

狭空間におけるスピーカー・マイクロホンアレイを複数用いた人の位置・姿勢の音響計測の検討

Acoustic measurement of human position and posture using multiple speakers and microphone arrays

工藤康一郎^{1*} 干場功太郎¹ 岩附信行¹
Koichiro Kudo¹ Kotaro Hoshiba¹ Nobuyuki Iwatsuki¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

Abstract: トイレや浴室といった狭空間における室内残響を考慮した人の状態推定について、これまで、スピーカーとマイクロホンアレイを用い、MUSIC (MUltiple Signal Classification) 法に基づき、狭空間内の残響をマッピングし、その変化で推定を行う手法を提案した。しかし、計測系の狭い指向性により、一次反射成分の強い床面や便器といった箇所に分布が偏るという問題が判明した。本稿では、スピーカーとマイクロホンアレイの増設、および配置の工夫によって指向性の改善を試みることでこの問題に取り組んだ。トイレを模した実験室において、様々な状況で測定を行い、得られたマッピング結果を比較することで最適な実験配置の評価を行った。

1 はじめに

近年の高齢化社会の進行に伴い、高齢者家庭や介護施設において転倒事故が多発している [1]。こうした事故は迅速に検知し対応する必要がある、そのための転倒検知モニタリングの重要性が高まっている。高齢者転倒事故の半数以上が住宅等居住場所で発生している点 [2]、常時モニタリングを行うには人力では負担が大きい点を考慮すると、自動的にモニタリングを行うことが望ましい。リビングや廊下等の通常の生活空間での転倒検知には、監視カメラの画像情報から人を認識し分類することで検知する手法 [3]、ウェアラブル端末の加速度センサを利用する手法、天井に設置した温度センサで床面積に占める人部分の割合を測定することで検知する手法 [4]、等を利用することができる。しかし、トイレや浴室といった空間では、プライバシーの観点からカメラの設置は難しく、ウェアラブル端末を着用したままトイレや浴室を利用することは負担となりうる。温度センサによる測定についても、トイレや浴室では人の出入りや使用状況により温度変化が激しく、精度の劣化が見込まれる。以上の理由から、これらの手法はこのような空間に適用するのが難しい。そこで、このような空間でのモニタリング・転倒検知手法として、音響信号を用いることに着目した。

音響信号による人のモニタリング・転倒検知には、こ

れまで幾つかの手法が提案されている。Li らは転倒音の定位と識別により転倒検知する手法 [5]、Alanwar らはスマートスピーカーから計測音を照射し、人からの反射波の解析により在室状態を検知する手法 [6]、川部らは壁面に設置したスピーカーから計測音を照射し、部屋の音響モードから人の位置を推定する手法 [7] を提案している。しかし、これらの手法では、トイレや浴室といった狭空間で発生する残響の影響で精度が低下する可能性や、限定された場所のみでしか計測できないといった問題がある。本研究ではこれらの課題のうち、特に残響下での精度低下の問題に取り組むこととした。残響の音響信号処理には、Atmoko らの一般化相互相関法 [8]、Liu らの残響のモデル化 [9]、Birnie らの残響自体を推定に用いる手法 [10] などが提案されているが、狭空間での適用には複雑な残響への対応が難しいといった課題が残っている。

これらの問題を解決するため、狭空間での残響そのものを利用した人の状態モニタリングについて提案し、検証実験により、提案手法の性能について基礎検討を行った [11]。提案手法では、スピーカーから信号を照射し、複数のマイクロホンアレイを用いて、MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) 法 [12] に基づき空間内の残響源のマッピングを行う。これまでの報告からは、空間内の状況や時間経過に伴い、得られる残響マップが変化することがわかった。しかし、一次反射成分の強い床面や便器といった箇所の分布が支配的になる問題があり、その原因として計測系の機器が持つ指向

*連絡先：東京工業大学 工学院 機械系
〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 11-27
E-mail:kudo.k.ad@m.titech.ac.jp

性が考えられた。

本稿では、スピーカーとマイクロホンアレイの増設によって指向性の改善を試みることでこの問題に取り組んだ。スピーカーを1台から3台、マイクロホンアレイを2台から4台に増やすことで指向性を広くし、残響源の分布の偏りの軽減を図る。また、スピーカー、マイクロホンアレイの配置による分布の変化についても検討を行う。トイレを模した実験環境で検証実験を行い、その性能の評価を行った。

2 提案手法

2.1 残響マッピング手法

人の状態モニタリング手法として、狭空間で発生する残響を利用した手法を提案した [11]。本手法では、まずスピーカーから信号を照射し、複数のマイクロホンアレイで室内で発生する反射波および残響を収録する。各マイクロホンアレイで収録された残響信号に対して音源定位を行い、それらを統合することで空間内の残響マッピングを行う。これは、異なる位置のマイクロホンアレイによる測定のマッピング結果を統合し、壁面の騒音源の位置を特定する Castellini らの手法 [13] に着想を得たものである。本手法のコンセプト図を図1に示す。スピーカーから照射された信号は、様々な反射経路を經由し、各マイクロホンアレイに入射する(図1(a))。このとき、各マイクロホンアレイはそれぞれの位置に応じた残響信号を収録する。室内で収録される信号は、

$$h_{rec} = h_{dir} + h_{ref} + h_{rev} + n \quad (1)$$

のようにモデル化できる。ここで、 h_{rec} はマイクロホンによる測定信号、 h_{dir} はスピーカーから直接マイクロホンに入射する直接波、 h_{ref} は任意の場所での1回だけの反射でマイクロホンに到達する一次反射信号、 h_{rev} は残響信号、 n はノイズである。本手法では、残響信号 h_{rev} に対して音源定位を行うことで残響信号の到来方向を推定し、その分布を把握する。このようにして得られた定位情報を図1(b)のように統合することで、どの位置からの残響が強いのかといった情報をマッピングすることができる。この残響マップやその変化から、狭空間内の人の位置や姿勢といった状態を推定する。

音源定位手法には MUSIC 法 [12] を用い、各マイクロホンアレイにおいて空間スペクトルを算出し、統合する。アルゴリズムを以下に示す。

i 番目のマイクロホンアレイにて得られた M チャンネル入力音響信号の f フレーム目をフーリエ変換して得られる $Z_i(\omega, f)$ から、以下のように相関行列 $R_i(\omega)$

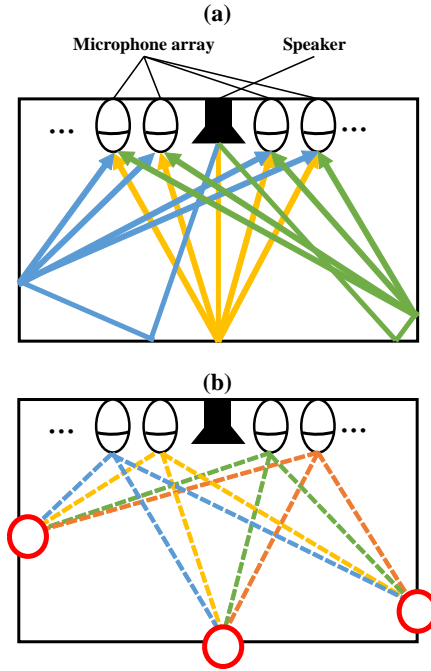


図1: 提案手法のコンセプト図。(a) スピーカーから照射された信号の伝搬の様子、(b) 音源定位結果の統合による残響マッピング。

を得る。

$$R_i(\omega) = \frac{1}{f_2 - f_1 + 1} \sum_{f=f_1}^{f_2} Z(\omega, f) Z^*(\omega, f) \quad (2)$$

ここで、 ω は周波数ビンのインデックス、 f_1, f_2 は使用するフレームの開始と終了に対応したインデックス、 Z^* は Z の共役転置である。得られた $R_i(\omega)$ を固有値展開して固有ベクトルを計算する。

$$R_i(\omega) = E_i(\omega) \Lambda_i(\omega) E_i^*(\omega) \quad (3)$$

$\Lambda_i(\omega)$ は降順に並べた固有値を対角成分に持つ行列、 $E_i(\omega)$ は $\Lambda_i(\omega)$ に対応する固有ベクトルである。これと、マイクロホンアレイ座標系での方向 ψ に対応した伝達関数 $G(\omega, \psi)$ を用いて、空間スペクトル $P_i(\omega, \psi)$ を計算する。

$$P_i(\omega, \psi) = \frac{|G^*(\omega, \psi) G(\omega, \psi)|}{\sum_{m=L+1}^M |G^*(\omega, \psi) e_{i,m}(\omega, \psi)|} \quad (4)$$

ただし、 L は目的音源数、 $e_{i,m}$ は E_i に含まれる m 番目の固有ベクトルを表す。こうして得られた $P_i(\omega, \psi)$ を周波数 ω 方向に平均し、 $\bar{P}_i(\psi)$ を得る。

$$\bar{P}_i(\psi) = \frac{1}{\omega_H - \omega_L + 1} \sum_{\omega=\omega_L}^{\omega_H} P_i(\omega, \psi) \quad (5)$$

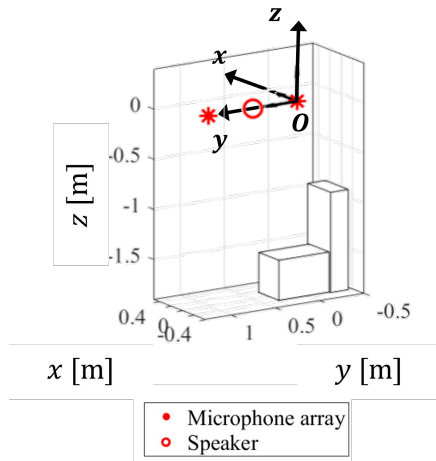


図 2: これまでの実験配置. スピーカーの座標は $(x,y,z)=(0 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, 0 \text{ m})$, マイクロホンアレイの座標は $(x,y,z)=(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(0 \text{ m}, 1 \text{ m}, 0 \text{ m})$.

なお, ω_H, ω_L は使用する周波数ビンの上限と下限に対応したインデックスである. 得られた空間スペクトル $\bar{P}_i(\psi)$ を, 三次元座標 $w = (x, y, z)$ に投影し, $\bar{P}_i(w)$ へと座標変換を行う. これらを I 個のマイクロホンアレイに対して算出し, 空間スペクトルを足し合わせて合成空間スペクトル $\bar{P}_{sum}(w)$ を得る.

$$\bar{P}_{sum}(w) = \sum_{i=1}^I \bar{P}_i(w) \quad (6)$$

得られた合成空間スペクトルは, 各位置から到来する信号の強度を表しており, これにより空間内の残響源をマッピングすることができる.

2.2 問題点と解決法

これまでの報告 [11] では, 基礎的な検証を行うため, トイレを模した狭空間実験室で, 図 2 のように 1 台のスピーカーと 2 台のマイクロホンアレイを設置して実験を行った. 実験室の寸法は $0.9 \times 1.8 \times 1.9 \text{ m}$ となっており, 上部は開放されている. スピーカーには Bang&Olufsen 社製の Beosound A1 (図 3(a)), マイクロホンアレイにはシステムインフロンティア社製の 8ch マイクロホンアレイ TAMAGO (図 3(b)) を使用した. 基礎検証の結果, 一次反射成分の強い床面や便器といった箇所の分布が支配的になる問題が判明した. この問題の原因のひとつとして, スピーカーの狭い指向性によって残響の到来方向が限られてしまっていることや, 式 (6) において空間スペクトルを加算する際のマイクロホンアレイの個数が少ないために得られる残響マップもマイクロホンアレイの位置に偏った結果になっていること

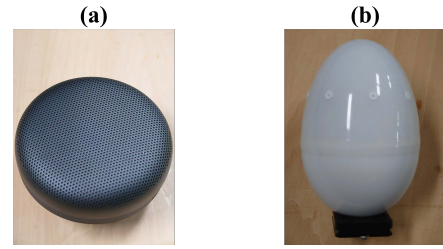


図 3: 実験にて使用した機器. (a) スピーカー (Beosound A1), (b) 8ch マイクロホンアレイ (TAMAGO).

表 1: 各実験配置における各スピーカー, マイクロホンアレイの y 座標の値 [m]. 位置. (a)~(d) は図 5 の (a)~(d) に対応.

Device · Arrangement	(a)	(b)	(c)	(d)
Speaker 01	0.5	0.75	1	1.2
Speaker 02	-	0.5	0.5	0.5
Speaker 03	-	0.25	0	-0.25
Microphone Array 01	1.1	1.21	1.21	1
Microphone Array 02	0.8	1	0.75	0.75
Microphone Array 03	0.2	0	0.25	0.25
Microphone Array 04	-0.1	-0.25	-0.25	0

が考えられる. そこで, スピーカーとマイクロホンアレイを増設することで, 照射される信号の指向性や空間スペクトルの偏りを解決することを試みた.

3 検証実験

3.1 実験環境の改良

本稿においても, これまでの報告 [11] と同様に, トイレを模した実験環境にて, 計測用信号を照射するスピーカーと室内残響を収録するマイクロホンアレイからなる計測系で検証を行った. 実験環境の寸法を図 4 に示す. 判明した問題点を踏まえ, スピーカーとマイクロホンアレイの台数を増やした実験を行い, マッピング結果の変化を検討する. 測定機器は図 3 に示したものを引き続き使用し, スピーカー 1 台あるいは 3 台とマイクロホンアレイ 4 台を室内で対称的になるように 4 通りに配置し実験を行った.

4 通りの実験配置を図 5 に示す. 各スピーカー, マイクロホンアレイは, y 軸と一致する位置に設置したポールに沿って配置しているため, 各機器の x 座標, z 座標はすべて 0 である. 各機器の y 座標の値は表 1 に示す.

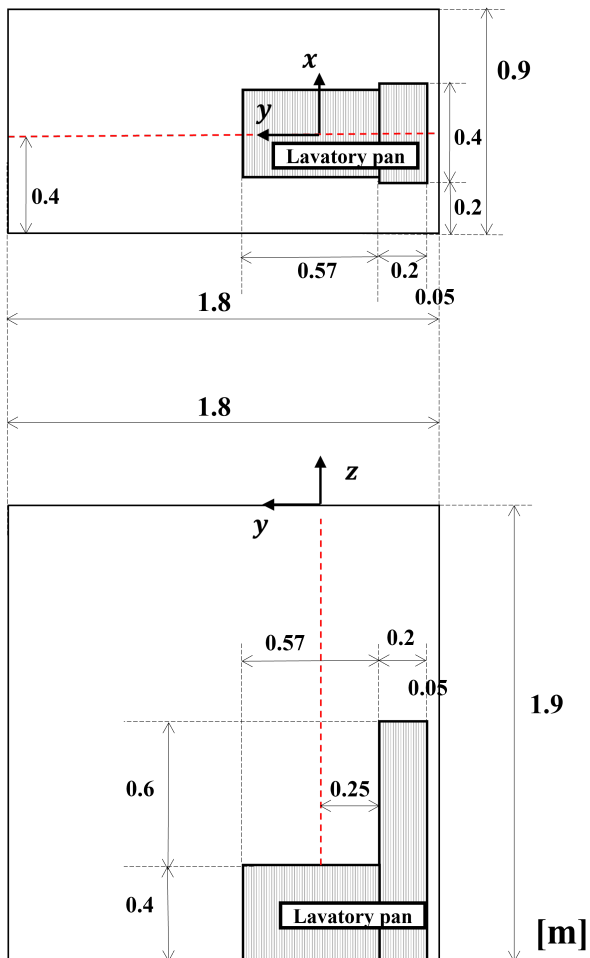


図 4: 実験環境の寸法.

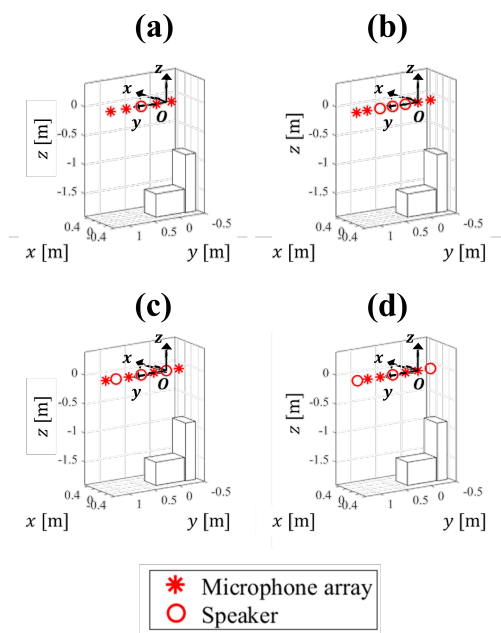


図 5: 4通りの実験配置.

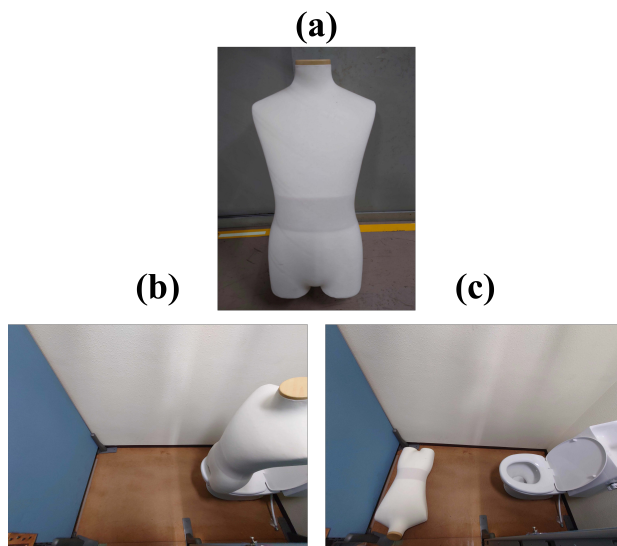


図 6: 実験時のトルソーの配置. (a) 使用したトルソー, (b) 着席模擬時の配置, (c) 転倒模擬時の配置.

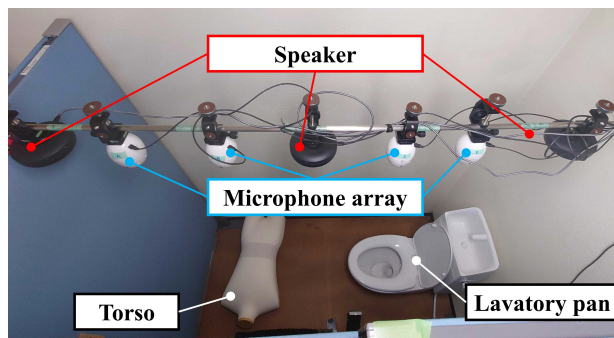


図 7: 転倒模擬時の実験状況の一例. 実験配置は図 5(d).

スピーカーから照射する信号には 0-8 kHz のチャープ信号を用いた. 各マイクロホンアレイでは, サンプリング周波数 16 kHz, 量子化ビット数 24 bit で音響信号が収録される. 収録された信号に対し, 音源信号の畳み込みによるパルス圧縮を行い, インパルス応答を得る. このインパルス信号に対し提案手法を適用し, 解析を行った. 式 (4) における伝達関数 G は, 幾何計算により 1 deg. 刻みで算出したものを用いた. 部屋内部の状況に応じた残響マップの変化を観察するため, 人の代替ターゲットとして, 幅 0.3 m × 高さ 0.7 m × 奥行 0.2 m のトルソー (図 6(a)) を空間内に配置した. 空間内に便器のみがある空室時, 便器座面上にトルソーを配置した着席模擬時 (図 6(b)), 床面にトルソーを配置した転倒模擬時 (図 6(c)) の 3 つの室内状況を設定し, 音響信号を収録した. 実験状況の一例を図 7 に示す. それぞれの状態では 11 回の計測, 解析を行い, 外れ値を含む結果を除いた残響マップを平均化し評価を行った.

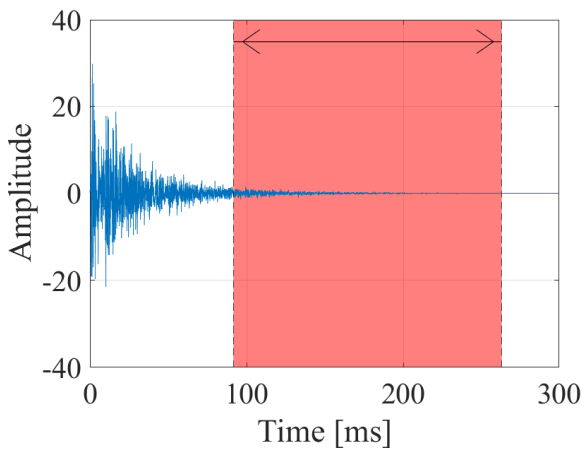


図 8: 得られたインパルス応答. 赤い範囲が解析区間である.

3.2 実験結果

計測信号のパルス圧縮によって得られたインパルス応答の一例を図 8 に示す. 0 ms 付近に見られるピークがスピーカーからマイクロホンに直接到達した直接波 h_{dir} であり, 10 ms 付近で床面からの一次反射 h_{ref} が到達, その後残響 h_{rev} が続いている.

残響のマッピングを行うため, 得られたインパルス応答に対し, 残響成分のみが観察できる区間を解析区間として設定する必要がある. これまでの報告から, 直接音と一次反射の影響が残る区間で解析を行うと, これらの影響により残響の観測が難しくなるという問題点が判明している. そこで, 直接波と一次反射の減衰を考慮し, 解析区間を直接波到来から 90~260 ms とした (図 8). MUSIC 法における解析周波数については, 予備実験により得られた空間スペクトルの平均値から, $\omega_L = 500$ Hz, $\omega_H = 1000$ Hz の範囲とした. 周波数領域を低周波域に限定することで, 直進性の強い高周波域における局所ピークの発生を低減できる.

残響マッピングの結果を図 9 に示す. マッピングの座標系は図 5 に示したものと等しく, 図 5 における奥側の 2 壁面, 及び底面のマッピングを行った. (a)~(d) は図 5 の実験配置 (a)~(d) に対応した結果, (e) は図 2 の実験配置の結果である. また, (i) は空室時, (ii) は着席模擬時, (iii) は転倒模擬時の結果である. カラーマップにて各位置から到来する信号の強度を示している. 提案手法ではマイクロホンアレイ毎の空間スペクトルを加算してマップを作成しているが, (a)~(d) と (e) ではマイクロホンアレイの数が異なり, 加算した場合に絶対値での比較に影響が出るため, マイクロホンアレイの個数に応じた補正倍率を乗算している.

これまでの報告で判明した残響マップの傾向は, (i) 空室時は底面全域で強度の高い分布, (ii) 着席模擬時は

トルソーにより残響が吸収され便器側の強度が低下することで相対的に床面側で強度が増加, (iii) 転倒模擬時はトルソーによる吸収で床面側の成分が低下, 便器側が相対的に強く観測されるが, 全体としての強度は低下, といったものだった.

本稿ではマイクロホンアレイを 2 つから 4 つに増やしているため, 誤った位置で空間スペクトルが強め合うこと (エイリアス) が低減し, より正しい残響マップになったと考えられる.

それぞれの結果について観察する. スピーカーの数はそのままにマイクロホンアレイ数を増やした (a) では, (e) と近い傾向が観測されたが, 床面側の分布の強度が低下している. これは, スピーカーの位置が (e) と同じであり, 得られる残響場も (e) に近くなるが, エイリアスが低減されたことで全体の強度が低下したと考えられる. しかし, 照射する信号の指向性は改善されていないため, 得られる残響源は偏ってしまう.

中心にスピーカーを増やした (b) では, 音源中心の位置は変えず, 照射レベルを上げる配置である. 結果, 従来傾向を強調したような分布となった. 床面側の分布強度が大きくなっていることが分布形状における (e) との差異である. 本実験環境では, 部屋の上部から信号を照射, 収録しているため, 差異が出やすいのは側面側よりも底面側である. そのため, 照射レベルが上がった本配置において, 従来と近い傾向を示しつつ, 床面側で状況毎の差異が強調されるのは予想通りといえる.

スピーカーとマイクロホンアレイが交互に配置された (c) では, 従来傾向には沿っているが, 空室時の分布が便器側に偏っており, 着席模擬時に床面側で強い分布, 転倒模擬時に再度便器側で強い分布, という結果だった. 便器側の残響分布の影響が強まっていることから, (a), (b) や (e) と比べ, 照射する信号の指向性が広くなり, 残響が全体に広がるような配置となったことが反映された結果であるといえる.

スピーカーを両端と中心に配置した (d) では, 最も照射する信号の指向性が広いため, どの状況でも残響が全域で満遍なく観察されると予想されたが, それに反して状況毎の差異が大きいマッピング結果となった. 特に, 着席模擬時にトルソーの影響による相対的な床面側の強調の効果が非常に強い. 理由としては, 指向性の改善による影響について, 残響が全域に広がって均一化される効果よりも, 残響が発生する範囲の増加によって状況毎の差異が検出しやすくなる効果の方が強くなっており, 差異が際立ったのではないかと考えられる.

以上のように, 残響マッピング結果からは, スピーカーとマイクロホンアレイの増設はその位置に応じたマッピング結果の変化をもたらすことが観察でき, 指向性の改善についても分布形状からその効果を確認す

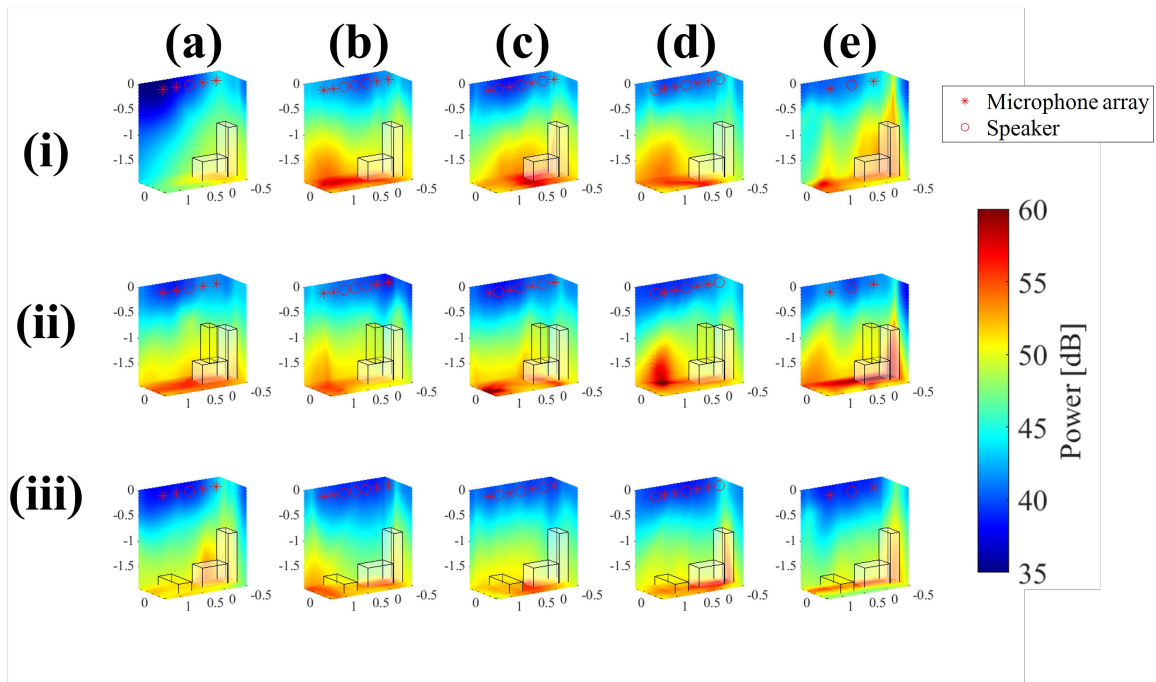


図 9: 得られた残響マップ. (a)~(d) は図 5 の実験配置 (a)~(d), (e) は図 2 の実験配置に対応した結果である. (i) 空室時, (ii) 着席模擬時, (iii) 転倒模擬時.

ることができた.

4 考察

得られた残響マッピング結果について考察する. 前章により, スピーカーおよびマイクロホンアレイ増設の効果を確認できたため, 本章では図 9(b)~(d) の比較を行う. 室内状況を区別する性能を測るために, 着席模擬時, 及び転倒模擬時に対し, 空室時との残響マップの差分を指標として評価する. 前述の通り, 今回の実験配置では状況毎の差異は底面に出やすく, 壁面側には観測されづらいため, 評価には底面側の差分のみを算出した. 図 10 に算出した差分を示す. (b)~(d) は図 5 の実験配置 (b)~(d) に対応した結果である. また, (ii)-(i) は着席模擬時と空室時の, (iii)-(i) は転倒模擬時と空室時の差分である. カラーマップにて差分の強度を表している. 単純な差分であるため, 残響分布の強度が全体的に低下していた場合に, 分布傾向が強調されていない場合もあるが, (d) の場合, (ii)-(i) では便器側のトルソーによる成分低下と床面側の相対的な上昇, (iii)-(i) では床面側のトルソーによる成分低下と便器側の相対的な上昇をどちらも抽出できている. 以上から, 差分においては (d) がもっとも良い結果であるといえる.

MUSIC スペクトルの差分を統計的な指標で評価する. 図 10 に示した残響マップの差分のヒストグラムを

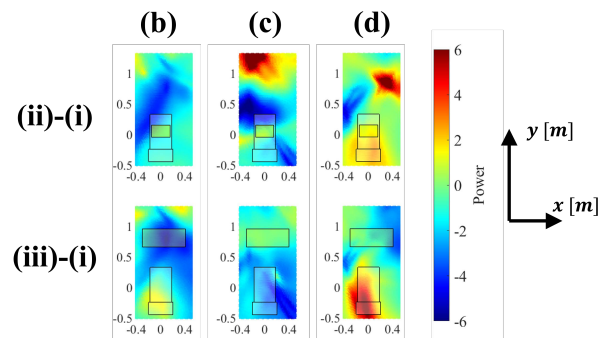


図 10: 底面の残響マップの差分. (b)~(d) は図 5 の実験配置 (b)~(d) に対応. (ii)-(i) 着席模擬時と空室時の差分, (iii)-(i) 転倒模擬時と空室時の差分.

図 11 に示す. (b)~(d) は図 5 の実験配置 (b)~(d) に対応した結果である. また, (ii)-(i) は着席模擬時と空室時の差分, (iii)-(i) 転倒模擬時と空室時の差分に対するヒストグラムである. 横軸は差分の強度, 縦軸は強度である. さらに, 得られたヒストグラムのパラメータを図 12 に示す. (A) は差分の絶対値の平均値, (B) が標準偏差, (C) が尖度, (D) が歪度である. (A) の差分の絶対値の平均は, 全体的な差異の大きさを評価することができる. この結果は, スピーカー間の距離が離れるにつれ差分の値が低下していく傾向を概ね示しているといえる. これはスピーカーの距離が離れてい

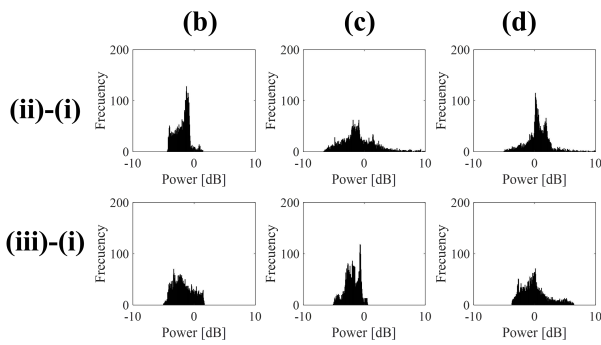


図 11: 残響マップの差分のヒストグラム. (b)~(d) は図 5 の実験配置 (b)~(d) に対応. (ii)-(i) 着席模擬時と空室時の差分, (iii)-(i) 転倒模擬時と空室時の差分.

るほど指向性が改善され、様々な方向から残響が到来することで室内状況の差異が場所により偏りにくくなることを意味する。トルソーが配置されていない部分では、ランダムな残響がどの状況でもある程度到来するために差異が均されるはずであり、配置と指向性改善の関係に沿った結果であるといえ、改善の効果が確認できた。(B)の標準偏差は、差分のばらつきを示すため、正と負の差分がある(c)の(ii)-(i)と(d)で大きな値を示した。状況毎の差分はある程度高い値で、かつばらつきがあることが望ましいため、どちらの差分でも高い値を示した(d)が有利であると考えられる。(C)の尖度は、どちらの差分でも(b)<(c)<(d)となった。これは差異が少ない部分がどれだけ多いかを意味し、(A)から観察された指向性改善に伴う差が均される効果をこちらでも確認できる。(D)の歪度と併せて考慮すると、(b)は差分の分布が一部に集中しており室内状況の判別が難しく、(c)、(d)は差分の分布が広く、かつふたつの差分で違った傾向を示している為判別しやすいといえる。

以上の結果から、前回の課題である指向性を改善するとともに、状況判別を残響マップの差分によって行う上で最も有利なのは(d)の配置である、と結論付けた。今後の課題として、壁沿いに人が立っているなどの壁面側に人の影響が出ると思われるであろう状況の評価や、マッピング結果を解析的に位置と対応させることで状況推定の精度向上や位置推定につなげることが挙げられる。

5 結論

本稿では、残響の影響が強いトイレなどの狭空間における人の状態モニタリングを目的とし、空間内残響マッピングによって人の状態推定を行う手法の改良を行った。スピーカーとマイクロホンアレイを増設する

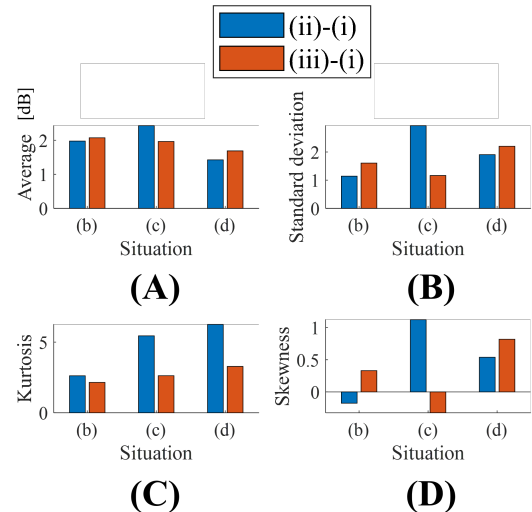


図 12: 図 11 の統計量を比較するグラフ. (b)~(d) は配置 (b)~(d) に対応しており, (ii)-(i) 着席模擬時と空室時の差分, (iii)-(i) 転倒模擬時と空室時の差分. 残響マップの各点における MUSIC スペクトルの差分の (A) 絶対値の平均値, (B) 標準偏差, (C) 尖度, (D) 歪度

ことで指向性を改善し、残響マッピングの精度の向上を試みた。検証実験の結果、スピーカーやマイクロホンアレイの配置の変更によるマッピング結果の差異やその特性を観察することができ、指向性の改善についても効果が確認された。マッピング結果の差分を用いた評価からは、3台のスピーカー、4台のマイクロホンアレイを用いた場合の最適な配置が明らかになった。今後は、室内状況のパリエーションを増やし、マッピング結果との対応関係をより明確化していくとともに、実際の室内状況推定を実施するための分類手法を模索していく。

参考文献

- [1] 公益財団法人介護労働安定センター: "「介護サービスの利用に係る 事故の防止に関する調査研究事業」報告書", https://www.kaigo-center.or.jp/report/pdf/h30_kaigojiko_houkoku_20180402.pdf
- [2] 東京消防庁: "救急搬送データからみる高齢者の事故", <https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/lfe/topics/nichijou/kkhansoudeta.html>
- [3] M. Yu, A. Rhuma, S. M. Naqvi, L. Wang and J. Chambers: "A Posture Recognition-Based Fall Detection System for Monitoring an Elderly Person in a Smart Home Environment", IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 16, no. 6, pp. 1274–1286, 2012.

- [4] Y. Ogawa, K. Naito: "Fall detection scheme based on temperature distribution with IR array sensor", Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 1-5, 2020.
- [5] L. Yun, K. C. Ho, M. Popescu: "A microphone array system for automatic fall detection", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, pp. 1291-1301, 2012.
- [6] A. Alanwar, B. Balaji, Y. Tian, S. Yang, M. Srivastava: "EchoSafe: Sonar-based verifiable interaction with intelligent digital agents", Proceedings of the 1st ACM Workshop on the Internet of Safe Things, pp. 38-43, 2017.
- [7] 川部, 和田, 中村: "浴室における人の有無などの検知 - 音響特性の計測による室内状態の検知 (IV) -", 日本音響学会 2021 年春季研究発表会講演論文集, pp. 581-582, 2021.
- [8] H. Atmoko, D. C. Tan, G. Y. Tian, B. Fazenda: "Accurate sound source localization in a reverberant environment using multiple acoustic sensors", Measurement Science and Technology, vol. 19, no. 2, pp. 1-10, 2008.
- [9] Z. Liu, R. Chen, F. Ye, G. Guo, Z. Li, L. Qian: "Improved TOA estimation method for acoustic ranging in a reverberant environment", IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 6, pp. 4844-4852, 2022.
- [10] L. I. Birnie, T. D. Abhayapala, P. N. Samarasinghe: "Reflection Assisted Sound Source Localization Through a Harmonic Domain MUSIC Framework", IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 28, pp. 279-293, 2020.
- [11] 工藤, 干場, 岩附: "複数のマイクロホンアレイを用いた狭空間における人の位置・姿勢の音響計測に関する基礎検討", 第 41 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, RSJ2023AC1D3-04, 2023.
- [12] R. O. Schmidt: "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, 1986.
- [13] P. Castellini, A. Sassaroli, A. Paonessa, A. Peiffer, A. Roeder: "Average beamforming in reverberant fields: Application on helicopter and airplane cockpits", Applied Acoustics, vol. 74, issue 1, pp.198-210, 2013.