場所推定

音の減衰は5.4節で求めた減衰式に従うことが予想され減衰式の導出により、一定距離で音を数回取得することでどの程度音が減衰しているか推定可能となった。本節では、格納場所に起因する音の減衰度合の推定により格納場所の推定を行う。この精度が高いと5.4節で導出した減衰式の精度も良いと言える。

格納場所において  $d=0, 2.9, 4.1, 6.9, 9.8, 10.4\text{m}$  の6地点で10回ずつ音響式信号機の音を録音し、減衰式と照らし合わせることで格納場所の推定を行った。具体的には、ある格納場所における、ある地点から3つの録音をランダムで抽出し音圧の平均値を求めた。この値と、3つの減衰式から求まる先ほど抽出した地点における音圧と比較し、最も値に近い格納場所を正解の格納場所とした。また、実際に位置情報を取得する際に誤差が発生する可能性があることを考慮し、各距離には平均が0、標準偏差が0.5の正規分布からなるランダムな値を追加した。それぞれの地点、格納場所において10回ずつ音の取得を行い、正解率を求めた(表1)。

表1：距離と音圧から推定を行った結果

d(m)	正解率(%)		
	外	ポケット	リュック
0.0	100	80	90
2.9	100	80	60
4.1	80	60	100
6.2	90	100	90
9.8	100	100	100
10.4	100	90	100
全体の推定率	95	85	90

表1より、距離2.9mでのリュック、距離4.1mでのポケットで正解率60%と最低値になっているものの、他は正解率80%以上となった。ある地点におけるスマートフォンの位置情報と音響式信号機の音をスマートフォンで取得することで、格納場所をある程度高い精度で推定することが分かる。誤差を含めた距離を用いて推定を行っていることから、位置情報のある程度のズレが発生しても高い推定精度を保つことが分かる。よって、音響式信号機周辺での静止時において、減衰式(1), (2), (3)は本実験で設定した3種の格納状態の判別に対して有効であることが分かった。

## 5.6 音圧の減衰からスマートフォンの格納場所推定

歩行状態では位置情報が変わっていき、音響信号の強度も変化していく。格納場所によって音量の変化は異なることから、5.4節で導出した減衰式と比較することで格納場所の推定を行う。

格納場所を固定し、 $d=0, 2.9, 4.1, 6.9, 9.8, 10.4\text{m}$ の距離毎に音圧をランダムで抽出し、3つの減衰式より求まる同距離における音圧とのMSE(平均二乗誤差)をそれぞれ計算した。6つの地点から連続した3つの地点をランダムで選択し、MSEの平均値を求めた。他の格納場所でも同様にMSEの平均値を求め、最もMSEが小さい格納場所を正解の格納場所とした。以上の操作を10回行い、正解率を求めた(表2)。

表2：音圧の減衰から推定を行った結果

格納場所	正解率 (%)
外	100
ポケット	90
リュック	90

表2より、いずれかの格納場所に対しても正解率90%以上となり、位置が徐々に変化する歩行状態においてもスマートフォンの格納場所は高い精度で推定が可能であることが分かる。よって、歩行状態でも、減衰式(1), (2), (3)は有用であることが分かった。

## 6. 結果と考察

2種類の実験方法ではどちらも式(1), (2), (3)の各格納場所における減衰式を利用して推定精度を求めた。どちらの推定精度も高かったことから、ある程度正確な減衰式と考えることが出来る。しかし、各減衰式における指数の定数の値が異なっている。本稿では3箇所の格納場所における減衰式しか求めていないことから、定数箇所の値の変化については今後の課題となる。

また、実験結果のばらつきについて考察する。スマートフォンの位置や周囲環境の変動、音源との距離などが、音響信号の取得精度に影響を与える要因であることが明らかになった。例えば、スマートフォンがリュックの底に位置している場合と上部に位置している場合とでは、取得される音響信号の強度や特性が異なる。このようなばらつきを減少させるためには、音響信号の事前処理や補正手法の改良が必要である。

## 7. まとめ

本稿では、音響式信号機の音を用いてスマートフォンの格納場所の推定を2種類の方法で行った。どちらの方法においても85%以上の高い推定精度を確認することができ、各格納場所における音の減衰式も求めることができた。本稿ではスマートフォンの格納場所は外、ポケット、リュックの3箇所だったが、今後の研究では格納場所の増加を予定している。

最後に、本研究の限界と今後の課題について述べる。今回の実験では、特定の環境下でのデータを使用して評価を行ったが、実際の利用環境は多岐にわたるため、さらに多様な環境での検証が求められる。また、スマートフォンの機種や音響センサの性能による違いも考慮する必要がある。将来的には、リアルタイムでの音響信号処理を可能にし、実環境での適用を目指したシステムの開発が期待される。

## 参考文献

[1] Rakesh Dubey, Shruti Bharadwaj, MD Iltaf Zafar, Vinamra Bhushan Sharma, Susham Biswas. "COLLABORATIVE NOISE MAPPING USING SMARTPHONE". Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B4-2020, 253-260

[2] Eunyoung Shim, Dohyeong Kim, Hyekyung Woo, Yoongha Cho. "Designing a Sustainable Noise Mapping Sys-

stem Based on Citizen Scientists Smartphone Sensor Data”. PLoS One. 2016.

[3] Joan Bordoy, Christian Schindelbauer, Fabian Höflinger. “Exploiting Acoustic Echoes for Smartphone Localization and Microphone Self-Calibration”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020, volume 69, Issue 4, p 1484-1492.

[4] Jinbo Zuo, Hao Xia, Shuo Liu, Yanyou Qiao. “Mapping Urban Environmental Noise Using Smartphones”. Sensors 2016, 16(10), 1692; <https://doi.org/10.3390/s16101692>

[5] Chen Qiu, Matt W. Mutka. “Silent whistle: Effective indoor positioning with assistance from acoustic sensing on smartphones”. 2017 IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2017, 10.1109/WoWMoM.2017.7974312

[6] Daniel R Nast, William S Speer, Colleen G Le Prell. “Sound level measurements using smartphone “apps”: useful or inaccurate?”. 2014, DOI: 10.4103/1463-1741.140495.

[7] Chucric A. Kardous, Peter B. Shaw. “Evaluation of smartphone sound measurement applications (*apps*) using external microphones—A follow-up study”. J Acoust Soc Am. 2016.

[8] Yanmin Zhu, Juan Li, Lubin Liu, Chen-Khong Tham. “iCal: Intervention-free Calibration for Measuring Noise with Smartphones”. 2015 IEEE 21st International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). 2015, pp. 85-91.

[9] Willian Zamora, Carlos T. Calafate, Juan-Carlos Cano, Pietro Manzoni. “Accurate Ambient Noise Assessment Using Smartphones”. Sensors(Basel), 2017, doi: 10.3390/s17040917.

[10] Ayoub Boumchich, Judicael Picaut, Pierre Aumond, Arnaud Can, Erwan Bocher. “Blind Calibration of Environmental Acoustics Measurements Using Smartphones”. Sensors 2024, 24(4), 1255; <https://doi.org/10.3390/s24041255>

[11] 交通局. “音響信号機に関する Q&A”. 警察庁. <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/seibi2/annzen-shisetu/hyoushiki-shingouki/onkyou.html>. (参照 2024-07-22)