

令和元年5月27日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0100

研究課題名(和文) 持続的な回復力を有する環境適応可能な防災無線屋外拡声システムの設計

研究課題名(英文) Design of resilient outdoor mass-notification system

研究代表者

坂本 修一 (Sakamoto, Shuichi)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：60332524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、防災行政無線屋外拡声システムを子局同士をつなぐ動的ネットワークと捉え、一部の子局が機能を失ったとしても、システム全体でその機能を補いサービスエリア全体に聞き取りやすい音声情報を送信するレジリエントな屋外拡声システムの実現を目指した。公衆回線上で動作する屋外拡声システム実験用プラットフォームを構築し、プラットフォーム上でやりとりされる全子局の死活情報に基づいて、いかなる状況においてもサービスエリアのできるだけ広い範囲に音情報の伝達が可能な再生レベル決定アルゴリズムを考案した。さらに、親密度や単語間ポーズを考慮することで、劣悪な聴取環境でも頑健に音声情報伝達可能な音声提示技術を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非常時にシステムの全てが正常に機能するという前提で構築されてきた防災無線屋外拡声システムを、ロングパスエコーなど音声聴取を妨げる様々な要因に対する頑健性も保ちつつ、音声の聴こえという観点から発展させており、安全、安心を実現する社会システムの実現に資する社会的な意義が極めて高い。得られた成果は、音響工学の知見が基盤となりつつも、様々な関連分野への展開も容易である。例えば、一部の子局の機能喪失を考慮した最適再生レベル決定アルゴリズムは自律分散システムへの適用が可能であるほか、長距離伝搬にも頑健な音声信号創出アルゴリズムは多目的ホールの設計などへの応用が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Outdoor mass-notification systems can effectively convey emergency announcements over wide areas without requiring special receiver devices. However, they are designed under the assumption that all of their components will operate without flaw. If parts of the system are damaged, this can result in serious problems that quickly propagate, causing the whole system to fail. To cope with this kind of problems, we proposed an intelligent mass-notification system. In the proposal, each node communicates its status. The system identifies the nodes as active or inactive and adaptively adjusts the output levels of all loudspeakers based on this information. In addition, we developed an advanced speech presentation method robust to long-path echo conditions by controlling word familiarity and inserting pauses between phrases.

研究分野：音声知覚工学

キーワード：防災 音声通信 レジリエント ネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

市役所・町役場等の親局から無線で音声情報を送信し、行政区内各所の屋外に設置したスピーカから不特定多数の住民に向けてその音声情報を放送するシステム、すなわち、「防災行政無線」の屋外拡声システムは、80%近い市町村で整備され、日本全国で住民が災害情報を始めとする行政組織からの情報を受け取る際に広く用いられている。受け手が特別な装置なしに情報受信が可能なデジタルディバイドの問題がないシステムとして、現在においても非常時等に果たす役割は大きい。実際に、(社)日本音響学会において2015年4月に「災害等非常時屋外拡声システム性能確保のための規準案(第1版)」が発行されるなど、屋外拡声システムの高度化に関する動きも見られるようになってきている。

しかし東日本大震災では、地震による停電、倒壊などにより一部の子局がその機能を失われた結果、本来サービスエリア全体に送信されるべき音声情報が届かなかった地域が発生した。そもそもこのような非常時において本来の機能を最大限に発揮することが期待されるシステムが、システム設計時に構成する全ての機器が完全に動作することを前提にしている現状は由々しき問題であり、その高度化は喫緊の課題である。このようなシステムが非常時でも十二分に機能するためには、様々な環境の変化にも動的、かつ、柔軟に対応でき、システム全体であらゆる場面でも本来の機能を果たすレジリエント(回復力)なシステムへの高度化が必須である。さらに、人間の「聞こえ」を明らかにする知覚心理学的な知見や、その知見を活用した高度なデジタル信号処理技術の活用が極めて重要となる。

2. 研究の目的

本申請では、屋外拡声システムを子局同士が動的に情報を伝達、共有しあうネットワークと捉え、一部の子局が機能を失ったとしても、システム全体でその機能を補いサービスエリア全体に聞き取りやすい音声情報を送信する、レジリエントな屋外拡声システム(図1)を構築し、更に、音声聴取阻害要因であるロングパスエコー(周囲の環境からの反射によりある時間遅れで到来する音声)や、背景騒音や雨などの様々な聴取環境の変化にも対応することで、屋外拡声システムという大規模システムを様々な障害にも頑健なシステムとして強化する。

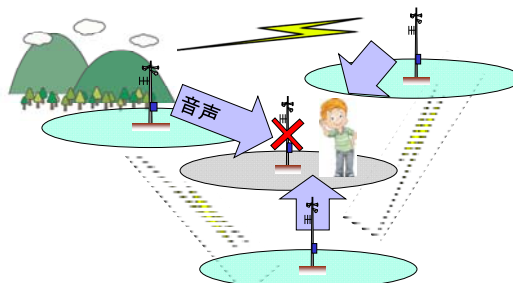


図1 本申請で構築するシステムのイメージ図

3. 研究の方法

構築するシステムに必要な要件は、I) 全子局がネットワークを介して接続されてそれぞれの状態を把握、II) 個々の子局には周囲の音響環境を把握するマイクロホンが設置されておりそれを介して状況確認、III) 機能停止した子局を即座に捉えてその周囲の子局でカバーエリアを補って聞こえやすい音声を出力、に整理することができる。一部の子局の機能停止により、残存した子局のカバーエリアは広がることになる。したがってその子局から出力される音は、単に音圧を大きくするだけでなく、長距離伝搬による周波数特性の変化や、ロングパスエコーや周囲の音響環境の影響にも頑健となるように、時間・周波数特性にも着目した処理が必須である。

そこで、具体的な研究テーマとして、(1) 複数の子局からなる屋外拡声システム実験用プラットフォームの構築、(2) 任意の子局の機能停止が発生した際の残存子局群による聴取環境適応型音声信号出力アルゴリズムの開発、(3) 長距離伝搬による音声の明瞭性低下にも頑健な音声提示技術の開発の3点を掲げて研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 複数子局からなる屋外拡声システム実験用プラットフォームの構築

様々な環境の変化にも動的、かつ、柔軟に対応できるレジリエントなシステムの構築には、屋外拡声システムを子局同士が動的に情報を伝達、共有しあうネットワークとして捉えることが重要となる。このような概念を実現するシステムとして提案されたインテリジェント拡声システムは、拡声装置を有するネットワークノード(子局)で構成されており、ノード間相互で連携を構成し、サービスエリア内でのノード間の同時放射の抑制、さらには指向性制御および反射音の低減を目的としたパワー制御機能を有する。さらに個々のノードの自立性を高めることで、何かしらの原因でノードへの情報伝達が不可能になった場合に、音放射タイミングの再計算および再構成を行うことが可能となる。

本研究では、有線LAN、無線LANによって設計・実装されていたこれまでのシステムを実際の公衆ネットワーク回線にて動作させることを念頭に、実装時の問題点の洗い出しとそれに基づいた設計指針を構築した。具体的には、公衆ネットワーク回線上においてノード間をVPN接続による擬似的な占有ネットワークとして考えてシステム設計を行うこととした。その際には、いずれのノードを喪失してもそのネットワーク接続を維持し続ける制御の設計および実装が必要であることから、GPS、マイクロホン、スピーカ、ネットワークデバイスで構成された各ノードをネットワーク回線に接続し、互いの死活情報を常時やりとりさせた。図2に示すよ

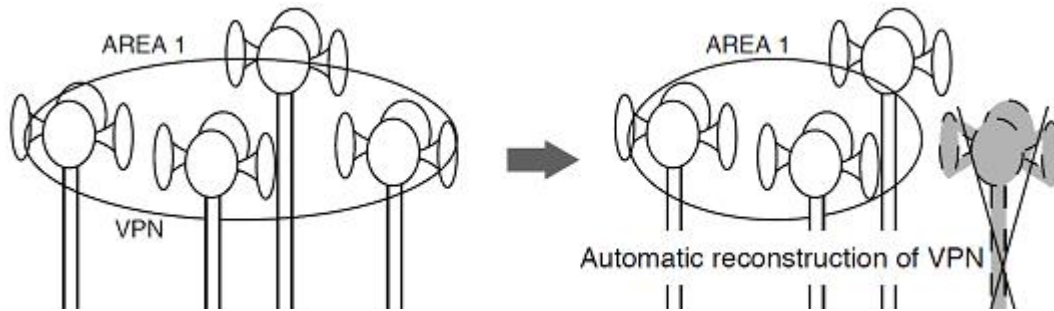


図2 VPNネットワークの自動更新のイメージ

うにあるノードが動作しなくなった場合は、定常運用状態のクライアント・サーバの関係からVPNクライアント機能で動作しているノードでは自動的に情報更新を行って新たなネットワークを構築し、VPNサーバ機能を有するノードでは自律的にVPNのサーバ機能を移転して独立したネットワークを再構築するように実装した。

(2) 聴取環境適応型音声信号出力アルゴリズムの開発

上記のように一部のノードが機能停止した場合、残されたノードを使ってサービスエリア全体へ音情報を伝達する必要がある。しかし、残されたノードから出力される音の大きさを大きくするだけでは、近接するノードから出力される音が重なって聴きづらくなるロングパスエコー問題がより顕在化するだけでなく、ノード近辺の聴取者にはうるさくて聴きとりづらい状況が発生することになる。そこで、聴き取りという観点での新たな指標を導入し、その指標を最大化するように各ノードから出力される音の音圧を決定するアルゴリズムを考案した。

導入した指標は U_{50} (Useful-to-detrimental ratio) をベースにした。 U_{50} は初期到来音から 50 ms 以内に到来する反射音 (エコー) までを信号 (S)、それ以降に到来するエコーおよび環境雑音を雑音 (N) とした際の S/N として定義されるものである。この U_{50} を拡張した確率的 U_{50} を導入するとともに、想定するエリア全体の確率的 U_{50} が一定以上となるように各子局の再生レベルを決定するようにアルゴリズムを考案した。図3は、実際に屋外拡声システムが導入されている箇所のサービスエリアとノードの配置図に基づいて、提案アルゴリズムと従来法 (全ノードが同じ音圧で情報を提示) で決定された音圧で音情報を提示した際の U_{50} の分布とその差分を示している。特にサービスエリアの周辺地域で U_{50} が改善されていることが分かり、提案アルゴリズムの有効性が示されている。(1)のシステムでは、屋外拡声子局同士の死活情報を互いに監視していることから、これを組み合わせることで、機能停止したノードの情報に基づいて再生レベルを適切に変化させることができ、いかなる状況においてもサービスエリアのできるだけ広い範囲に音情報の伝達を行うことができるようになる。

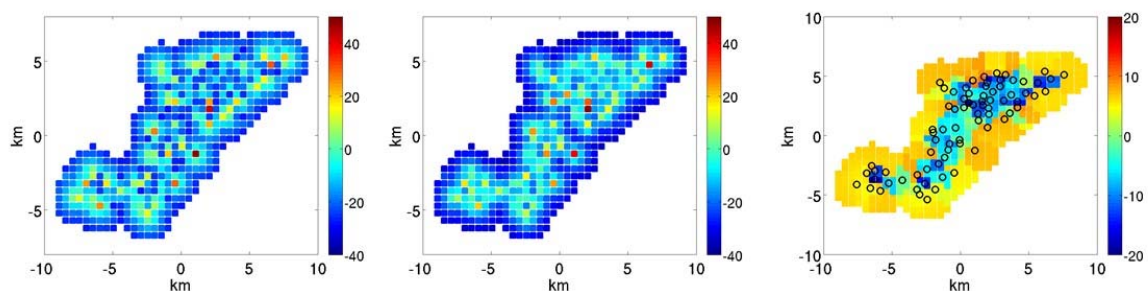


図3 提案アルゴリズム (左) と従来法 (中央) で決定された音圧で情報を提示した際の U_{50} の分布とその差分 (右)

(3) 聴取環境の変化に頑健な音声提示技術の開発

劣悪な聴取環境においても頑健に音声伝達が可能な音声提示技術の開発は、防災行政無線屋外拡声システムに限らず、これまで様々な聴取環境を対象に研究がなされてきた。本研究では、騒音環境下と聴力が低下した高齢者のそれぞれで効果が明らかとなっている音声提示技術を屋外拡声システム適用環境に応用し、ロングパスエコーが存在しても音声伝達が可能な方法を検討した。

まず、騒音環境下での音声聴取に大きな役割を果たす「親密度」に着目した。親密度は単語のなじみの程度を示す指標であり、これまでの研究結果から、高親密度語は劣悪な聴取環境でも聴取者は容易に聴き取れることが明らかとなっている。この知見を応用し、ロングパスエコー環境下での親密度の影響を聴取実験によって明らかにした。図4は実際に行った音声了解度試験結果を示している。A~Gは様々なロングパスエコー環境を模擬した条件で、何れの環境でも高親密度語の方が低親密度語に比べ高い了解度を示していることが分かる。また、別の実験により、高親密度語は低親密度語に比べ、どのような語がロングパスエコーとして重畳され

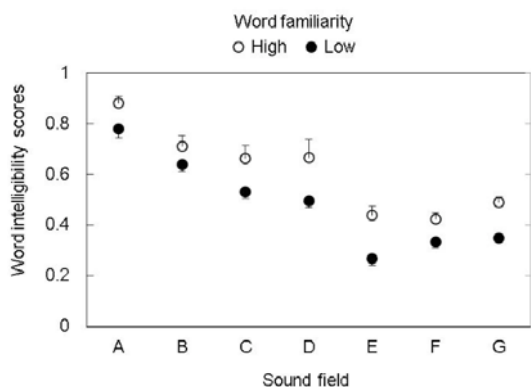


図4 ロングパスエコー環境下での音声了解度に親密度が与える影響

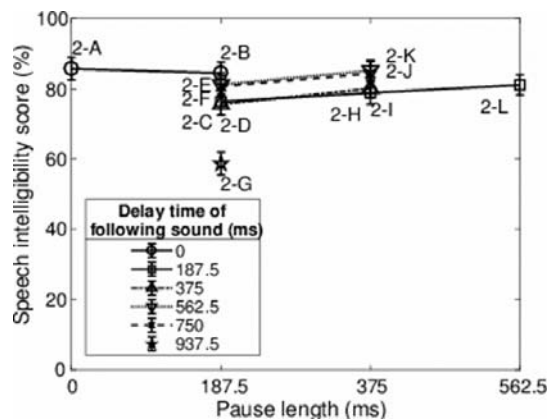


図5 ロングパスエコー環境下での音声了解度にポーズ挿入が与える影響

たととしても、頑健に聴き取りが可能であることが示された。これらの結果から、ロングパスエコー環境下でも頑健に音声伝達が可能な高親密度語の効果が明らかとなった。

一方、ロングパスエコーで到来する音声は直接音として到来する聴き取るべき音声が遅れて到来しているだけであるという点に着目し、音声の単語やフレーズ間に適切な長さの空白を挿入する方法も提案した。この方法は高齢者に対して音声伝達を行う際の有効な方法として既に知見が得られており、高齢者など加齢に伴い情報処理能力が低下した状況において、十分な処理時間を確保することができるという点で有効であることが明らかとなっている。ロングパスエコー環境下も劣悪な聴取環境で、劣化した音声を聴取、処理するには心的負荷が高くなることから、同様の寄与が見込まれる。さらに空白部分におけるロングパスエコーと直接音の両方が聴取可能となり、より高い音声聴取性能が期待される。図5はこれらを示すために行った聴取実験結果であり、ポーズ挿入の効果を明らかにしたものである。2-C~2-Lは様々なロングパスエコー環境を模擬したものであり、図5からも分かるとおり、2-Gを除く何れの聴取環境でもロングパスエコーが存在しない2-A、2-Bと同程度の了解度が得られている。

以上、(1)~(3)の成果により、防災行政無線屋外拡声システムの高度化に資する知見が得られたと考えている。これらの成果を統合することで、災害時にこそ本来の力を発揮することが期待される屋外拡声システムという大規模システムが、様々な障害が発生した際にも頑健にシステムが動作することが期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

- (1) S. Sakamoto, T. Miyashita, Z. Cui, M. Morimoto, Y. Suzuki, and H. Sato, "Effects of inter-word pauses on speech intelligibility under long-path echo conditions," *Applied Acoustics*, 140, 263-274, 2018 (査読有)
DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.01.020
- (2) R. Nishimura, S. Enomoto, and H. Kato, "Speech privacy for sound surveillance using super-resolution based on maximum likelihood and bayesian linear regression," *IEICE Transaction on Information and Systems*, 101, 53-63, 2018 (査読有)
DOI: 10.1587/transinf.2017MUP0003
- (3) 西村竜一, 坂本修一, 荻木禎史, 崔正烈, "防災行政無線屋外拡声レベルのU50に基づく最適設計", *電子情報通信学会技術研究報告*, EA2017-146, 245-250, 2018 (査読無)
- (4) 上田祐己, 荻木禎史, 坂本修一, 西村竜一, 崔正烈, "屋外拡声システムにおける回復力のあるノード間ネットワークの設計と実装", *電子情報通信学会技術研究報告*, EA2017-147, 251-254, 2018 (査読無)
- (5) Z. Cui, S. Sakamoto, M. Morimoto, Y. Suzuki, and H. Sato, "Effect of word familiarity on word intelligibility of four continuous words under long-path echo conditions," *Applied Acoustics*, 124, 30-37, 2017 (査読有)
DOI: 10.1016/j.apacoust.2017.02.001
- (6) R. Nishimura, S. Sakamoto, Y. Chisaki, and Z. Cui, "Method for updating microphone configuration in audio super-resolution," *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 8, 1352-1361, 2017 (査読有)
- (7) 鈴木優太, 荻木禎史, "屋外拡声放送を用いた反射位置推定システムのGUIに関する検討", *EA2017-95*, 13-18, 2017 (査読無)
- (8) 崔正烈, 坂本修一, 田村祐揮, 鈴木陽一, "ロングパスエコー下における既存の緊急速報を模した4連単語の了解度", *電子情報通信学会技術報告*, EA2016-26, 379-383, 2016 (査読無)

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 渋谷壮, 崔正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, 邑本俊亮, “背景音の付加が避難行動を喚起する音情報提示に与える影響”, 平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会(優秀発表賞受賞), 2019
- (2) 坂本修一, “単語・文章了解度試験を用いた様々な聴取環境における音声聴取能力測定手法の開発”, 電子情報通信学会音声研究会(招待講演), 2019
- (3) 川島拓海, 白井匠, 菫木禎史, “インテリジェント屋外拡声ノードの自律制御の検討”, 電子情報通信学会応用音響研究会, 2019
- (4) Z. Cui, M. Suzuki, S. Sakamoto and Y. Suzuki, “Effects of inter-word pause and speech rate on word intelligibility in a long-path echo environment: For improvement of outdoor mass notification sound systems,” 25th International Congress on Sound and Vibration (ICSV25) (招待講演), 2018
- (5) 西村竜一, 坂本修一, 菫木禎史, 崔正烈, “防災行政無線屋外拡声装置群の最適再生レベル決定法に関する検討”, 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会, 2018
- (6) 崔正烈, 坂本修一, 鈴木陽一, “話速とポーズ長の組合せがロングパスエコー環境下の単語了解度に及ぼす影響”, 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会, 2018
- (7) 遠藤仁, 菫木禎史, 坂本修一, 西村竜一, 崔正烈, “回復力を有する屋外拡声子局の公衆回線利用の検討”, 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会, 2018
- (8) 菫木禎史, 鈴木優太, 増田聖宣, “屋外拡声放送を用いた反射位置推定システムの設計と実装”, 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 2018
- (9) 崔正烈, 鈴木美乃里, 坂本修一, 鈴木陽一, “ロングパスエコー環境下の単語了解度に及ぼす話速とポーズ長の影響”, 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 2017
- (10) S. Sakamoto, Z. Cui, M. Morimoto, and Y. Suzuki, “Optimization of speech presentation in mass-notification sound systems based on word intelligibility,” 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan (招待講演), 2016
- (11) Y. Chisaki and T. Onoguchi, “Improvement of signal to noise ratio at outdoor listening position by sound emission timing control over the Internet for mass notification system,” 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan (招待講演), 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 菫木 禎史
ローマ字氏名: (CHISAKI, Yoshifumi)
所属研究機関名: 千葉工業大学
部局名: 先進工学部
職名: 教授
研究者番号(8桁): 50284740

研究分担者氏名: 西村 竜一
ローマ字氏名: (NISHIMURA, Ryouichi)
所属研究機関名: 情報通信研究機構
部局名: 耐災害 ICT 研究センター応用領域研究室
職名: 主任研究員
研究者番号(8桁): 30323116

研究分担者氏名: 崔 正烈
ローマ字氏名: (CUI, Zhenglie)
所属研究機関名: 東北大学
部局名: 電気通信研究所
職名: 助教
研究者番号(8桁): 60398097

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。