

気導音と骨導音の併用による音像定位を活用した方向認知精度の向上 Improvement of Direction Recognition Accuracy using Sound Image Localization by Combining Air-Conducted and Bone-Conducted Sound

精密工学専攻 17号 小澤 風太
Futa Ozawa

1. はじめに

現在の空間内の情報提示には主に視覚や音声を用いられるが、これらの方法では常に様々な情報が提示される自動車車室内や医療現場において情報の直感的な方向認知が難しい。そこで音像定位技術を活用し、耳を覆わない再生機器により環境音に加えて音源の方向を知覚させることで、聴覚のみによる方向指示を目指す。しかし、耳を覆わない再生機器の音像定位精度は、耳を覆うヘッドホン等に対して劣ることが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

ここでは、耳を覆わずに自動車車室内で運転手のみに音源を提示できるヘッドレスト等の頭部後方至近に設置する2chスピーカ(以下、頭部スピーカ)の気導音と、耳を覆わない骨導イヤホンの骨導音に着目し、単体の場合とこれらを併用する場合で方向認知精度の向上を図る。

そこで本研究では、まず耳を塞がない再生機器の特性を補正し、再生機器が音像定位において有効となる音域を特定、方向認知精度の向上に有効な信号処理の手法を検討する。これにより、耳を覆わない再生機器単体での方向認知精度を把握する。さらに、気導音と骨導音の併用について各再生機器の再生周波数域が重なる場合と重ならない場合について、音像定位に有効な再生周波数域の棲み分け方法を把握する。

頭部スピーカによる音源の提示はFig. 1に示す受聴者の頭部後方の至近距離に左右対称に設置した2chのスピーカ⁽²⁾を用い、ヘッドホン⁽¹⁾を使用することで気導音の伝達経路が異なる場合と方向認知精度を比較する。また、骨導音の提示には骨導イヤホン⁽¹⁾を用いる。

音源にダミーヘッド KEMAR⁽³⁾の頭部伝達関数(HRTF)を信号処理ソフトにより畳み込み使用する。

なお、本研究のすべての評価実験において実験参加者に対し十分な実験内容の説明を行い、インフォームドコンセントを得て実験を実施している。

2. 再生機器の特性把握と特性補正

2.1 ヘッドホンの特性補正

出力信号 X をヘッドホンで提示した際に受聴者の外耳道入力信号 Y にかかる音源から受聴者の外耳道入口までの伝達関数 H をFIRフィルタ G で処理⁽⁴⁾して使用する。

2.2 頭部スピーカの特性補正

2.2.1 特性補正

出力信号 X をスピーカで提示した際に受聴者の外耳道入力信号 Y にかかる音源から受聴者の外耳道入口までの伝達関数を式(1)、(2)のように処理⁽⁴⁾して使用する。添え字 L は左耳、 r は右耳、添え字 L は左スピーカ、 R は右スピーカを表す。

ここで式(1)、(2)の処理を特性補正、 $G_{LL}(f)$ 、 $G_{r,R}(f)$ による処理を直接音補正、 $G_{r,L}(f)$ 、 $G_{L,R}(f)$ による処理を回り込み音補正とする。

$$X_L(f) = Y_L(f)G_{LL}(f) - Y_r(f)G_{r,L}(f) \quad \dots(1)$$

$$X_R(f) = Y_r(f)G_{r,R}(f) - Y_L(f)G_{L,R}(f) \quad \dots(2)$$

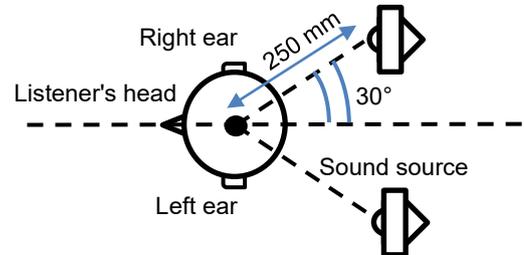


Fig. 1 Head speaker diagram

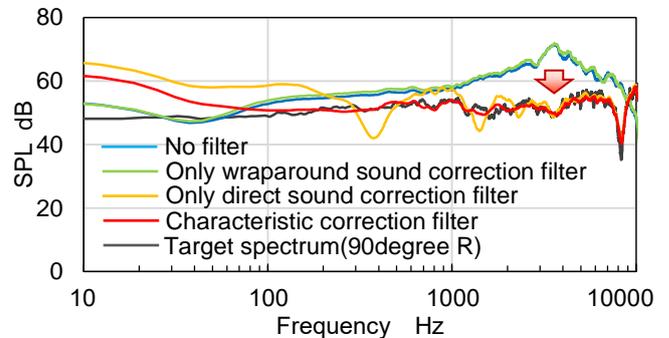


Fig. 2 Head speaker characteristic correction results

Table 1 Listener's head position

Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
20mm forward	20mm backward	20mm on right side	20mm on left side

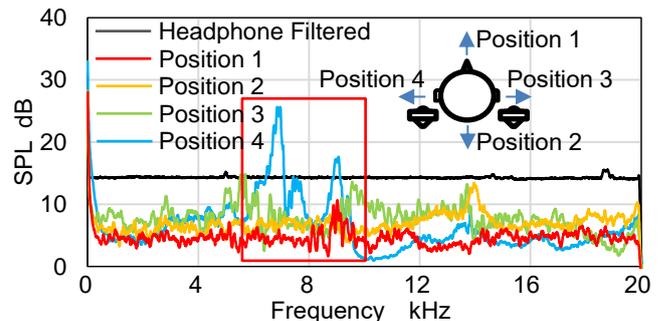


Fig. 3 Variation in Head speaker characteristic correction results depending on head position

2.2.2 特性補正

Fig. 2に補正なし、回り込み音補正、直接音補正、特性補正をそれぞれ行った右側90度方向のHRTFを再生した際の再生音場の受聴者の右耳での計測結果を示す。また、受聴者の位置を基準からTable 1に示す前後左右の位置に移動させ、特性補正を行った22 kHzまでの白色雑音を再生した際の再生音場の受聴者の右耳での計測結果をFig. 3に示す。

補正なし、回り込み音補正、直接音補正、特性補正の順に音源の再現性が改善することがわかる。また、特性補正により100 Hzまでの低音域にピークが生じることがわかる。こ

これは受聴者とスピーカの距離が近く、反対の耳へ回り込む音が小さいために、回り込み音補正より直接音補正の効果が高いと考えられる。また、100 Hz 以下は頭部スピーカの再生周波数外であるために特性補正の効果が低いと考えられる。

また、基準との耳位置のずれにより受聴者の外耳道入口における6~10 kHz 付近の特性補正の変化が大きいことがわかる。頭部スピーカではわずかな位置の違いにより、頭部中心から見たスピーカの方向が変わる。そのため後方の120~180° にかけて HRTF スペクトルの変化が顕著になる6~10 kHz 付近が影響したと考えられる。

2.3 骨導イヤホンの特性補正

気導音の HRTF を FIR フィルタ G_{AB} で処理することにより、骨導音の HRTF として使用する。気導音の HRTF を H 、聴感特性を A とし、添え字 Air を気導音、Bone を骨導音として式(3)が成り立つ。このとき、気導音と骨導音のそれぞれにおいて受聴者に等ラウドネス音を知覚させることを考えると、等ラウドネス音を L として式(4)が成り立つ。さらに式(3)、(4)を解くと式(5)が得られる⁽⁶⁾。

$$H(f) \times G_{AB}(f) \times A_{Bone}(f) = H(f) \times A_{Air}(f) \quad \dots (3)$$

$$L_{Bone}(f) \times A_{Bone}(f) = L_{Air}(f) \times A_{Air}(f) \quad \dots (4)$$

$$G_{AB}(f) = L_{Bone}(f) / L_{Air}(f) \quad \dots (5)$$

2.4 特性補正による音像定位精度の変化

2.4.1 実験内容

22 kHz までの白色雑音に、0° から 330° まで 30° 毎の計 12 方向の HRTF をそれぞれ畳み込んだ音源と、音源に特性補正をそれぞれ行った音源(以下、特性補正音源)を再生機器で再生した。各方向 2 回ずつ刺激音をランダムに提示し、被験者には音源提示中に正面を向くように指示した。被験者は聴力正常な 20 代 6 名である。

2.4.2 実験結果および考察

定位方向と目標方向の誤差を誤差角度とし、誤差角度の平均値を Fig. 4 に示す。いずれも補正なし、特性補正の順に平均誤差角度が改善し、これは特性補正により HRTF が正確に再生され、方向認知の手掛かりが増したためと考えられる。

2.5 気導音と骨導音の左右定位精度

気導音と骨導音がそれぞれ音像定位において有効となる周波数帯域を調べる。

2.5.1 実験内容

250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz の正弦波に Table 2 に示す両耳間レベル差(ILD)と両耳間時間差(ITD)をそれぞれ付加した音源を提示し、音像を知覚した両耳間の相対位置を回答させた。被験者は聴力正常な 20 代 6 名である。

2.5.2 実験結果および考察

頭幅を 8 cm に縮尺した用紙に回答した音源 A の定位位置と Table 2 に示す目標位置との誤差距離⁽⁶⁾の平均値を Fig. 5 に示す。ILD では 250 Hz と 500 Hz、ITD では 250 Hz において気導音より骨導音の定位精度が劣っている。これは骨導音において低音域では減衰が小さく音が反対の耳まで届いてしまうためであり、このことから骨導音は低音域の音像定位精度が低いと考えられる。

3. 周波数帯域による方向認知精度の変化

水平面内の音像定位に有効な周波数帯域を把握する。

3.1 実験内容

特性補正音源に、遮断周波数(f_c)=2, 4, 6 kHz のローパスフィルタで高周波帯域を制限した音源と、それらの音源に対し、さらに f_c =100, 250, 500 Hz のハイパスフィルタで低音域を削除した音源を用いて、再生機器の定位精度を検討する。その他の実験条件は 2.4.1 項と同様である。

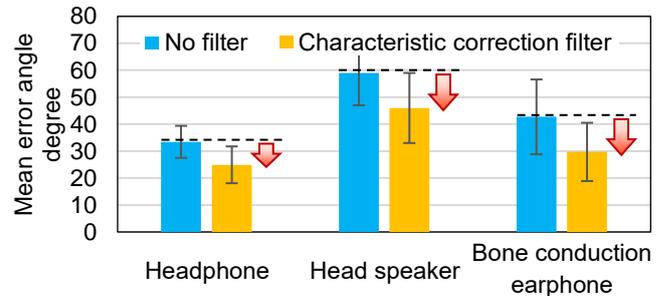


Fig. 4 Changes in sound image localization accuracy due to characteristic correction

Table 2 ILD and ITD

ILD dB						
0	5	10	15	20		
Target position cm						
0	1	2	3	4		
ITD 10 ⁻⁶ s						
0	100	200	300	400	500	600
Target position cm						
0.0	0.7	1.3	2.0	2.7	3.3	4.0

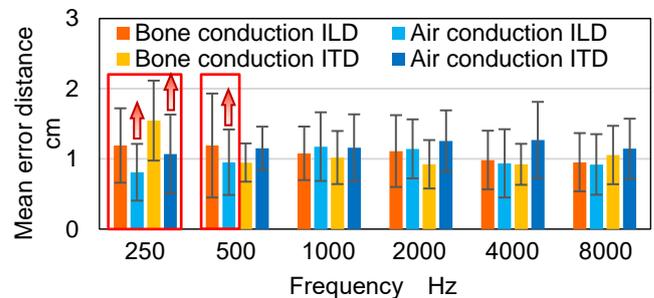


Fig. 5 Localization accuracy with ILD and ITD

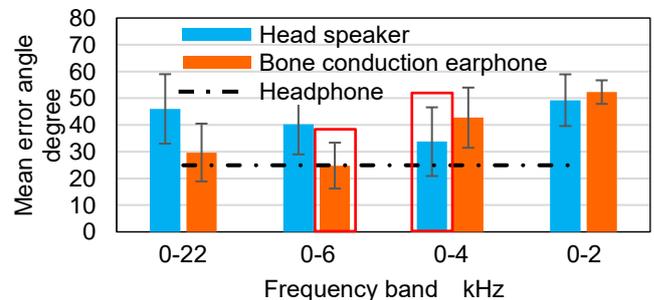


Fig. 6 Changes in sound image localization accuracy depending on the frequency band of audio device

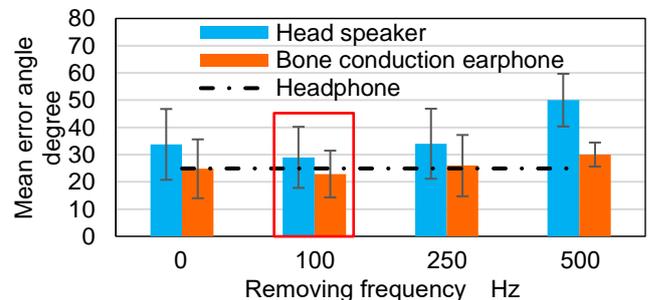


Fig. 7 Changes in sound image localization accuracy due to the low frequency band of audio device

3.2 実験結果および考察

高周波帯域を制限した音源の誤差角度の平均値を Fig. 6 に示す。Fig. 6 において、もっとも平均誤差角度が小さい周波数域に対し、さらに低音域を削除した音源の誤差角度の平均値を Fig. 7 に示す。高周波帯域を制限した場合、頭部ス

ピーカでは0~4 kHz の場合が最も平均誤差角度が小さく、骨導イヤホンでは0~6 kHz の場合が最も平均誤差角度が小さい。さらに、低音域を削除した場合、頭部スピーカと骨導イヤホンのいずれも100 Hz までを削除した場合が最も平均誤差角度が小さい。このことから水平面の音像定位には0~6 kHz が有効であり、頭部スピーカでは2.2 節で示した耳位置のずれにより受聴者の外耳道入口における6~10 kHz 付近の特性補正の変化が大きいので、6 kHz 付近までを削除し0~4 kHz で最も定位精度が高くなると考えられる。また、2.2 節で示した特性補正の効果が低い100 Hz までの低音域を削除したことで、定位精度が改善されたと考えられる。

4. 信号処理による方向認知精度の変化

方向認知精度の向上に有効な信号処理手法を検討する。

4.1 左右移動する音像

4.1.1 実験内容

白色雑音に畳み込む HRTF を時間変化させることで、音像が Fig. 8 に示す①-②の軌跡を往復する。左右に移動する角度を移動角度とし、移動角度が15°, 30°, 45° で角速度が $\pi/9$ rad/s の音源、さらに移動角度が30° で角速度が $\pi/3$, $\pi/9$, $\pi/15$ rad/s の音源に特性補正をそれぞれ行い再生機器で再生した。その他の実験条件は2.4.1 項と同様である。

4.1.2 実験結果および考察

誤差角度の平均値を Fig. 9 に示す。いずれも移動角度を変更した場合は移動角度30° が、角速度を変更した場合は $\pi/3$ rad/s が最も平均誤差角度が小さい。これは HRTF を時間変化させることで、受聴者が知覚する HRTF の情報が増し、定位精度が高くなったと考えられる。

4.2 残響音を付与した音源

4.2.1 実験内容

22 kHz までの白色雑音に残響時間が1.0, 1.5, 2.0 s のインパルス応答をそれぞれ畳み込んだ音源に、0° から330° まで30° 毎の計12 方向の HRTF を畳み込み、特性補正をそれぞれ行った音源を再生機器で再生した。その他の実験条件は2.4.1 項と同様である。

4.2.2 実験結果および考察

誤差角度の平均値を Fig. 10 に示す。頭部スピーカでは残響時間1.0 s の場合が最も平均誤差角度が小さく、骨導イヤホンでは残響時間1.5 s の場合が最も平均誤差角度が小さい。これは空間特性を模擬した残響を付与することで、感覚上受聴者が知覚する音像位置が明確化し、音像の方向を知覚しやすくなったためと考えられる。

4.3 周波数勾配を持った音源

4.3.1 実験内容

周波数勾配が6, 3, 0, -3, -6 dB/oct の22 kHz までの有色雑音に0° から330° まで30° 毎の計12 方向の HRTF を畳み込み、特性補正をそれぞれ行った音源を再生機器で再生した。その他の実験条件は2.4.1 項と同様である。

4.3.2 実験結果および考察

誤差角度の平均値を Fig. 11 に示す。頭部スピーカは6 dB/oct、骨導イヤホンは-6 dB/oct で最も平均誤差角度が小さい。これは頭部スピーカでは特性補正が変化しやすい6~10 kHz が相対的に抑えられ、骨導イヤホンでは2.5 節で示した定位精度の悪い低音域が抑えられたためと考えられる。

4.4 吹鳴する音像

4.4.1 実験内容

吹鳴する周期を吹鳴周期とし、特性補正音源に吹鳴周期2, 4, 6, 8 Hz、また、吹鳴周期6 Hz の音源について音源時間と無音時間のデューティ比(D) がD=0.25, 0.50, 0.75 の信号処理を行った音源を再生機器で再生した。その他の実験条

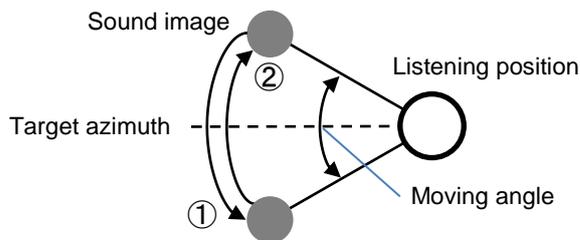


Fig. 8 Sound image moving left and right

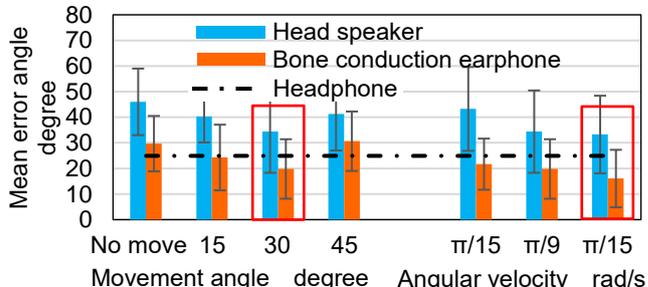


Fig. 9 Changes in sound image localization accuracy due to sound images moving left and right

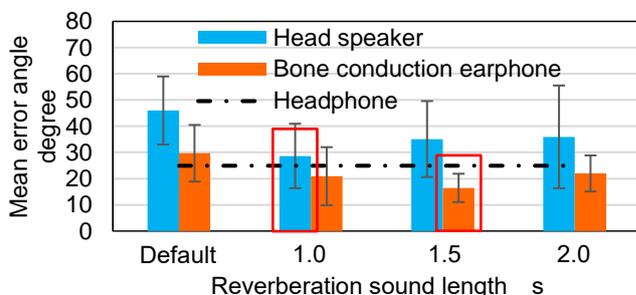


Fig. 10 Changes in sound image localization accuracy due to sound sources with reverberant sound

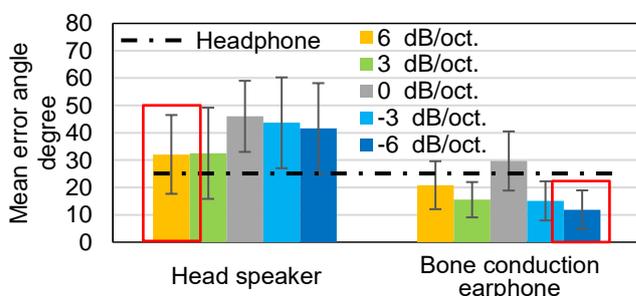


Fig. 11 Changes in sound image localization accuracy due to sound sources with frequency slope

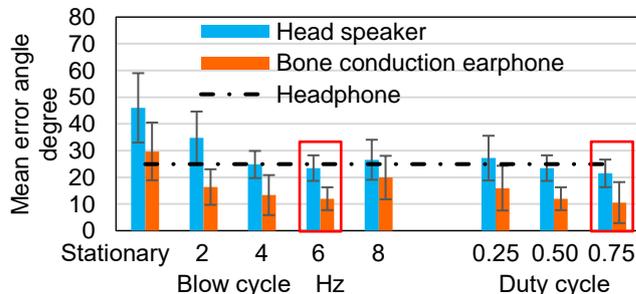


Fig. 12 Changes in sound image localization accuracy due to blasting sound images

件は2.4.1 項と同様である。

4.4.2 実験結果および考察

誤差角度の平均値を Fig. 12 に示す。いずれも吹鳴周期

6 Hz, で最も平均誤差角度が小さく, デューティ比を変更した場合はいずれも $D=0.75$ で最も平均誤差角度が小さい. これは無音時間を挟むことで左右の位相差を知覚しやすくなり, かつ HRTF の提示時間が最も長い $D=0.75$ で定位精度が高くなったと考えられる. また, 提案した信号処理では吹鳴周期 6 Hz, $D=0.75$ の信号処理で最も方向認知精度が向上した.

4.5 信号処理と HRTF の周波数域の制限

4.5.1 実験内容

3.2 節で最も平均誤差角度が小さくなった骨導イヤホンでは 100~6000 Hz, 頭部スピーカでは 100~4000 Hz の音源に, 4.4 節で最も平均誤差角度が小さくなった吹鳴周期 6 Hz, $D=0.75$ の信号処理を行った音源を再生機器で再生した. その他の実験条件は 2.4.1 項と同様である.

4.5.2 実験結果および考察

誤差角度の平均値を Fig. 13 に示す. いずれも特性補正音源, 周波数制限した音源, 吹鳴する音源, 周波数制限した吹鳴する音源の順に平均誤差角度が小さく, 頭部スピーカは平均誤差角度が約 15 度, 骨導イヤホンは平均誤差角度が約 10 度となり, いずれもヘッドホンの定位精度を上回った.

5. 気導音と骨導音の併用による方向認知精度の変化

気導音と骨導音の併用時に, 周波数域の棲み分けによる方向認知精度を調べる.

5.1 実験内容

特性補正音源について, 頭部スピーカで低音域, 骨導イヤホンで高音域を再生し, これらのクロスオーバー周波数が 4, 6, 8 kHz で重ならない音源群 A と, 0~2, 2~4, 0~4 kHz で重なる音源群 B を用いる. その他の実験条件は 2.4.1 項と同様である.

5.2 実験結果および考察

音源群 A の誤差角度の平均値を Fig. 14 に, 音源群 B の誤差角度の平均値を Fig. 15 に示す. 音源 A では 4 kHz を境に周波数域が重ならない場合が最も平均誤差角度が小さい. 音源 B では 0~4 kHz が重なる場合に平均誤差角度が 10 度以下と最も小さく, 0~2, 2~4, 0~4 kHz の順に平均誤差角度が軽減し, いずれもヘッドホンでの定位精度を上回った. これは 2.5 節で示した, 骨導音の音像定位において音像定位精度が低い低音域が気導音によって補われ, かつ 3.2 節で述べた頭部スピーカによる音像定位に有効な 0~4 kHz が強調されたために方向認知精度が向上したと考えられる. このことから気導音と骨導音の併用により再生機器単体での定位精度を上回ることが可能である.

6. 研究成果

- (1) 再生機器の特性補正を行い, 頭部スピーカでは耳位置のずれにより 6~10 kHz 付近の特性補正の変化が大きいことを示した. また, 特性補正により HRTF を正確に再生することで方向認知精度が向上することを示した.
- (2) 両耳間レベル差と両耳間時間差を付加した音源を用いて音像定位実験を行い, 骨導音は低音域の音像定位精度が低いことを示した.
- (3) 周波数域を制限して音像定位実験を行い, 水平面内の音像定位には 100~6000 Hz が有効であり, 頭部スピーカでは特性補正の変化が大きい帯域を削除した 100-4000 Hz が有効であることを示した.
- (4) 信号処理による方向認知精度の向上を図った. 提案した信号処理では左右移動する音源, 残響音を付与した音源, 周波数勾配を持った音源, 吹鳴する音源の順に方向認知精度が改善し, 提案した信号処理では吹鳴する音源で最

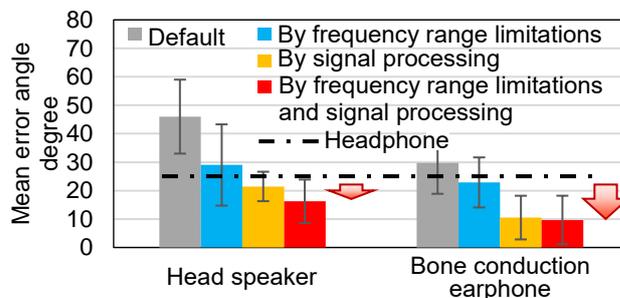


Fig. 13 Maximum localization accuracy for each audio device

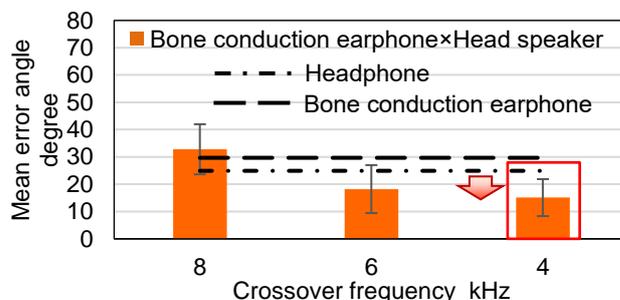


Fig. 14 Changes in sound image localization accuracy when crossover frequencies do not overlap

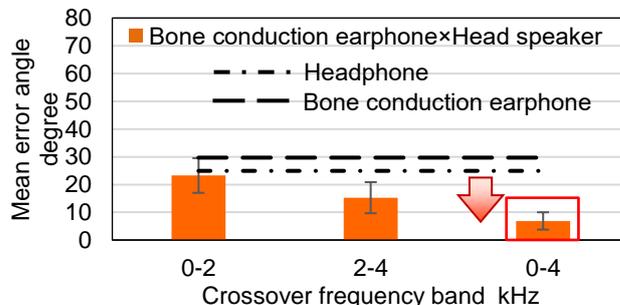


Fig. 15 Changes in sound localization accuracy when crossover frequencies overlap

も方向認知精度が向上することを示した.

- (5) 気導音と骨導音の併用による方向認知精度の向上を図り, クロスオーバー周波数が重なる場合と重ならない場合について検討し, 0~4 kHz が重なる場合に再生機器単体での定位精度を上回ることが示した.

参考文献

- (1) 小澤風太, 白石英孝, 戸井武司, 骨伝導による音像定位を活用した方向認知精度の向上, 日本音響学会講演論文集 (春) (2023) pp. 463-464.
- (2) 小澤風太, 小暮知史, 丹野慶太, 戸井武司, 気導音の伝達経路に基づく音像定位を活用した方向認知精度の向上, 日本音響学会講演論文集 (春) 1-13-3 (2024).
- (3) M. D. Burkhard et al., Anthropometric manikin for acoustic research, *J. Acoust.Soc. Am.* **58-1**, (1975) pp.214-222.
- (4) 飯田一博, 頭部伝達関数の基礎と 3次元音響システムへの応用, コロナ社, 東京 (2017).
- (5) 小澤風太, 小暮知史, 丹野慶太, 戸井武司, 気導音と骨導音の併用による音像定位を活用した方向認知精度の向上, 日本音響学会講演論文集 (春) 1-13-4 (2024).
- (6) 高橋悠人, 武藤剛, 小宮山撰, 骨伝導ヘッドホンによる音像定位の評価, 日本音響学会講演論文集 (秋) (2011) pp. 471-472.