

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：21401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870578

研究課題名(和文)音源位置に対応して音の聞こえる方向を動的に制御可能な拡声システムの開発

研究課題名(英文)Development of public address system that can dynamically control the perceived direction of the sound image in relation to the position of sound source

研究代表者

安倍 幸治 (Abe, Koji)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：50315652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：一般的な拡声システムでは、レベルの増幅が行われるだけで、音の聞こえてくる方向は考慮されていない。本研究では、音声の聞こえてくる方向を制御可能な拡声システムの開発を試みた。まず、複数音源から到来する音の聞こえを把握するために、先行音効果における音源配置の影響を実験により明らかにした。その後、その知見を用いて、任意の空間に設置された拡声システムがもたらす音像の方向を推定するシステムを構築した。本研究の成果によって、ある程度の精度で、システムが設置された環境における音像を事前に予測することが可能となった。これはホール等の設計に寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the general public address system (PA system), the level of the input signal is amplified. Therefore, the perceived direction of the sound image obtained by the listener is not considered. This study aims to develop the system that can control to perceived direction of sound image. First of all, in order to clarify the behavior of composite sound coming from the multiple sound sources, an experiment on the effects of the sound source arrangement on the precedence effect was conducted. Then, using these findings, we constructed a system for estimating the direction of a sound image when the PA system is installed at any space. The results of this study makes it possible to predict the behavior of the sound image in the environment in which the PA system is installed. This will contribute to the plan to set up the PA system.

研究分野：音響情報工学

キーワード：拡声システム 先行音効果 音像方向制御

### 1. 研究開始当初の背景

公共施設，多目的ホール，そして講義室等では，肉声だと音声情報を十分に伝達できないため，音響情報を明瞭に伝えるためにレベルを補填することに主眼が置かれた拡声システムを利用している．しかし，人間が音から得ることの出来る情報は，音声情報だけではない．具体的に言えば，音には音声などの言語的情報以外に，空間的情報が含まれている．空間情報の1つとして，音がどちらから聞こえてきたかという情報を人間は音から認識することが出来る．この情報は，会議などにおける自然な話者位置特定などに応用が可能であり，他にも避難誘導時の直観的な方向誘導，特に視覚障害者の誘導などに有用と言える．

実際の伝達方向によらず，主観的な音の聞こえてくる方向を制御するために役立つ聴覚的な錯覚の一つに先行音効果がある．先行音効果は複数音源から発せられる音が時間差を持って到来する際に，その時間差で音の聞こえてくる方向，すなわち音像方向が変化する現象である．つまり，実際には複数の音源がそれぞれ異なる位置にあるにも関わらず，音の聞こえてくる方向としてはおおよそ一方に定まることとなる．これらを拡声システムに利用する例としては，AKG のデルタ・ステレオフォニーや竹中工務店のOZ-T100 などがある．しかし，これらのシステムは前方にあるステージ上に存在する音源に対する音像制御手法であり，限定的な環境下でしか使用できない問題が残されている．

本研究では，現在の拡声システムを空間的な情報を再現可能な，より自然なものとするべく，任意の音源位置に対して動的に音像方向を生成する拡声システムの開発を目指した．

### 2. 研究の目的

前述した背景に基づき，本研究では，広い空間に幾つかの拡声スピーカの組み合わせたユニットを平面的に連結することで，音情報の明瞭性を保ちつつ，音の聞こえてくる方向を自在に制御可能な拡声システムを実現することを目的とする．具体的には下記の4つの小目的を掲げた．

- (1) 聴取点から見た拡声スピーカの配置方向の合成音像方向の決定に寄与する重みに関する検討  
任意の空間に設置された複数のスピーカで音像方向を制御するためには，配置スピーカの方向ごとに遅延やレベルを適切に設定する必要があると考えられる．聴取位置から見た音像の方向によって先行音効果の振る舞いがどのように変化するかを調べる．
- (2) 拡声スピーカの仰角が音像定位に及ぼす影響の検討

拡声音源は空間に立体的に配置されることが多い．音像定位において音源の仰角は定位に多少なりとも影響することは知られている．そこで，水平面上で異なる方向に配置された二つのスピーカの片方もしくは両方が上方に設置されていた場合に，その仰角が合成音像の水平方向の知覚に及ぼす影響を調べる．

- (3) 壁面等による反射が先行音効果による音像定位に及ぼす影響の検討

複数音源から到来する音の定位は主に反射の存在しない無響室で検討されることが多い．しかし，実際の環境下では壁面による反射が存在する．室の音響特性は，音の聞こえに大きく影響するため，その関係について明らかにする．

- (4) 複数のスピーカからなる拡声システムユニットを，平面的に連結して用いる際の問題点に冠する検討

拡声システムを適用する空間のサイズによって明瞭性を確保するために必要となるスピーカ数は異なってくる．空間全体で遅延時間を統一的に制御しようとすると提示レベルと遅延時間の兼ね合いで空間的に音圧レベルに大きなばらつきが生じ，結果明瞭性が落ちる領域が発生する．本研究では比較的狭い空間を少数の拡声スピーカから構成されるユニットでカバーし，それらを平面的に連結することで広範囲をカバーすることを計画している．その際，連結部では定位が設計と差異を生じると考えられる．その影響を明らかにし，不具合を抑制する手法を提案することを試みる．

### 3. 研究の方法

空間に拡声装置が設置された場合，拡声された音が設置された拡声音源から放射される．空間内にいる聴取者は複数の拡声音源から到来する音を耳にし，その合成音像を知覚することになる．合成音の知覚に密接に係る先行音効果の振る舞いが音の到来方向に依存するかは明らかにされていない．そこで研究目的の(1)及び(2)に沿って，音源配置を主な実験条件として先行音効果の振る舞いを明らかにする実験を実施した．音像の定位に強く寄与するのはレベルの大きな2音源であることを考慮し，実験は2音源で行った．音源配置の組み合わせを示した表を表1に示す．表の行と列はそれぞれ音源の設置方向を表している．表の通り，音源は30度間隔で配置した．同じ方向に配置される組み合わせを除くと，音源配置の組み合わせは132通りとなる．表中に灰色で示されたセルは，配置としては同じ組み合わせとなるので，条件から除外している．また，緑色で示されるセルにおいては，左右対称の組み合わせとなっている．人間の音像定位の振る舞いはほぼ左右対称であることを考慮し，この組み合わせも実験条件から除外した．このような考えで，

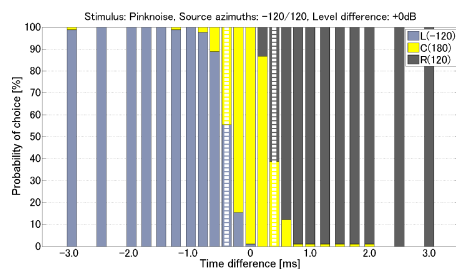
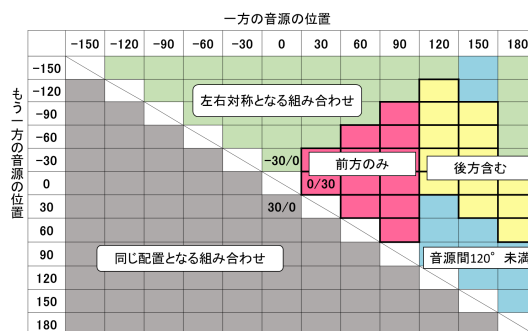
赤及び黄色のセルの条件において先行音効果の配置による依存性がどの程度あるかを検討した。

実験結果の一部を抜粋して、図 1 に示す。各図はそれぞれ配置の異なる実験の結果を示している。図の横軸は、2 音源間に設けられた時間差であり、縦軸は回答の割合を表している。聴取実験では、知覚された音像が、配置された音源のどちらに近いのか、もしくはその中間の方向に近いのかを判断させている。グラフの青の部分は、左側の音源の方向から答えたことを示しており、黄色は中間の方向から、黒は右の音源方向から聞こえたと回答したことを表す。左右対称な配置である図 1(a)に着目すると、遅延時間が-3 ms の場合は回答が 100%青で塗りつぶされている。つまり、左側の音源が先行している場合には、左側の音源から音が聞こえていると知覚していることが分かる。同様に遅延時間が正の場合には、右側の音源から聞こえたと回答しており、両者から放射される音信号に時間差がほとんどない場合には、中間の方向から聞こえたと回答されている。図から分かるように音像方向が切り替わる遅延時間はおおよそ  $\pm 0.5$  ms であることも実験結果から得ることが出来た。図 1(a)と図 1(b), (c)を比較すると分かるように、左右対称な場合には先行音効果の振る舞いもほぼ左右対称であるのに対し、音源配置が非対称となると、先行音効果による音像方向のシフトが左右対称でなくなり、先行音効果を生じさせるのに必要な時間差も変動していることが分かる。これは本研究によって得られた新たな知見である。

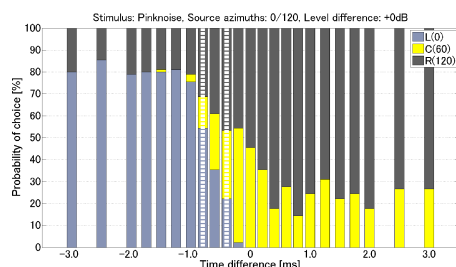
目的の(2)及び(3)についても実験的な検討を行った。仰角の影響については、実際に音源を被験者上方に設置し、発展的な条件のもと実験を行った結果、仰角は水平方向の先行音効果の振る舞いには影響しないことが示された。また、反射の影響についても、3 番目に到来する音刺激が 1 番目及び 2 番目に到来する音刺激よりも 6 dB 小さければその影響はほぼ無視できることを示した。

これらの知見を元に、音像方向を任意に制御可能な拡声システムの構築を試みた。具体的なハードウェアを構成する前に、理論上、音像の方向を制御可能であるかを検討するために、実験結果に基づいたシミュレーションシステムを構築することを試みた。構築した音像方向推定システムは、以下のような手順で動作するものである。初期設定として、拡声システムが設置される空間を 2 次元的に規定する。同時に、その空間のどこに拡声用音源が設置されるかも決定する。設置した拡声用音源には、パラメータとして増幅レベル及び遅延時間を与える。次に、空間内に所望の間隔でグリッドを設け、各音源からその位置に到来する音刺激のレベルと到達タイミングを算出する。到達した音刺激の中から到達時刻の早いものを 2 点選出し、その聴取位

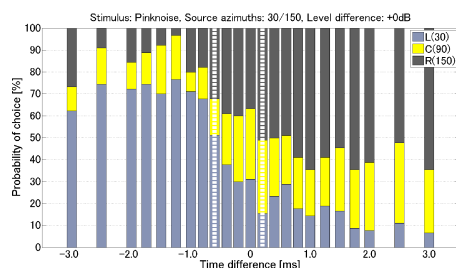
表 1. 2 音源の配置の組み合わせと実験条件



(a)  $-120^\circ / 120^\circ$  配置, レベル差無し



(b)  $0^\circ / 120^\circ$  配置, レベル差無し

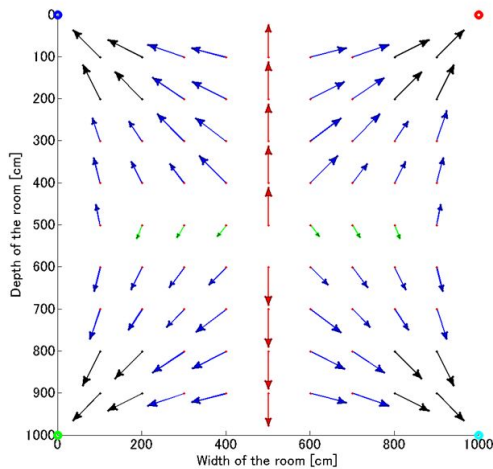


(c)  $30^\circ / 150^\circ$  配置, レベル差無し

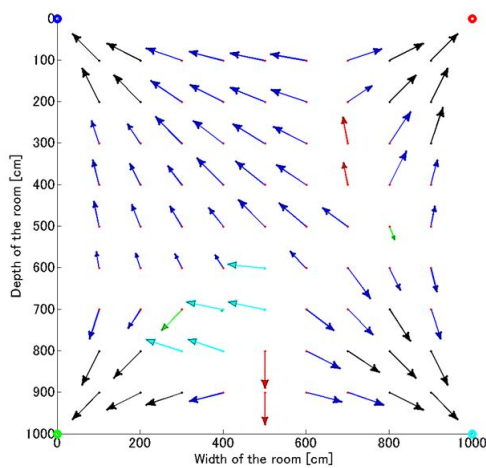
図 1 先行音効果の配置による相違を検討した実験結果の一例

置では選出された 2 点から音が提示されているものと考え、前述の実験結果から構築した音像定位方向のデータベースを参照し、その地点での音像知覚方向とした。レベル差による先行音効果の打ち消しや、到達時間差の大きいことによるエコーの発生など幾つかの例外処理も組み込まれている。

10m 四方の空間に本手法を適用した結果を図 2 に示す。図 2 は 10m 四方の空間の四隅に



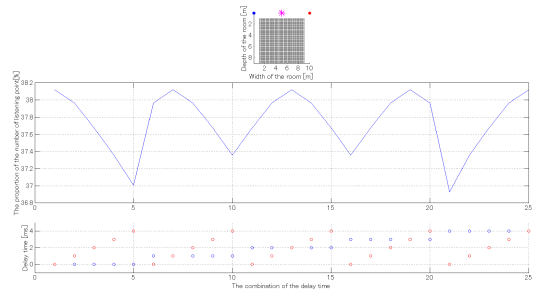
(a) レベル差なし，時間差なし



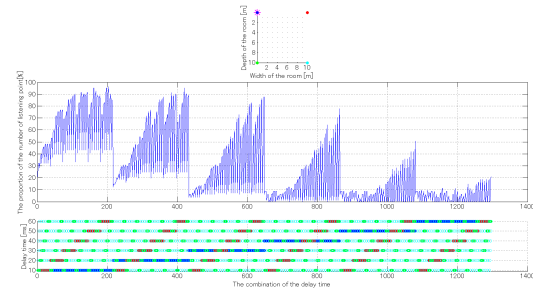
(b) レベル差なし，左上 Sp. : 10 ms 先行  
図 2 音像方向推定システムによる出力例

拡声用スピーカが配置された例であり，印がその位置を示している．図中の矢印は矢印の始点の位置での推定された音像の方向を示している．図 2(a)のように 4 つのスピーカから同時にかつ同じ増幅率で拡声を行った場合には，4 つのスピーカ方向に音像が定位する領域がほぼ同じサイズで存在することが確認できる．一方，左前方に配置された青のスピーカから先行して音を放射するような条件にした場合には，先行音効果の働きにより左前方に定位する領域が相対的に増加していることが分かる．

構築した音像方向推定システムが拡声システムの構築において有用であることを示すために，本システムを利用した音像方向制御パラメータの検討を行った．その結果を図 3 に示す．図 3(a) は前方の両脇に設置された 2 つのスピーカを用いて，音像を正面方向へ制御するためのパラメータを検討した結果を示している．図の上段パネルは検討条件の位置関係を示した配置図，中段パネルは所望の方向へ制御された空間の割合を示している．また，図の下段パネルは各拡声音源に設



(a) 正面方向へ音像を向けるためのパラメータの検討 (遅延時間制御間隔: 1 ms)



(b) 左前方方向へ音像を向けるためのパラメータの検討 (遅延時間制御間隔: 10 ms)

図 3 構築した音像方向推定システムによるパラメータの検討結果

定された遅延時間のパラメータを示している．図から網羅的な検討ではあるが，設定したパラメータでどの程度の制御が達成されるかを見積もることが可能であることが示された．図 3(b) も異なる条件での検討結果を示したものであり，遅延時間を大きく制御することで，設置空間の 9 割を越える領域において所望の方向に音像を制御可能であることが示された．

#### 4. 研究成果

本研究により，音像定位に関する現象の一つである先行音効果に関する新たな知見が得られた．先行音効果の音源配置に関する依存性に関する検討は，これまで行われたことはなく，本データは聴覚の研究において有意なものと言える．

この先行音効果の知見に基づいて，任意の条件下 (設置空間，音源の設置位置) において，音像の発生方向を事前に推定可能なシステムの基礎を構築した．本システムにより，実際に空間を構築する前に，音像の振る舞いを予測することが可能となったため，拡声システムを設置する空間の構築に掛かるコスト低減などに寄与できる可能性がある．

本研究における最終目標である音源位置に対応して，動的に音像方向を変更するシステムの構築までには至らなかった．しかし，音像方向推定システムにより音像方向を任意の方向に向けるためのパラメータを検討することは本研究により可能となった．今後は，そのパラメータを算出するアルゴリズム

を構築し、実装することで、最終目標を達成することが可能であると考えます。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 7 件)

1. 安倍幸治, 宇田川祥太, 高根昭一, 渡邊貫治, 西口正之, 先行音効果を利用した拡声システムにおける音像方向推定に関する検討, 日本音響学会, 2016/3/10, 横浜桐蔭大学
2. 宇田川祥太, 安倍幸治, 高根昭一, 西口正之, 渡邊貫治, 先行音効果を考慮した拡声時の音像定位方向の推定に関する検討, 日本音響学会聴覚研究会, 2016/2/20, 那覇市 IT 創造館
3. 安倍幸治, 佐々木崇紘, 高根昭一, 佐藤宗純, 渡邊貫治, 3 番目の音源が先行音効果による音像知覚に与える影響に関する検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 2014/9/3, 北海学園大学
4. 宇田川祥太, 安倍幸治, 高根昭一, 佐藤宗純, 渡邊貫治, 音源配置が先行音効果に及ぼす影響に関する実験及び検討 - 聴取者後方に音源が配置された場合 -, 日本音響学会秋季研究発表会, 2014/9/3, 北海学園大学
5. 宇田川祥太, 安倍幸治, 高根昭一, 佐藤宗純, 渡邊貫治, 聴取者後方に音源が存在する場合の先行音効果の振る舞いに関する検討, 電気関係学会東北支部連合体会, 2014/8/22, 山形大学
6. 安倍幸治, 佐々木崇紘, 高根昭一, 佐藤宗純, 渡邊貫治, 3 番目の音源が先行音効果の振る舞いに与える影響に関する実験的検討, 日本音響学会聴覚研究会, 2014/8/19-20, 東北学院大学
7. 安倍幸治, 志賀健太, 高根昭一, 佐藤宗純, 渡邊貫治, 先行音効果による音像定位に仰角方向の音源配置が及ぼす影響に関する検討, 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 2014/3/10-12, 日本大学理工学部

[図書](計 0)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安倍 幸治 (ABE KOJI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号: 50315652

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: