

波面合成法に基づく音像定位による情報認知支援 Information Cognitive Support by Using Sound Localization Based on the Wave Field Synthesis

精密工学専攻 21 号 佐藤 歩
Ayumu Sato

1. はじめに

自動車事故は日本では近年減少傾向にあるが、現在でも多く発生している。その原因は、安全不確認が最も多く、次いで脇見運転である。また考え事や覚醒度の低下が原因とみられる漫然運転による事故も多く発生している⁽¹⁾。

自動車事故を防ぐための安全運転支援に関する技術は、これまで、周囲の状況検知と危険回避のための運転制御の観点から広く検討されてきた⁽²⁾。また最近ではセンサで取得した情報を自動運転に利用するための研究も盛んに行われている。しかし安全運転支援のような技術⁽³⁾⁽⁴⁾が発達しても、現状、事故に対する責任を負うのはドライバーである。そのため、ドライバーが素早く周囲の状況を認知できるように、センサで取得した情報を適切な注意喚起や警報の手段を利用してドライバーに知らせることが必要である。

また、運転操作を行っている間、危険はドライバーに対し常に相対的に移動している。すなわち実際の回避操作は、危険の方向のみならず距離等を含めた自車との位置関係や危険対象の動作を知る必要がある。

そこで本研究では、16ch のオーディオスピーカを用いた波面合成法 (Wave Field Synthesis : WFS) による認知支援システムを提案する。波面合成によって静止した音像、および移動する音像が正しく提示されることを実験によって確認し、各方向のスピーカから直接発音して方向を提示する場合と比較する。同時にシミュレーションによって反射環境における音圧分布の推移を調べ、境界音場制御理論を用いて反射音の影響を削減する方法を検討する。

なお、本研究における反応時間の計測および主観評価は、中央大学における倫理規定に準じ、事前審査を経て行った。また、実験内容について被験者に対し事前に十分な説明を行い、インフォームドコンセントを実施した。

2. 波面合成法による仮想音源の提示

本章ではドライバーに対して危険の位置、およびその動きを知らせることを想定して、波面合成による音像定位の精度、および移動する音像の提示を検討する。

2.1 波面合成法

波面合成法とは、ホイヘンスの原理を定式化したキルヒホップ-ヘルムホルツ積分公式に基づき、マイクロホンアレイとスピーカアレイを用いて、ある原音場の波面を別の空間で合成する音場再現手法である。

まず、原音場においてマイクロホンアレイを配置し、音源からの音波を収録する。次に、再生音場においてマイクロホンアレイと対応した配置のスピーカアレイにより、収録した音を再生する。すると、各スピーカから発生された音波が合わさり原音場における音源の波面が合成される。このとき、マイクロホンアレイとして指向性マイクロホンを配置することで、合成される波面の精度が向上する⁽⁵⁾。ただし、再生する周波数 f Hz とスピーカアレイ間隔 Δx m について、 $f > c/2\Delta x$ Hz (c は音速) となる場合、空間折り返しが生じ、正しい波面が再現されない。

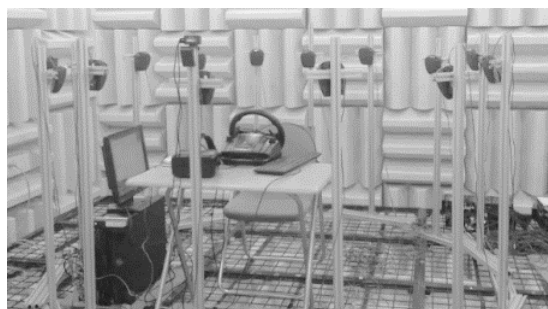


Fig.1 WFS system setup

Table1 1/3 octave band noise

Source No.	Frequency Hz		
	Lower limit	Center	Upper limit
1	282	315	355
2	355	400	447
3	447	500	562
4	562	630	708
5	708	800	891
6	891	1000	1122
7	1122	1250	1414
8	1414	1600	1778

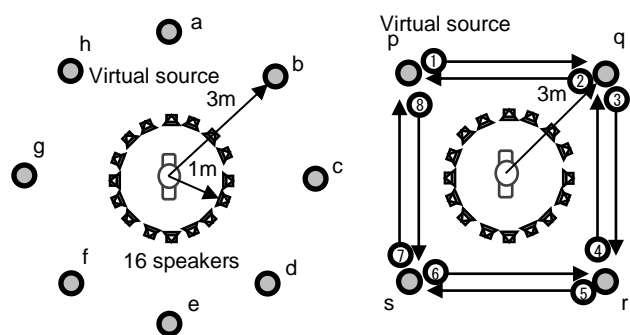
2.2 波面合成法による仮想音源の提示

2.1 節より、ある空間上に音源を設置した状態を原音場としてマイクロホンアレイによって収録し、各マイクロホン位置における音圧変化をスピーカによって再現することで、再現音場下において任意の位置に仮想的に音像を設置することが可能である (以後、仮想音源と呼ぶ)。また、この仮想音源の位置を時間ごとに変えて収録し、連続して再現することで、移動する音像を表現することが可能である。

2.2.1 波面合成法による静止する仮想音源の提示

波面合成法により提示した仮想音源が正しく定位されることを確認する。被験者は正常な聴力を有する二十代十名である。実験は暗騒音 22.0 dBA の完全無響室で行った。図 1 に実験セットアップを示す。スピーカは被験者位置を中心として半径 1.0 m の円周上に 16ch 設置した。このときスピーカ間隔は約 0.4 m であり、空間折り返し誤差が生じる周波数は約 860 Hz である。

提示する 1/3 オクターブバンドノイズを表 1 に示す。図 2(a) に示すように、被験者に対して正面方向を 0 deg として 45 deg 刻みの八方向の点 a-h に仮想音源を設置し、ランダムに 2 秒間提示する。被験者は提示された音像の方向を八方向から選択して回答し、同時に提示された音像の方向のわかりやすさを七段階で絶対評価する。音像は各方向、周波数ごとに二回ずつ提示する。各スピーカへの入力信号は、スピーカを点音源と考え、スピーカ位置にマイクロホンを設置した状態を仮定し、仮想音源との距離から計算した遅延及び距離減衰を考慮している。提示する音量は被験者の頭部中心位置において 55.0 dBA となるようにした。



(a) Static (b) Motional
Fig. 2 Positions and movements of virtual source

2.2.2 波面合成法による移動する仮想音源の提示

2.2.1 項と同様のセットアップを用いて実験を行う。被験者は正常な聴力を有する二十代十名である。提示する音源は2.2.1 項と同様の 1/3 オクターブバンドノイズであり、図 2(b)に示すように音源が時間経過に従って①-⑧の軌跡で移動する。軌跡①の場合、まず図中の点 p の位置で仮想音源が 1 秒間提示され、続いて点 p から点 q に向けて 1.06 m 移動した点で 1 秒間提示される。以後同様に点 q に到達するまで仮想音源が提示され続ける。被験者は提示された音源の移動した軌跡を 8 つの直線から選択し回答する。同時に提示された音源の動きがわかりやすかったかを七段階で絶対評価する。入力信号は 2.2.1 項と同様である。

まず、静止した仮想音源の提示に対する認知性を図 3 に示す。空間折り返し誤差が生じない 860 Hz 未満の周波数帯域を含む音源の提示について正答率、定位感共に良好な結果が得られている。中心周波数 800 Hz の音源では正答率は変わらないものの、定位感が悪化している。これは提示したバンドノイズに空間折り返し誤差の発生する周波数帯域が混在したことにより、一部の帯域の音圧分布が正確に再現されなかったためと考えられる。中心周波数 1000 Hz 以上の音源においては、正答率、定位感共に低くなっている。これは含まれるほぼ全ての帯域において折り返し誤差が発生した結果、両耳間音圧差等の方向判断に必要な情報を被験者が得られなくなったためと考えられる。以上より、空間折り返し誤差の発生しない周波数範囲において、波面合成によって静止する音源が正しく定位されることがわかった。

移動する仮想音源の提示の結果を図 4 に示す。静止した仮想音源と同様、空間折り返し誤差が生じない周波数帯域について良好な正答率、定位感が得られている。特に正答率は 100 %となっている。これは移動する音源は静止する音源と比較して方向や位置を判断する手がかりが多く、前後誤り等の判断ミスが生じなかったことが原因と考えられる。以上のことから、波面合成によって移動する音源を提示可能であること、また高い認知性が得られることがわかった。

3. 波面合成による音像に対する反応の検討

2 章より、波面合成によって被験者に対して移動する音源を提示することで、固定された音源と比較してドライバに対してより高い認知性をもって周囲の危険の方向を伝え、回避操作に要する時間をより短縮できることが期待される。

一方、2 章で述べたように波面合成によって再現可能な周波数はスピーカ配置によって制限されることが分かっており、危険に対する認知性を低下させる可能性が懸念される。そこで本章では、一般的に用いられている LED 表示灯による方向提示、四スピーカによる方向提示と、今回提案する波面合成による方向提示を比較し、認知性の違いを明らかにする。

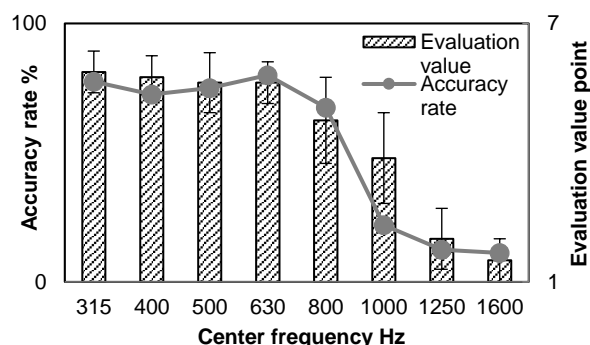


Fig. 3 Cognitivity of static virtual audio source

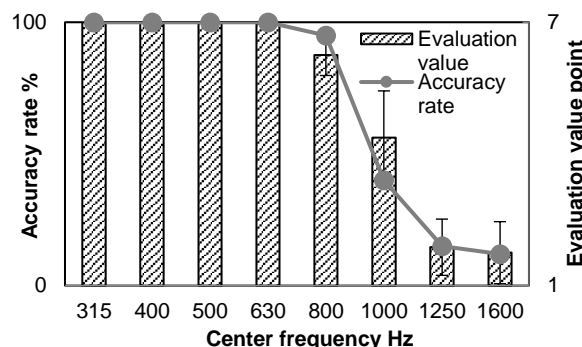


Fig. 4 Cognitivity of moving virtual audio source

3.1 周囲の危険と危険認知支援

自車の周囲で危険が発生した場合、光の点滅や警報音でドライバに知らせることを想定し図 5 に危険および危険認知支援を示す。被験者は正常な聴力を有する成人十二名である。

3.1.1 周囲の危険を模擬した LED

自車前方への人の飛び出し、脇をすり抜ける二輪車、駐車時の障害物などの危険を想定する。図 6(a) に示す白色 LED (以下、危険 LED) を、車の周囲四方向に配置し、点滅周期 80 ms で 1.6 s 間発光する。

3.1.2 危険の方向を伝える認知支援

表 2 に、LED による支援一種(タイプ A)、スピーカによる支援二種(タイプ B、タイプ C)の計三タイプの認知支援を示す。LED による認知支援は、四つの LED の内一つが点滅し、光の位置で方向を伝える。一スピーカによる認知支援は、16ch のスピーカの内一つから音を再生し、音像定位させることで方向を伝える。波面合成による認知支援は、16ch のスピーカから波面合成によって仮想音源を提示し、音像定位させることで方向を伝える。音による提示についてはいずれの方法も頭部中心位置で 55.0 dBA となるようにした。なお、提示音については、提示方法ごとの限界性能を比較するため、認知支援タイプ B の一スピーカによる支援では 18 kHz までのホワイトノイズを用い、認知支援タイプ C の波面合成による方向認知支援では 860 Hz のローパスフィルタをかけたホワイトノイズを用いる。支援提示時間は 0.8 s であり、危険と支援の提示方向は常に一致している。

3.1.3 周囲の危険を確認するまでの反応時間

危険認知支援を利用し周囲の危険を確認するまでの状況として、次の 1)~4) の手順を想定する。

- 1) 飛び出しやすり抜けなど、自車の周囲で危険が発生する。
- 2) 車載センサが危険を検知し認知支援を実施する。
- 3) ドライバが危険発生を認知し、危険の方向を向く。
- 4) 危険を目視で確認し、回避操作をする。

上記のように、危険発生と同時に認知支援を行う場合の危険 LED を確認するまでの反応時間を計測する。実験は暗騒音

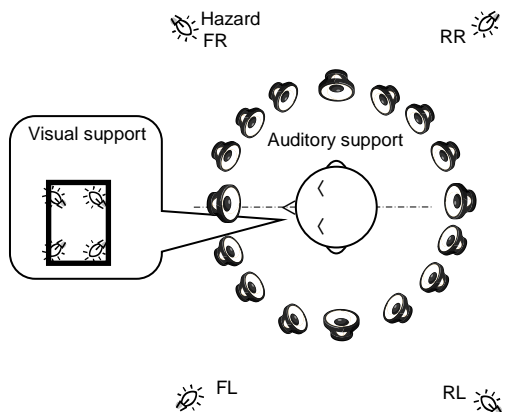


Fig. 5 Hazards and cognitive supports

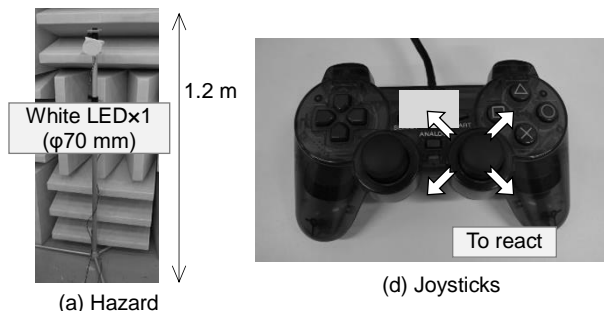


Fig. 6 Hazard and joystick

Table 2 Cognition supports

Type	Support	Method
A	Visual	1 LED
B	Auditory	1 speaker
C	Auditory	WFS

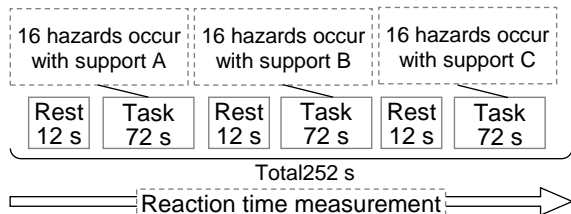


Fig. 7 Time protocol for hazard cognition experiment

22.0 dBA の完全無響室で行う。また運転中を想定し、等価騒音レベル 50.3 dBA のロードノイズを環境騒音として与えて検討する。

3.2 周囲での危険発生を想定した実験条件

被験者が危険 LED を確認するまでの反応時間を測定する図 7 に示すタイムプロトコルに従い、周囲の危険 LED の内一つが点滅し、一区間 72 s 当たり十六回の危険が 3.7~5.2 s の間隔でランダムに発生する。表 2 に示した支援で危険発生と同時に認知支援が行われる。また提示される支援の種類は事前に被験者に伝えておく。

被験者は、認知支援により危険の発生を知り、実際に危険 LED の点滅を目視で確認したら、Fig. 6(d) に示す右ジョイスティックを素早く危険の方向に倒す。危険発生からジョイスティックを倒すまでの応時間を記録する。

3.3 危険 LED 確認までの反応時間

LED を用いた認知支援による平均反応時間を 1 として、各認知支援に対する平均反応時間と標準偏差の比を図 8 に示す。認知支援タイプ A, B, C の反応時間を評価する。図 8 より、視覚情報による支援より聴覚情報による支援の方が反応時間が短いことがわかる。本条件において、認知支援を見て方

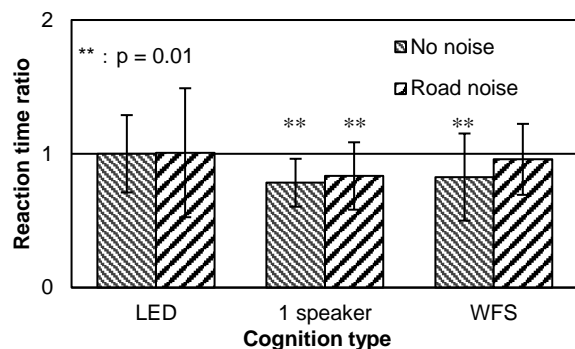


Fig. 8 Reaction time of cognition supports

向を判断する場合と、聞いて判断する場合での脳での処理時間の差が、視覚支援と聴覚支援の反応時間の差を生じさせたと考えられる。また、波面合成による支援では、ロードノイズがない場合ではスピーカによる支援とほぼ変わらないが、ロードノイズ下では反応時間は遅くなった。これは、提示した仮想音源が高域を含んでいないため、ロードノイズによるマスク効果が働いて認知が阻害されたと考えられる。

以上より、警報音を音定位させた聴覚の認知支援を行うことで、LED による視覚支援と比べて反応時間が短縮することがわかった。また、波面合成による音像定位によって危険の方向を認知させることが可能であることがわかった。

4. 境界音場制御による反射音の低減

波面合成は自由音場を前提とした技術である。反射場においては、スピーカから発生した音が壁面で反射することで意図と異なる波面が合成されてしまう。車室内のように内部空間が狭く、制御領域と音源の距離が近くなる条件では反射の影響が強く生じるため、所望の波面が合成されない問題がある。そこで本章では、境界音場制御理論⁽⁶⁾⁽⁷⁾によって車室内の音場を制御し、反射音を低減することを二次元音響伝搬シミュレーションによって検討する。

4.1 境界音場制御理論

複数のスピーカ、マイクロホンによる多点入出力系の伝達関数行列を G と定義したとき、各スピーカへの入力 A_f と各マイクロホン位置における応答 H の関係は以下の式で表される。

$$H = GA_f \quad (1)$$

もし目標音場が H_{target} として与えられる場合、それらを得るための相対的な各音源条件は式 (1) から

$$A_f = (G)^+ H_{target} \quad (2)$$

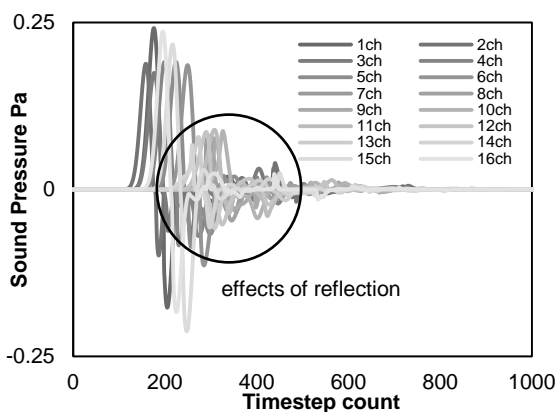
で求めることができる。ここで $+$ は疑似逆行列を意味する。

4.2 二次元音響伝搬シミュレーションによる反射低減

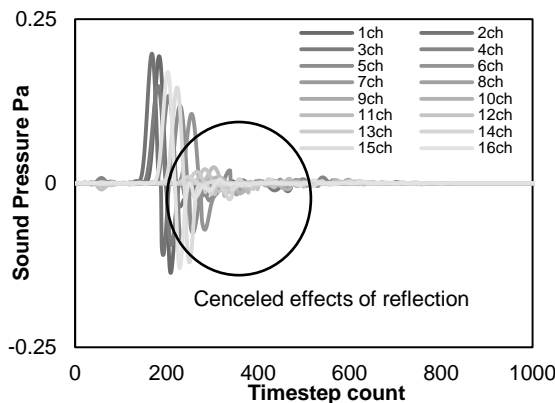
CIP 法⁽⁸⁾による二次元音響伝搬シミュレーションを用いて境界音場制御の効果を検討する。シミュレートする空間上に入力点(スピーカ)と応答点(マイクロホン)を設置することで伝達関数行列を得る。検討の詳しい手順を以下に示す。

- 1) 原音場として自由音場におけるシミュレーションを行い、目標とする音圧応答 H_{target} を得る。
- 2) 反射環境におけるシミュレーションによって各スピーカ、マイクロホンの間の伝達関数行列 G を得る。
- 3) H_{target} 、および G を式 (2) に代入し、各スピーカに入力する信号 A_f を得る。
- 4) 入力信号 A_f を反射環境におけるシミュレーションに適用し、2) の自由音場、反射音場における波面合成シミュレーションの結果と比較する。

この手順によって得られる信号 A_f は、各入力点に入力ことで、伝達関数行列 G で表される場の特性を打ち消し、各応答点において目標とする H_{target} を再現する特性を有する。

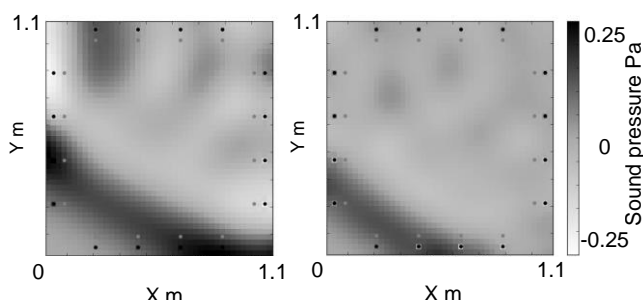


(a) Without Optimization



(b) With Optimization

Fig.9 Sound pressure responses on reflection field



(a) Without Optimization (b) With Optimization

Fig. 10 Sound pressure distribution on reflection field

4. 2. 1 自由音場における目標音圧応答

目標とする音圧応答 H_{target} を得るため、自由音場におけるシミュレーションを行う。空間のサイズは $1.1\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ 、グリッドサイズは $\Delta x: 0.05\text{ m}$ 、 $\Delta y: 0.05\text{ m}$ 、タイムステップは $\Delta t: 1/44100\text{ s}$ とした。応答点(指向性マイクロホンに相当)は領域を取り囲むように四方に16ch配置した。自由音場は壁面における反射率を0に設定することで再現した。入力点はグリッド上の点(1.8m, 2.2m)とし、入力信号はガウシアンパルスとした。マイクロホンの指向性は、シミュレーション上において得られるx軸方向、y軸方向の音圧より応答点における音響インテンシティを求め、各マイクロホンの向きに対する入射角度に応じた感度を設定することで得た。

入力されたガウシアンパルスに対する各応答点における音圧応答を目標とする音圧応答 H_{target} とする。

4. 2. 2 反射音場における伝達関数行列

反射音場における伝達関数行列 G を得るため、シミュレーションを行う。空間サイズ、グリッドサイズ、タイムステップ、応答点は4.2.1項と同様とした。入力点(スピーカに相当)は

応答点を取り囲むように四方に16ch配置した。壁面における反射率は、自動車車室内のガラス面を想定して0.8とした。

各入力点にガウシアンパルスを入力することで得られた 16×16 の伝達関数行列を反射音場の伝達関数行列 G とする。

4. 2. 3 境界音場制御による反射制御シミュレーション

反射音場における境界音場制御のシミュレーションを行う。4.2.1項において得られた音圧応答 H_{target} 、および4.2.2項において得られた伝達関数行列 G を式(2)に代入し、得られた入力信号を A_f とする。

対象とする空間は4.2.2項の反射場と同条件とし、スピーカ位置に得られた入力信号 A_f を入力した。制御を行わなかった場合のシミュレーション結果、境界音場制御を適用した場合のシミュレーションについて、時間応答波形を図9、波面通過後の $t=300$ における音圧分布を図10に示す。図9(b)に示すように応答波形は反射による音圧の増加が抑制され、反射成分による収束の遅れもほとんど見られない。また図10に示す音圧分布より、境界音場制御が適用されたシミュレーションにおいては、波面通過後の空間内の反響が制御が適用しなかった場合と比較して小さくなっていることがわかる。

以上の結果より、境界音場制御によって壁面における反射音が制御されたことが示された。同様の制御を行うことで、自動車車室内のような反射環境においても反射による波面の歪みや反響成分を除去できると考えられる。

5. 研究成果

本研究では、車の周囲で発生した危険を波面合成による音像定位を用いて自動車ドライバに知らせる認知支援を提案し、以下のことを明らかにした。

1. 波面合成によって音像が提示可能であることを示し、また移動する音像を提示することで、より高い認知性を有する音像を提示できた。
2. 波面合成によって提示された音像が認知の支援に有効であることを示した。
3. 指向性マイクロホンを用いた境界音場制御理論を適用することで、反射環境においても正確に波面を合成可能であることを示した。

参考文献

- (1) 警察庁交通局, 平成26年中の交通事故の発生状況, 政府統計の総合窓口(e-Stat) (2015)
- (2) ASV推進検討会, 第5期ASV推進計画パンフレット, 国土交通省(2012)
- (3) 茂木勇祐他, 生体情報に基づく音像定位による情報音の認知性評価, 日本音響学会春季講演論文集, (2014), p. 1519-1520
- (4) 茂木勇祐他, 脳活動計測に基づく情報音の音像定位による方向認知支援, 日本音響学会春季講演論文集 (2015), p. 1363-1366
- (5) 木村敏幸他, 波面合成法による立体音場再生におけるマイクロホン及びスピーカの指向特性による波面の合成精度への影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12, (2007), p. 191-198
- (6) 有光哲彦他, 多チャンネルオーディオシステムによる車室内の多領域音場制御, 自動車技術会シンポジウム, 101, (2014), p. 11-14
- (7) 曹浣豪他, 車室内の多領域音場制御, 自動車技術会シンポジウム, 6-11, (2011), p. 60-65
- (8) 太刀岡勇気他, CIP法による時間領域音場解析-FDTD法との比較-, 日本音響学会建築音響研究会講演論文集, (2007), p. 979-982