

A speech announcement system based on the audio-spot technology in Tohoku Institute of Technology

伊藤 仁
Masashi ITO

概要

Utilizing a parametric speaker and self-demodulation of ultrasound, audio-spot technology enables a listener to hear sound only when he locates at very narrow target position. For educational purpose, a speech announcement system was assembled by students in Tohoku institute of technology on the basis of this technology. The system consists of three modules, human sensor, sound player, and super-directional speaker. Detecting human in front of the system, the human sensor turns on the sound player. Then, the sound player outputs the announcement speech recorded beforehand. Using this signal as an input, the super-directional speaker radiates beam-like ultrasonic wave which turns into audible sound at the listener with self-demodulation mechanism. The sound directivity of the announcement system is examined in a sound-proof chamber. The result indicates that physical energy of the sound gradually decreases with the distance from the center of the system. In the distance of the 1.5 m, perceived loudness halves when listening point shifts to 0.25 m from the center. It is concluded that the system could realize “audio spotlight.”

1. はじめに

オーディオスポットは、空間の限られた領域だけに可聴音を呈示する技術である^[1]。この技術は、例えば図 1 のように天井に設置した 2 つのスピーカーから別々の音を放射するとき、スピーカー A の直下にいる人間には可聴音 A だけが、スピーカー B の下の人間には可聴音 B だけが聞こえ、スピーカーの下にいない人間には何も聞こえないという、いわゆる「音のスポットライト」を可能とするものである。

オーディオスポットには、二つの技術が主要な役割を果たしている。第一は、多数のスピーカーを平面状に配置することで、横方向の音の放射を互いに打ち消し、指向性を高めるパラメトリックスピーカである^[2]。一般的なラウドスピーカを用いた放射では、音のエネルギーは広い領域に拡散し、音のスポットライトを実現することは難しいが、パラメトリックスピーカを用いることで指向性の高い音の放射が可能となる。

第二の要素技術は、超音波の自己復調(self demodulation)である。音の指向性は周波数に応じて高くなる傾向があり、特に 20 kHz 以上の超音波は直進性が高い。また超音波が空気中を伝播する際には、空気自体の質量により波形が非線形的に変化する。この性質を利用して、スピーカーから目的とする可聴音で振幅変調した超音波を放射すると、伝播する過程で自然に可聴音に変化する。これが自己復調である。

一般に音波の指向性を高めるためにはスピーカーの振動板のサイズを大きくする必要があるが、このパラメトリックスピーカと超音波の自己復調を利用したオーディオスポットは安価かつ小型の装置で実現できるため、美術館や駅のホームでの音声案内など幅広い分野での応用が期待されている^[3-5]。また手軽にオーディオスポットを

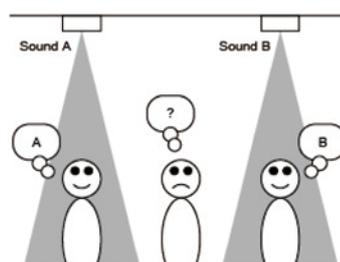


図 1. オーディオスポット

2018 年 11 月 28 日受理

* 電気電子工学科 准教授

体験できる超指向性スピーカーキットなども販売されている⁶⁾。

本稿では、2016～2017 年度の電気電子工学セミナーで製作したオーディオスポットを用いた音声案内システムについて報告する。システムは市販のキットと製品を統合する構成としており、第 2 節でその詳細を述べる。また完成したシステムは、本学史料センターに設置することを目的としているため、設置後にどの程度の性能が見込めるか性能評価実験を行った。第 3 節ではこの実験の結果について述べる。当該セミナーは、電気電子工学科 1 年次の学生が、システム製作を通して電子回路やその実装技術に関して基礎的な知識を身に付けることを目的としている。第 4 節では、この教育効果について簡単にまとめる。

2. 音声案内システムの製作

2.1. 概要

図 2 に音声案内システムの概要を示す。このシステムは、人感センサーで周囲に人間を検知すると、音声再生モジュールを起動し、予め録音していた案内音声を超指向性スピーカーから出力する。前節で述べたように、電子工作に不慣れな学生が製作できるように、市販のキットや製品を統合する形でシステムを構成している (表 1)。以下に、構成モジュールの詳細について述べる。

2.2. 人感センサー

人感センサーとは人間の所在を検知するセンサーであり、赤外線、超音波、可視光などが用いられる。ここでは電子工作の初心者向けであり、可変抵抗器を用いて、感度や持続時間などのパラメータを細かく調整できる PS-3241 (Elekit) というキットを構成部品として採用する。

表 1. 音声案内システムの構成

	品名	型番 (メーカー)
1	人感センサー	PS-3241 (Elekit)
2	音声再生モジュール	MA-8564 (Apod)
3	超指向性スピーカー	SSCI-018425 (Switch science)
4	筐体	MBC200715 (タカチ電機)

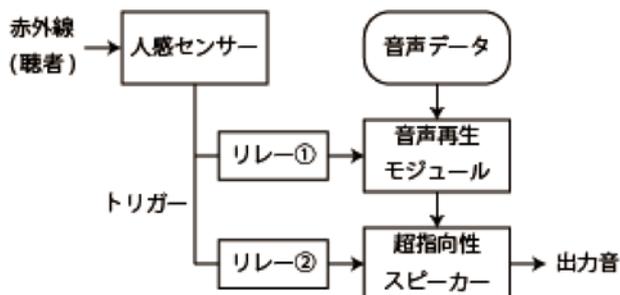


図 2. 音声案内システムの概要

図 3 に PS-3241 の構成と回路図を示す。これは、赤外線センサーの出力電圧が変化した場合に一定時間リレーが ON となる。またキットには明るさセンサーも搭載されており、周囲が暗いときのみ回路を動作させることも可能であるが、本システムの場合、主に周囲が明るい環境で使用することを想定しているため、明るさセンサー調整ボリューム (図 3 上の⑦) は D&B 側に固定し、周囲の明るさに関わらず反応するように設定した。

タイマー時間調整ボリューム (図 3 上の⑧) は、リレーが ON となってから OFF になるまでの時間を定めるもので、1～35 秒まで設定可能だが、ここでは最長時間となる L 側に設定した。なおタイマーは更新型であるため、出力音声は 35 秒以上の長さでもセンサー近傍に人間がいる間は再生が続く仕様となっている。

赤外線センサーの感度も、ボリューム (図の⑥) により調整できるが、この設定は非常に難しい。感度が高いと人間がいない場合にも音声が出力される誤動作が発生するし、逆に感度が低いと人間がいても音声が出力されない。本システムでは、全てのモジュールを筐体に組み込んだ後に、何度か実験を行いボリュームを調整した。

図 3 に示すように、このキットは 1 チャンネルのリレーが出力となる。当初の設計では、このリレーには音声再生モジュールのみを接続し、超指向性スピーカーは常時通電する仕様だったが、超指向性スピーカーの問題^(2.5 節参照)で、2 チャンネルのリレーが必要となった。

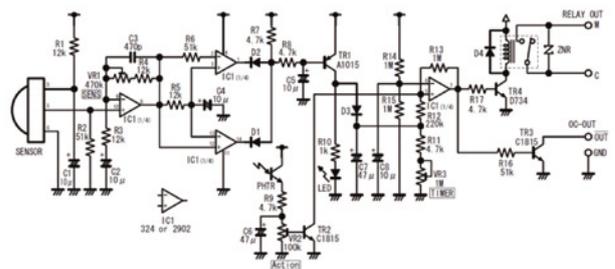
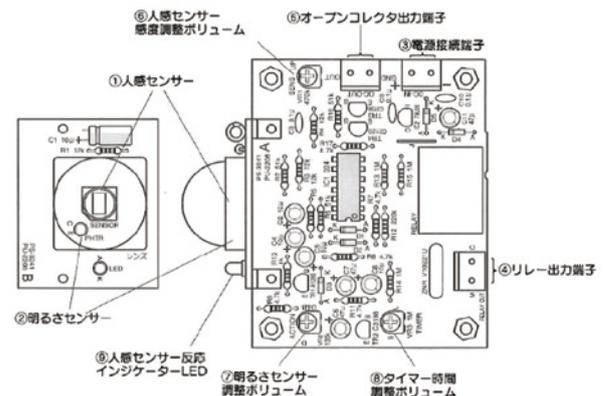


図 3. 人感センサー PS3241

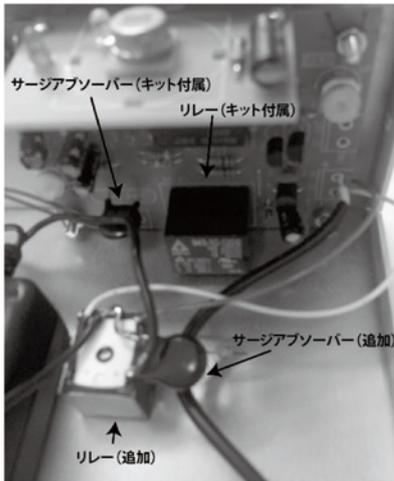


図 4. 人感センサーの改良

この問題に対応するために、回路図のダイオード D4 の両端に配線を追加し、そこにキットで使用しているものと同じリレーとサージアブソーバーを並列に接続した（図 4）。この改良により、人感センサーが反応すると、音声再生モジュールと超指向性キットの両方が通電できるようになった。

2.3. 音声再生モジュール

音声再生モジュールは、人感センサーからのトリガー信号を受けて、案内音声に対応する電圧信号を出力する。これを実現するために、市販のボイスレコーダーキットを試したが、(1)録音できる音声の時間長が短いこと、(2)再生開始位置の設定が複雑であること、(3)装置が大型になることなどの問題を解決できなかった。

例えば(1)の問題は、長時間録音が可能なボイスレコーダーであれば解決可能だが、この様なボイスレコーダーは再生位置を記憶する機能も実装されており、再生中断後に再びトリガー信号が入力されると、音声の先頭ではなく中断位置から再生が再開されるという(2)の問題が発生するのである。これは、例えば別途マイコンを搭載し、トリガー信号を検出するたびにボイスレコーダーに「巻き戻し」と「再生」指令を送信すれば解決できるが、この場合は装置の大型化という(3)の問題が無視できなくなる。

これらの問題を解決するために、本システムでは低機能の MP3 プレーヤーを用いて音声生成モジュールを実現した。APOD MP3 プレーヤー(MA-8564)は、マイクロ SD カードに記録された MP3 音源をイヤホンに出力する小型装置である（図 5）。電源は内部に搭載された 3.8V のリチウムイオンバッテリーから供給され、バッテリーの充電には USB ケーブルを用いる。

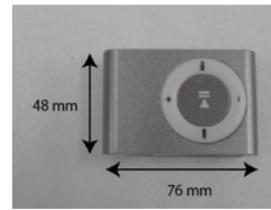


図 5. MP3 プレーヤーの外観

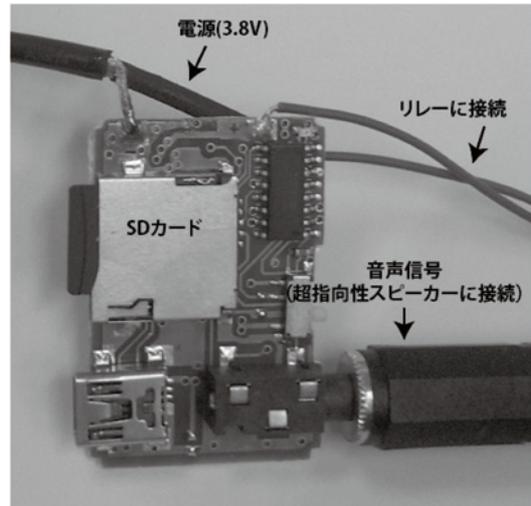


図 6. 音声再生モジュール

このプレーヤーは機能が限定されており、電源を入れると SD カードの先頭の音源を自動的に出力する仕様となっている。本システムでは、このプレーヤーを分解してバッテリーを取り外し、代わりに 3.8V のスイッチング電源を接続した。この電源ラインの中に、前節で述べた人感センサーのリレーを挟むことで、電源のオン/オフを実現する（図 6）。

2.4. 音声データ

案内音声のデータは、音声再生モジュールに挿入するマイクロ SD カードに記録する。このデータは下記のように作成する。まず表 2 に示す文章を成人女性に朗読してもらい、その音声をマイクロホン(Sanwa supply/ MM-MCUSB30)で収録する。音声信号は、サンプリング周波数 44.1 kHz、16 bit で Microsoft WAV 型のデータとして保存する。なお品質の高い案内音声を得るために、言い淀みや言い間違いを除いた文章を複数回収録している。

次に波形編集ソフト(Adobe/Audition)を用いて、録音した WAV データの中から、品質の高い部分を選び出し、発話のタイミングと振幅を調整して結合し、表 2 の 1～3 段落の文章をひとつのファイルとして統合する。最後に、編集した音声データを MP3 型のファイルフォーマットに変換し、マイクロ SD カードに記録する。

表 2. 案内音声

	内容
1	東北工業大学史料センターへ、ようこそ。当センターは、東北工業大学の創立 50 周年を機に、本学の「知の資源」の情報をパネルや実物を用いて分かりやすく展示し、地域社会に向けて「発信する拠点」とすることを目的として設立されました。
2	展示内容は、開学から現在までの歴史、本学に関わりがあり顕著な功績を持つ岩崎俊一先生と秋岡芳夫先生のご紹介、本学の地域連携への取り組み、同窓生から在学生へのメッセージなどです。
3	また当センターは、本学で学んだ技術を実践する場としても活用されています。今聞いて頂いている音声は、本学電気電子工学科の学生が中心となって開発した音声案内システムで、一定の範囲内だけに音が聞こえる「音のスポットライト」の実現を目指したものです。それでは、ゆっくりとご覧下さい。

2.5. 超指向性スピーカー

本システムでは、可聴音を特定の範囲にのみ放射するパラメトリックスピーカーとして、Switch Science 社の超指向性スピーカーキット (SSCI-018425) を利用する。このキットは 49 個の超音波送波器から成るスピーカー部と、ラインレベルの音響信号を入力としてスピーカーを駆動するアンプ (図 7) で構成される。

超音波送波器の共振周波数は 40 kHz で、個々の素子の直進性は高くないが、これを平面状に多数配置することで横方向の音を打ち消し、前方への高い指向性を実現している。超音波出力は単側帯振幅変調 (Single Side-band amplitude modulation) であり、出力された超音波が前方に伝播するうちに、自己復調により振幅包絡に対応する可聴音が発生される。屋内での有効距離は使用場所に依存するが、約 50cm から数 m 程度である。

このスピーカーキットの電源は 12V であり、音声が入力されない場合は、自動的に省電力モードに移行するという仕様になっている⁹⁾。しかし予備実験では、キットに通電したまま使用を続けると、出力される音声の音量が徐々に小さくなるという現象が見られた。また、この様な状態になった場合、電源をオフにしてしばらく放置し、再び通電すると音量が回復することから、この問題は超音波送波器、あるいはアンプに搭載された IC の過熱による不具合が原因であると推測できる。

本システムは、常時設置型の音声案内を目指しているため、長時間の使用が想定される。そこで上記の問題を回避するために、超指向性スピーカーの電源を、人感センサーのリレーを用いてオン/オフする形としている。なお超指向性スピーカーキットの立ち上がり時間 (アタックタイム) は 3 ms であり、この様な回路構成でも人間を検知してから音声が出力されるまでの遅れ時間は問題にならない。

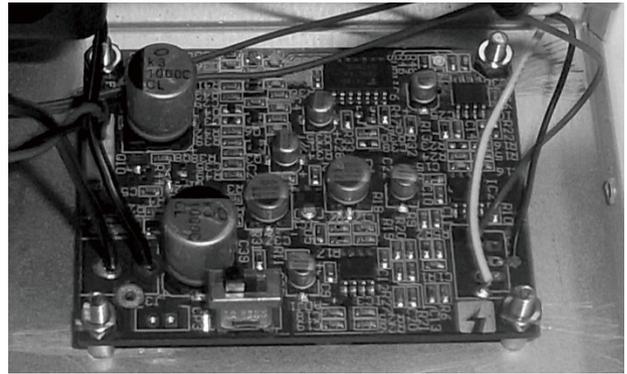


図 7. 超指向性スピーカーアンプ

2.6. モジュールの統合

上述した全てのモジュールを、200×150×75 mm の金属筐体の内部に実装した。筐体の側面底部には、天井に固定するためのフランジが付いている。筐体上面には、超指向性スピーカーの出力音を放射できるよう穴を開け、ワイヤーメッシュで覆っている (図 8 上)。またスペースを有効利用するため、超指向性スピーカーアンプと人感センサーは、筐体の内部側面に実装した (図 8 下)。また本システムでは、超指向性スピーカーの下段に、人感センサー、音声再生モジュール、超指向性スピーカーアンプ用の 3 つのスイッチング電源を配置した。

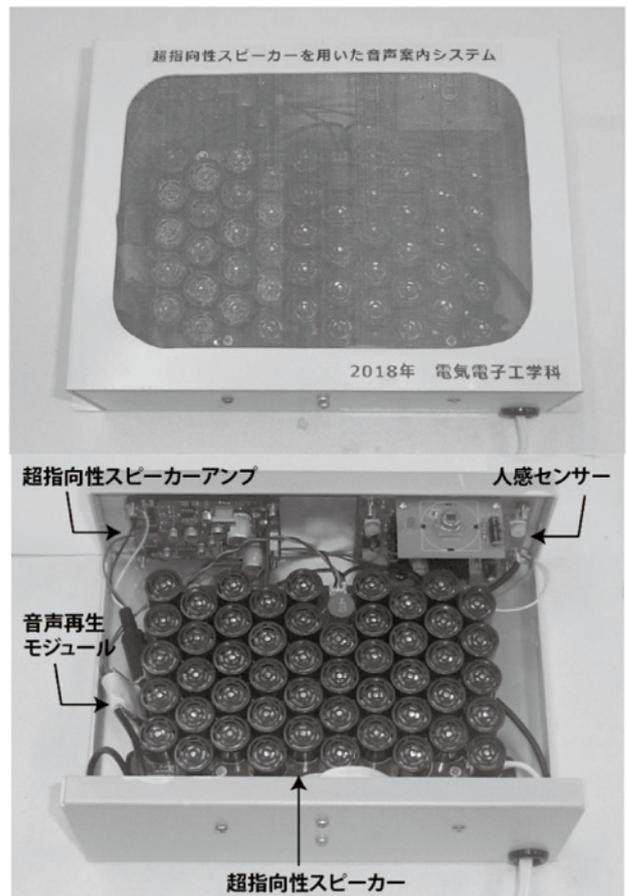


図 8. 製作した音声案内システム

3. 性能評価実験

3.1. 方法

製作した音声案内システムの指向性を調べるために、性能評価実験を行う。防音室でマイクロホン(SONY/ECM-88B)を高さ 1.0 m の位置に固定し、そこから距離 1.5 m の位置に音声案内システムを置く。案内システムは筐体の水平方向の中心がマイクロホンと一致するように設置し、鉛直方向の中心をマイクロホンの高さから $D = 0 \sim 400$ mm の範囲で 50 mm 刻みで変化させる (図 9)。

なお、超指向性スピーカーは同一素子を長方形の基板上に規則的に配置しているため (図 8)、長軸の左右や短軸の前後の指向特性に大きな差はないと予測できる。また短軸方向の素子数は、長軸方向より少ないため指向性が低く、この測定で得られる指向性は本システムの下限に対応する。

出力音は表 2 の案内音声を使用し、それぞれの位置で出力された信号をマイクロホンで収録し、オーディオインターフェース(Roland/UA-25EX)を用いてサンプリング周波数 48 kHz、量子化 32 ビットのデジタルデータとして保存する。なお記録時間は、案内音声の先頭から 23 秒(表 2 の 1 段落目)とする。

3.2. 結果

得られたマイクロホン収録信号には、可聴域(20 Hz~20 kHz)を超える成分が含まれていた。これを抑制するために、得られたデータに帯域通過型フィルタ (Butterworth 特性、12 次、カットオフ周波数 50~5000 Hz) をかける。図 10 に案内音声とマイクロホン収録信号の例を示す。図 10(a)の上段が案内音声信号の音圧波形、下段がそのスペクトログラムである。横軸は時間 0~23 秒に、またスペクトログラムの縦軸は周波数 0~6 kHz にそれぞれ対応する。図 10(b)は $D = 0$ のときのマイクロホン収録信号を、図 10(c)は $D = 400$ mm のマイクロ

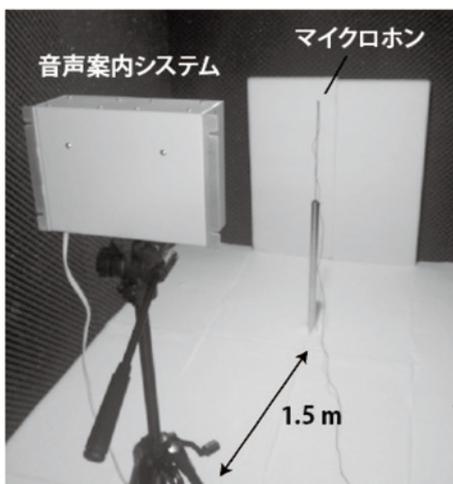


図 9. 性能評価実験

ホン収録信号を表す。これらの図から、案内システムの中心から外れると収録信号の音量が小さくなることが確認できる。収録信号の RMS(Root Mean Square)を計算すると、 $D = 0$ に対する $D = 400$ の RMS 値は -15.7 dB であった。

図 11 に、 $D = 0 \sim 400$ mm における相対 RMS 値を示す。横軸がマイクロホン中心位置からのずれ (mm)を、縦軸が $D = 0$ を基準とした場合の相対 RMS 値(dB)を表す。図から、マイクロホンで観測される音量は、 D に応じて減少する傾向があることが分かる。相対音量 L (dB)を、距離 D (mm)で線

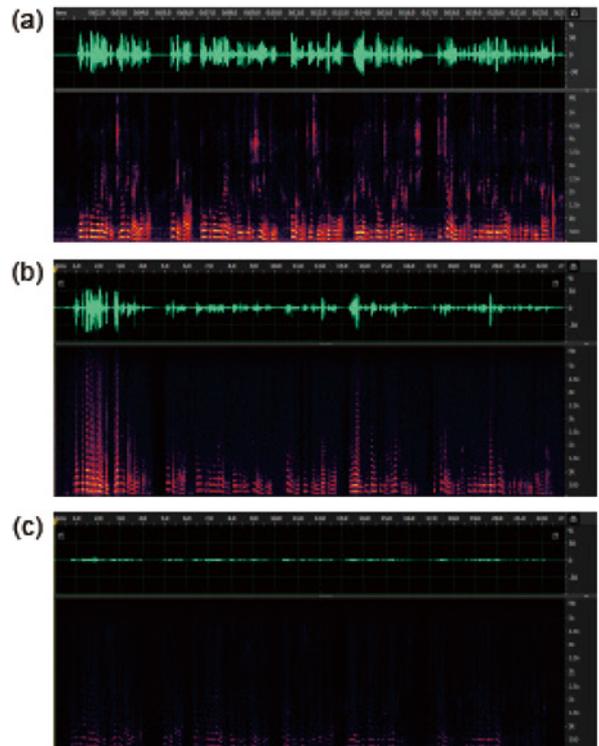


図 10. 案内音声とマイクロホン収録信号

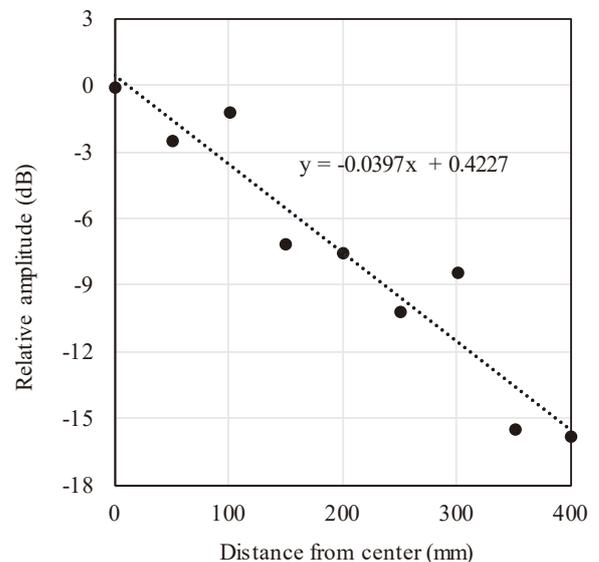


図 11. 音声案内システムの指向性

形近似すると、

$$L = -0.0397 D + 0.423$$

が得られる。よって距離 1.5 m においては、受聴位置が横に 100 mm ずれるごとに音量が約 4 dB 小さくなると言える。なお本学史料センターの床と天井の距離は 2.94 m である。音声案内システムをこの天井に設置する場合、システムと受聴者の耳までの距離は、概ね実験で用いた距離 1.5 m 程度と見積られる。

一般に音の心理的な大きさ（ラウドネス）は、強さの 0.3 乗に比例すると言われている^[7]。よって音圧が 10 dB 低下すると、ラウドネスは半分になる。実験で得られた近似直線から、 $L = -10 \text{ dB}$ となる D を求めると 250 mm となる。従って、本システムを史料センターの天井に設置すると、システムの直下から ±25 cm ほど横に移動することで、音声の知覚的な大きさが概ね半分になると予測できる。

4. おわりに

オーディオスポット技術を利用して、システムの近くに人間が来たときに、その周囲だけに聞こえる音声を自動的に呈示する音声案内システムを製作した。また性能評価実験により、完成したシステムが十分な指向性を持ち、音のスポットライトが実現できることを確認した。この製作は、電気電子工学科の学生が電子回路や実装技術に関して基礎的な知識を身に付けることを目的として企画された。以下にその教育効果について簡単にまとめる。

本製作は 1 年次学生を対象とする電気電子工学セミナーで行ったが、やはり 1.5 時間×15 週という時間的な制約が厳しかった。参加者の大多数は電子工作の経験が無かったため、多くの時間がはんだごての使い方や基礎的な金属加工に費やされ、電子部品の性質や回路の意味など踏み込んだ内容に割ける時間はほとんどなかった。

また当初は、種類の違うキットを用意して、それらの最適な組み合わせを議論し、試行錯誤させる予定だったが、これは電気・電子工学の専門知識を持たない学生には、課題として難易度が高すぎたと言わざるを得ない。この様な課題は、専門教育が進んだ 2 年次以上の学生を対象とすべきであると考えられる。

また市販のキットを活用してシステムを構成するアプローチをとる場合、キット間の相性について予め十分に検討しておくことが重要であることも痛感した。例えば、本製作で人感センサー付きのボイスレコーダーを用いた際には、部品自体は本稿のシステムより容易に組み立てること

ができたのだが、超指向性スピーカーに接続すると出力音声の品質が低く、実用に耐えないという結果になった。この様な製作を教育プログラムとして成立させるには、事前の準備が重要であることを改めて感じた。

本稿の執筆時点で、完成した音声案内システム 1 台を本学史料センターに設置することが決定している。従って、この製作に携わった学生達は、自分たちが作ったシステムの完成版を目にする機会が得られることになる。自分の努力の成果を、目に見える形で確認することは、ものづくりの面白さを学ぶ上で重要な経験である。プロフェッショナルの工学者を目指して日々学ぶ学生達が、この経験を糧に、大きく成長することを切に願う。

謝 辞

本企画にご賛同いただき、多大なご支援を頂いた東北工業大学法人事務局の佐藤亨局長と、教務学生課の目黒裕二課長に深く感謝します。また案内音声の収録にご協力いただいた電気電子工学科の宍戸尚美様に深く感謝します。そして本システムの開発に携わった下記の学生諸君に深く感謝します。

【2016 年度】

宇野陽太, 大内慶介, 岡田涼, 川原優哉, 栗村滉, 黒井廉, 今野颯, 高橋翔, 村上雄紀, 武山慶亮, 濱野恭甫, 増啓人

【2017 年度】

東谷祐人, 石川和樹, 伊藤悠理, 及川一輝, 小野寺充喜, 亀山紘人, 菅野郁也, 後藤太優, 小林孝徳, 佐々木和希, 佐藤光太, 佐藤拓弥, 北條拓哉, 奥山和樹, 斉藤和希, 佐藤岳史, 松本誠也, 渡邊将貴

参 考 文 献

- [1] 西浦敬信, “高臨場音場再現: パラメトリックスピーカーを用いた最新の研究動向,” IEICE Fundamentals Review, Vol.10, No.1, pp.57-64, 2013.
- [2] P. J. Westervelt, “Parametric acoustic array,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, No. 4, pp. 535-537, 1963.
- [3] 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, “パラメトリックスピーカーのためのスペクトル包絡に基づく復調評価指標の策定,” 信学論(D), vol. J96-D, no. 3, pp. 655-663, 2013.
- [4] 松井唯, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成,” 電子情報通信学会論文誌(A), Vol.J97-A, No.4, pp.304-312, 2014.
- [5] 小森慎也, 益永翔平, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, “フレキシブルパラメトリックスピーカーを用いたオーディオスポットの制御,” 日本バーチャリアリティ学会誌, Vol.20, No. 3, p. 189-198, 2015.
- [6] スイッチサイエンス, “超指向性 超音波スピーカーキット,” <https://www.switch-science.com/catalog/1842>.
- [7] B. C. J. ムーア, “聴覚心理学概論,” 誠信書房, 1994.