任意の対象人物への非装着型音声伝達システムのための基礎検討

大谷 拓也^{*1} 孫 瀟^{*2} 小川 駿也^{*3} 鈴木 滋英^{*3}
 山田 晃久^{*3} 小西 瑤果^{*3} 清水 智壮^{*3}
 正宗 賢^{*2} 村垣 善浩^{*2} 高西 淳夫^{*3*4}

Basic Study for Non-wearable Voice Transmission System to Target Person

Takuya Otani^{*1}, Xiao Sun^{*2}, Shunya Ogawa^{*3}, Jiei Suzuki^{*3},
 Akihisa Yamada^{*3}, Yoka Konishi^{*3}, Tomoaki Shimizu^{*3},
 Ken Masamune^{*2}, Yoshihiro Muragaki^{*2} and Atsuo Takanishi^{*3*4}

In a small room such as an operating room where there are multiple staff, some orders should be transmitted to a selected person. For achieving this without any wearable devices, we developed a voice transmission system using a parametric speaker. To use a parametric speaker in a small room, we had some experiments to investigate sound pressure characteristics in a small room and understandability of the transmitted voice with MOS. As a result, it was confirmed that the transmitted voice, which has possibility that reflect on the wall and reach to a not selected person, could be heard clearly.

Key Words: Voice Transmission, Parametric Speaker, Robotics, Operating Room

1. はじめに

外科手術には多くのスタッフが携わりそれぞれ多種多様なタスクを担っている。手術室内は、患者への細菌やウイルスの付着が万が一にも起こらないよう衛生管理を徹底するため、患者自身だけでなく患者に接触する物品への接触の可能性のある手術室内のスタッフは手術室への入退室の度に清潔を維持するためのマスク・帽子・手袋・術衣着用などの衛生対策を行い、特に術者は滅菌対応に十分に気を配ることが求められる。そのような環境下において、各スタッフ間もしくは外部から術者等へ情報伝達を行う必要があるが、全員が共有する必要がなく特定の人物にのみ伝えたい情報も多い。特に音声での作業指示や指導は頻繁に行われるが、これをスタッフ全体に共有すると余計な情報を処理するために本来のタスクへの集中を乱してしまう。特定の人物への情報伝達手段としてイヤホンの使用が考えられ製品化もされているが、冒頭で述べた衛生管理を徹底するため、手術室内スタッフは可能な限り身に付ける物品を減らすことが望ましい。そこで、強い指向性を持つ音声を出力可能なパラメトリックスピーカに着目した。パラメトリックスピーカは、約

60 [deg] 程度の指向性を持つ超音波を発生する超音波スピーカ素子を同平面上に複数個並べることで、指向性を高めたスピーカである [1]。狭い空間にピンポイントに音声を伝達可能なため、アミューズメント施設でのアトラクション説明などに利用されている [2]。また、非常に高い指向性を持つため壁面での反射を利用して壁面を介した音声伝達などの用途も注目されている [3]~[5]。木村らは映像を映しているスクリーンの特定の位置に音波を当てて反射させたうえで視聴者に音声を伝えることによる音像提示を提案している [3]。西浦は複数のパラメトリックスピーカを集約したユニットから音声を放射することで壁や天井に反射させた三次元音像提示を実現している [4]。長尾らはガラス面に音を反射させることで特定位置の鑑賞者に特定方向からの音声提示を提案している [5]。

本研究が対象とする作業中の人物への音声伝達では、音声伝達対象の人物を適宜選択しその人物にのみ正確に音声を出力できる必要があるが、先行研究では広い空間における音声提示を行っているのに対し、手術室のような狭い室内に複数人のスタッフが存在する場面では、パラメトリックスピーカの特性である反射音も可聴であることおよび音の減衰が少ないことにより、対象者以外の人物も音声を聞き取る可能性がある。そのため、狭い空間内での壁面反射も含めたスピーカ音圧特性を調査する必要がある。また、出力される音声コミュニケーションに十分な品質である必要がある。

本研究では、手術室内の特定のスタッフのみへの音声伝達を可能とする非装着型音声伝達システムを開発し、その性能を調査した。具体的には、操作者が手術室内の映像を確認しながら任意の対象人物へパラメトリックスピーカの向きを操作し発話することが可能なシステムを製作した。また、手術室内でのコ

原稿受付 2020 年 8 月 3 日

^{*1}早稲田大学理工学術院総合研究所

^{*2}東京女子医科大学

^{*3}早稲田大学理工学術院

^{*4}早稲田大学ヒューマノイド研究所

^{*1}Waseda Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

^{*2}Tokyo Women's Medical University

^{*3}Faculty of Science and Engineering, Waseda University

^{*4}Humanoid Robotics Institute, Waseda University

■ 本論文は新規性（要素分野）で評価されました。

コミュニケーションに向けて、特に先行研究で想定される環境に対し狭い屋内環境での複数回の音響反射を含めた音圧特性およびコミュニケーションのため音声の理解度などを調査したため報告する。

2. 非装着型音声伝達システム

2.1 要求仕様

特定の人物のみへの音声伝達を実現するため、以下の要求仕様を定めた。音圧の目安として、騒音などの目安より、通常会話および静かな室内の音圧を要求仕様とした[6]。

- 音声伝達対象者への物理的接触は行わない
- 音声伝達対象者が意味を十分にストレスなく理解可能な音質の伝達が可能である
- 音声伝達対象者への音圧は十分に聞こえるよう 60 [dB] 程度
- 対象者以外への音圧は静寂程度の 40 [dB] 以下

2.2 システム詳細

本システムは、パラメトリックスピーカ、マイク、Pitch, Yaw 方向の角度調整用の 2 軸電動駆動部、手術室内の映像を確認するための USB カメラ、各機器をコントロールする Raspberry Pi から成る。システム構成図を Fig. 1 に、実機外観を Fig. 2 に示す。広い視野を取れるよう部屋内の天井に設置することを想定して軽量とし、本研究のパラメトリックスピーカには、入手性が高く安価な超音波スピーカ素子 (UT1007-Z325R) を 50 個用いた。周波数変調を行った超音波を通常周波数の超音波の 2 種類を同時に発生させることで、2 種の超音波の周波数差のうなりとして可聴域の音が生成される。パラメトリックスピーカを対象人物に向けるため、パラメトリックスピーカの真下に USB カメラを搭載し、USB カメラの画角の中心とスピーカの正面が一致するようにした。Console PC-1 および Console PC-2, Raspberry Pi はそれぞれ ROS を介して通信を行う。操作者は Console PC-1 画面上に表示されたカメラ映像を見ながら、音声伝達対象人物がカメラ映像の中央にくるようにキー操作することで、その人物にスピーカを向けることができる。この際、Console PC-1 から Raspberry Pi にモータ位置指令が送られ、さらにマイコン (Nucleo-F401RE, STMicroelectronics Inc.) を介してモータへ制御指令が送られる。Console PC-1 には発話者用マイクとスピーカが、Console PC-2 にはパラメトリックスピーカと音声伝達対象者用マイクが接続されており、マイクから取得した音声を相互のスピーカで再生することで会話も可能である。

パラメトリックスピーカの方向調整用の Yaw-Pitch 2 軸電動駆動部には、角度のフィードバック不要で位置制御が可能であり、同じ姿勢の維持に比較的適したステッピングモータを用いた。Yaw 軸駆動用モータはプーリとベルトを介して回転軸に動力を伝達し、これにより重心位置の調整が容易となっている。また、Pitch 軸駆動用モータは Pitch 回転軸を直接駆動する方式とし、スピーカおよびカメラの重量分を相殺するようカウンタウェイトをスピーカ裏に配置し回転軸上に重心位置がくるように設計することで、モータの必要トルクを低減し、モータの小型化・消費電流の低減を行った (Fig. 3)。Yaw 方向回転軸のシャフトには鉛直下向きに重力が加わるため、ボディ下側のベアリングにはラジアル荷重とアキシャル荷重の両方を支えることができるニードルベアリングを使用した。対象人物に狙いを絞った方向調節が可能よう、2 軸電動駆動部によりスピーカおよびマイクの角度は Yaw 方向に 1.2 [deg] および Pitch 方

Fig. 1 Schematic view of the developed system

Fig. 2 Developed voice transmission system

Fig. 3 CAD of the developed system

向に 1.8 [deg] ずつ回転させられる。これにより、音声伝達対象者がスピーカから 3 [m] の位置にいたとしても、Yaw 方向に約 6.2 [cm] ごとに音声伝達対象位置の調整が可能である。回転軸にはフォトセンサを搭載しスピーカの初期角度補正を可能とした。構成部品以外の構造部材は全体の軽量化のため有限要素法解析を行い強度を確認した上で (Fig. 4), PLA (Poly-Lactic Acid) 樹脂の 3D プリント出力により成形した。製作した音声伝達システムの緒元を Table 1 に示す。

3. 評価実験と考察

3.1 室内でのスピーカ音圧特性計測

本実験では、開発したシステムにおいて特定人物のみへの音声伝達が可能であることを確認するため、スピーカから各位置における音圧を測定した。実験方法は、音圧測定器をスピーカ正面の 1, 2, 3 [m] の距離の位置に配置し、スピーカから一定音

Fig. 4 Finite element method analysis of a base part of the developed system. From the analysis, the maximum deflection is less than 0.004 [mm]

Table 1 Specifications of the system

Features	Values
Size mm	70 x 156 x 177
Weight kg	0.83
Movable angle in Pitch deg	± 90
Movable angle in Yaw deg	± 90
Resolution in Pitch deg	1.8
Resolution in Yaw deg	1.2
Rotational speed in Pitch deg/s	270
Rotational speed in Yaw deg/s	180

Fig. 5 Sound pressure level at three measuring points when the speaker angle was changed

量、一定周波数 (400 [Hz]) の音声を再生しながら、正面に対しスピーカを 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 [deg] 回転させた場合の音圧を測定した。また、スピーカからの音声を出力していない状態で実験環境の音圧も測定した。

結果を **Fig. 5** に示す。実験結果より、要求仕様としたとおり、スピーカ正面とそれ以外で大きな音圧差が実現されているため対象人物にのみ聞き取りやすい音声伝達が可能であることが分かった。また、測定位置がスピーカに近いほうが音圧は大きく測定位置が遠くなるにつれて音圧は小さくなるが、これは音の減衰の影響であると考えられる。しかし、スピーカの角度が音圧測定器からずれていくほど音圧が小さくなるわけではなく、測定位置が 1 [m] の場合は 15 [deg] から 45 [deg] までは大きな変化がなく、2, 3 [m] の場合は 30, 75 [deg] ずれたときに音圧が上昇している。これは実際に聞いても違いを感じられるため、音声伝達の対象者以外の人物が音圧測定器の位置にいた

Fig. 6 Sound reflection in the experiment. Three cross marks mean the point of sound pressure measuring instruments. A dotted line means a path to a sound pressure measuring instruments at a distance of 1 [m] from the speaker, a solid line: 2 [m], a broken line: 3 [m]

Table 2 Angles at which the voice reaches due to sound reflection on the wall

Wall	Measure point m	Angle θ deg
A	1.0	42
	2.0	39
	3.0	35
B	1.0	129
	2.0	123
	3.0	119
A and B	1.0	70
	2.0	74
	3.0	78

場合に音声が伝わってしまうことを示している。しかし、音波がスピーカから直接音圧測定器に届いたのではなく、壁面で反射して届いたものと考えられる。本実験で使用した条件の場合、スピーカの角度をずらしていった際にも、壁面 A, B およびその両方での反射が起きうる (**Fig. 6**)。各反射が起きてスピーカに音声が届いた場合のスピーカ角度を **Table 2** にまとめる。この結果より、室内の大きさおよびスピーカ位置、音声伝達対象者の位置によっては、壁面反射により対象の人物以外にも音圧は大きくないものの音声が届く可能性が示唆された。これは、壁面に吸音材を設置するなど反射抑制対策を施すことや、提案システムを複数台設置し対象人物を正確に狙うことができる場所から音声放射することによっても解決可能であると考えられる。また、本実験では出力音圧を一定で実験を行っているため、比較的距離の近い位置には大きい音圧のまま音声が届いていることも考えられる。対象者への距離に合わせて出力すべき音圧は推定可能であるため、対象者までの距離を計測あるいは推定し音圧を制御することにより、対象外の人物にも意味を理解可能な音声が届くことを防ぐことができる。さらに、本研究で対象にした小さい部屋の場合は壁で反射した音声がまた別の壁で反射して、音圧測定器に届くことが確認できた。先行研究でもパラメトリックスピーカの出力音声を壁に反射させることで特定方向からの音源位置定位を可能にしているものがあるが、本研究のような小さい空間の場合、複数の壁の反射を利用することでさらに多方向からの音声伝達が可能であり、障害物やスタッフ

Table 3 MOS value in the experiment

Speaker	Sound quality	Understandability
Male	3.67	4.60
Female	4.17	4.68
Average	3.92	4.64

Fig. 7 Experimental results of subjective evaluation

を考慮して出力方向を変えることが有効であると考えられる。

3.2 音質の主観評価

提案するシステムを用いた音声伝達がコミュニケーションに使用できるかを確認する主観評価実験を行った。室外の話者がマイクに向かって短文を読み上げた音声を室内のスピーカから流し、その音質と内容の理解度を調査した。聞き取る評価者は6名とし、2名の話者にそれぞれ別々の10種類の平易な短文を順番に読み上げてもらった。短文の例を以下に示す。

- 彼の足の怪我は、1ヶ月経っても一向に良くならなかった。
- 部屋の掃除をするついでに、ベッドの位置も変えた。

被験者は、それぞれの文について内容が理解できたか、および実験全体を通して音質が良いと感じたかどうか、について悪い場合を“1”，良い場合を“5”とする5段階で評価してもらいそれらの平均をとる、音声通話の品質評価によく用いられるMOS (Mean Opinion Score) 評価の手法を用いた。

実験結果を **Table 3** および **Fig. 7** に示す。算出した MOS 値によると、男性話者が話した場合の音質は少し低いものの、音質は平均して 3.92、理解度は 4.64 となり、また理解度の標準偏差も約 0.2 程度であり、音声理解に十分使用可能であることが確認できた。

4. 結論と今後の展望

本研究では、手術室における医療従事者への非装着型音声伝達システムを開発した。指向性の高いパラメトリックスピーカの方向を操作者が操作可能なシステムとすることで、任意の対象人物への音声伝達を可能とした。評価実験として、室内におけるスピーカからの距離および角度の違いによる音圧を測定し、正面の人物とそれ以外の人物が受け取る音圧に大きな違いが実現できていること、および壁面反射音により特定の位置での音圧上昇が生じていることを確認し、また音質や音声の理解度についてもコミュニケーションに十分であることを MOS 評価により確認した。

今後は、実環境での運用試験を進めていく。また、音圧評価実験にて明らかになった壁面反射についても、反射音を低減する対策とともに、反射特性を利用することでスピーカと対象者間に障害物がある場合の複数の壁面反射を活用した音声伝達についても検討を進める。これにより、音声伝達対象者への音声伝達経路が複数存在する場合に、障害物やスタッフが存在しない経路を選択する手法の確立を目指す。

謝 辞 本研究は早稲田大学理工学術院総合研究所および早稲田大学ヒューマノイド研究所、早稲田大学次世代ロボット研究機構の下で実施された。また、本研究で用いられた 3DCAD はソリッドワークス・ジャパン株式会社より提供された。各社・官公庁に感謝する。

参 考 文 献

- [1] P.J. Westervelt: “Parametric acoustic array,” The Journal of Acoustical Society of America, 35, pp.535–537, 1963.
- [2] M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo and S. Sanabe: “The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design,” The Journal of Acoustical Society of America, vol.73, pp.1532–1536, 1983.
- [3] 木村, 宝珠山, 谷川, 廣瀬: “超指向性スピーカによる大画面上音像提示システム”, 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, vol.110, no.108, pp.1–6, 2010.
- [4] 西浦: “パラメトリックスピーカを用いた音場再生技術”, 日本音響学会誌, vol.71, no.2, pp.89–94, 2015.
- [5] 長尾, 苗村: “超指向性スピーカ群を用いた鑑賞支援システムの基礎検討”, 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, vol.112, no.25, pp.29–34, 2012.
- [6] 建築設計資料集成〈1〉環境. 日本建築学会, 2001.