

〔論 文〕

音空間把握に必要な音響伝送特性推定における 計測用音源信号の一検討

福島 学*, 平野 智也*, 徳富 響*, 沖田 和久*², 梨子木 快晴*, 河納 隼一*³, 近藤 善隆*⁴

*日本文理大学工学部情報メディア学科

*²日本文理大学大学院工学研究科環境情報学専攻

*³株式会社アーネット

*⁴株式会社ジェイテック

A Study on Sound Source Signals for Estimating Sound Transmission Characteristics Necessary for Spatial Awareness

Manabu FUKUSHIMA*, Tomoya HIRANO*, Hibiki TOKUTOMI*,
Kazuhisa OKITA*², Kaisei NASHIKI*, Syun'ichi KAWANO*³,
Yoshitaka KONDO*⁴

*Department of Media Technologies, School of Engineering, Nippon Bunri University

*²Department of Environmental Engineering and Applied Information Science,
Graduate School of Engineering, Nippon Bunri University

*³Artnet Co., Ltd.

*⁴J-TEC Co., Ltd.

Abstract

The importance of understanding acoustic space has become crucial in our daily lives. This understanding is based on the impulse response, prompting us to investigate the sound source signals used for measurements, which significantly influence measurement accuracy. In this study, we employed the DLR-CS method, one of the measurement techniques, and conducted a comparison based on the noise floor and estimation results. The findings revealed that white noise and TRaPS (Time Random Permuted Sinusoidal signal) enable us to 1) conduct measurements and 2) perform two-system measurements with two sources and one observation point. TRaPS offer the advantage of easy creation, unlike the need for a Monte Carlo method to generate an uncorrelated white signal for two-source measurements. Additionally, TRaPS demonstrated a tendency to achieve higher accuracy for estimates with smaller amplitudes and larger power. These results are anticipated to form the foundation for acoustic design and implementation techniques in virtual spaces such as the Metaverse.

キーワード：音空間，把握，計測，音源信号，伝送特性

Keywords : acoustic space, awareness, measurement, acoustic signal source,
acoustic transmission characteristics

1. はじめに

空間を把握する技術は、建築構造物における設計と施工後の検証である。例えば光学的に確認可能な範囲は目視検査、構造物内部は非破壊検査、が行われている。その中で音響設計が必要となる教室や講堂においては音響物理特性による評価が行われる⁽¹⁾。このため、音空間の計測が必要となっている⁽²⁻³⁾。

これまでは音響計測は音響設計された、または学校等のように規制対象の空間で行われることが中心であり、一般家屋等においては計測されることが少なかった。しかし、新型コロナ感染により屋内に居ることが多くなったこともあり、音環境に対する関心が高くなっている。またメタバースをはじめとする仮想空間におけるリアリティの需要が高くなっている。これは、ゲーム等の特殊用途ではなく、ビジネスモデルに基づく社会的なニーズとしての高まりである。その中で Japan Hearing Vision が提唱され⁽⁴⁻⁵⁾、ますます音空間の計測の必要性が高くなっている。

2. 空間伝送特性計測

2-1 計測の原理

音空間の把握とは、音の伝搬現象を物理的に計測し、その結果を分析し指標化することで行う。音の伝搬現象は、時間領域記述（インパルス応答）と周波数領域記述（伝達関数）の2種類があり、その総称が伝達特性である。音の伝搬現象は、音源信号 $x(t)$ が空間に放射され、観測信号 $y(t)$ に至る現象を

$$y(t) = \int x(t - \tau)h(\tau) d\tau \quad (1)$$

と記述する。ここで $h(t)$ がインパルス応答である。インパルス応答は、音源からマイクまでの直接届く直達音、壁面等に反射してから到来する反射音で構成される。すなわち、音速 $c(m/s)$ により幾何的距離を時間に変換したものがインパルス応答である。音の伝搬は波動伝搬そのものであるので、波動方程式が時間と空間で記述されることを考えると、インパルス応答は、音源と観測点を固定した際の波動方程式の解であることがわかる。

伝達関数はこのインパルス応答の周波数記述であるので、フーリエ変換により得ることができる。伝達関数は、その空間において、共振現象等を知るために使われるものである。

2-2 計測手法

インパルス応答を計測する方法について考える。式(1)をフーリエ変換すると

$$\begin{aligned} Y(f) &= \int y(t)e^{-i\omega t}dt \\ &= \int \int x(t - \tau)h(\tau) d\tau dt \\ &= X(f)H(f) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。式(2)において $H(f)$ を求めるには、 $X(f)$ に零点が存在することから $Y(f)$ を $X(f)$ で除算出来ない。このため、

$$H(f) = (X^*(f)Y(f))/(X^*(f)X(f)) \quad (3)$$

により解くクロススペクトル法が提案されている。これを離散で正しく計算する方法が DLR-CS 法⁽⁶⁻⁹⁾である。

実際の計測においては平均操作を行うため、一定時間内で系が変化しないことを前提としている。DLR-CS 法は、TSP 法のように計測時に予め時間を決める必要がなく、計測後に任意に変更することが可能である。このため、系の変化に対して追従することが可能である⁽¹⁰⁾。さらに、音速により時間と距離を変換できる特性とインパルス応答に反射特性が記述されていることから、マイクを中心点とした距離を計測することが可能である⁽¹¹⁻¹²⁾。さらに分析結果から音環境を改善するための音響素材の開発⁽¹³⁻¹⁶⁾に展開している。

改めて式(3)を考えると、これらの音環境およびそれを改善するための素材の性質を得るために重要なインパルス応答の計測精度において、計測で使用する音源信号が重要であることがわかる。

そこでここでは計測に使用する音信号（音源信号）について、1) 推定精度、2) 推定結果、の2点で検討する。

2-3 音源信号

式(3)で示した通り、音源信号に求められる性質はパワースペクトルが0以外の一定値、すなわち式(1)を行列計算で考えた時の単位行列の係数倍にすることが重要である。この条件を満たす信号は、1) インパルス、2) 無相関信号系列、である。

1) インパルスは理論的に成立するが、実際に使用する際に音響再生装置の出力に制限があることから計測に必要なエネルギーが得られないという問題がある。このため、1) インパルス信号を時間掃引する TSP (Time Stretched Pulse) がある。しかし、TSP は掃引時間という制限があるため、DLR-CS のメリットである分析時の分析区間の柔軟性を損なう。

2) 無相関信号系列、には一様分布ランダム信号（ホ

ワイトノイズ／白色雑音）や M 系列信号がある。この信号は振幅範囲が ± 1 であればその実効値は 0.5 となる。一方で M 系列信号は ± 1 の信号すなわち離散インパルス（符号により 2 種類）が時間方向にランダムにすることで実効値を 1 とした状態で無相関の条件を満足している。

実効値を調整する方法として正弦波（sin）を使用することを考える。単一周期の正弦波は線スペクトルであるが、M 系列と同様に時間方向にランダムに入れ替えることでそのパワースペクトルを全域に一定にすることが出来る。

そこで、ここでは白色雑音と正弦波の時間方向ランダム化信号（TRaPS：Time Random Permuted Sinusoidal signal）を音源信号として比較する。

一般に音響伝達特性は冒頭で述べた通り 1 音源・1 観測で求める。しかし、メタバースにおける臨場感のように両耳で受聴する音環境の特性計測も必要である。

そこで、白色雑音として無相関な 2 系列と、同様に無相関な TRaPS を考える。TRaPS の元となる正弦波（sin）は、その直交信号として位相角が $\pi/2$ ずれた余弦波（cos）が存在する。そこで、両者の瞬時振幅を保持することで 2 つの TRaPS が直交の条件を維持する。

図 1 に互いに無相関な信号系列の冒頭 50 サンプルを示す。このサンプルは相互相関係数が一定値以下となることを確認した信号である。

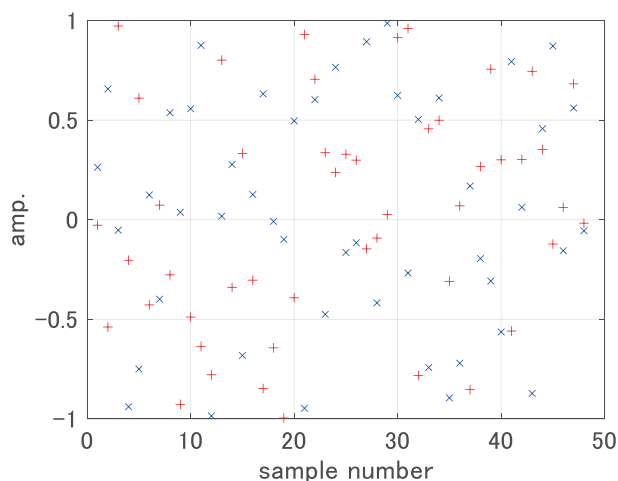


図 1 作成した互いに無相関な 2 系列の白色雑音
青：系統 1，赤：系統 2

次に数学的に直交が保証されている正弦波と余弦波に基づいて TRaPS を作成する。図 2 に元となる波形を示す。図 2 に青で示す系統 1 と赤で示す系統 2 を比較すると、片方が ± 1 の時にもう片方が 0 付近となっており直

交条件を満たしていることが確認できる。

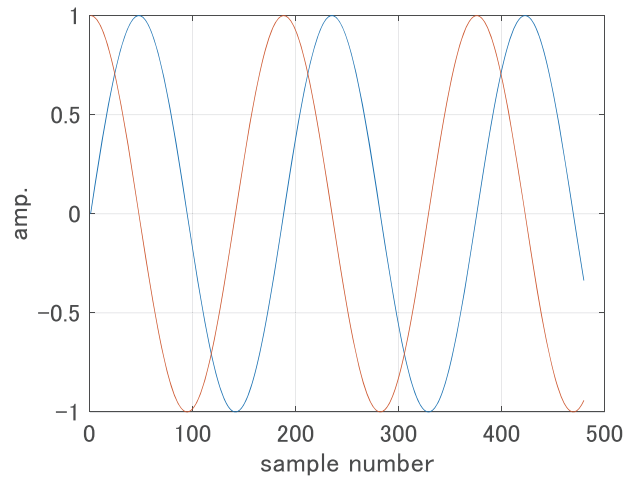


図 2 作成した正弦波 $\sin(\omega t)$ (青) と余弦波 $\sin(\omega t + \pi/2)$ (赤) (レッドノイズ・純音 (Sinusoidal Signal))

図 2 に示した波形を時間方向にランダムに並び替えを行った結果を図 3 に示す。

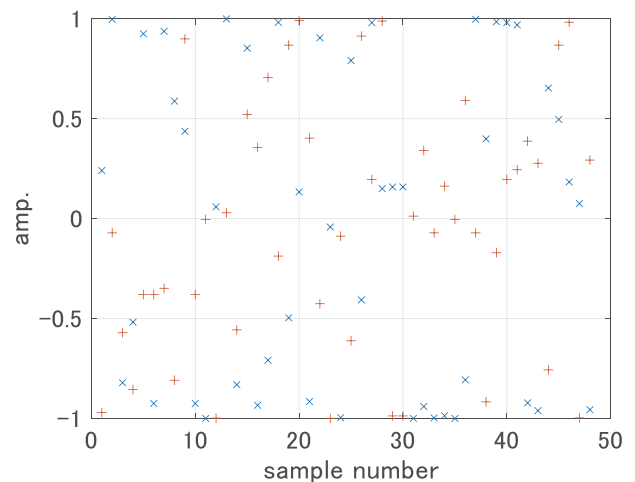


図 3 レッドノイズ／純音を時間入替によりノイズ化した信号 (以下、時間方向ランダム化信号 (TRaPS：Time Random Permuted Sinusoidal signal))

図 1 と比較して図 3 は図 2 と同様に片方が ± 1 の時にもう片方が 0 付近となっており直交条件を満たしていることが確認できる。

図 1 から図 3 に示した信号の、時間波形、パワースペクトルおよび時間波形の振幅ヒストグラムを確認するため、それらを図 4 から図 6 に示す。

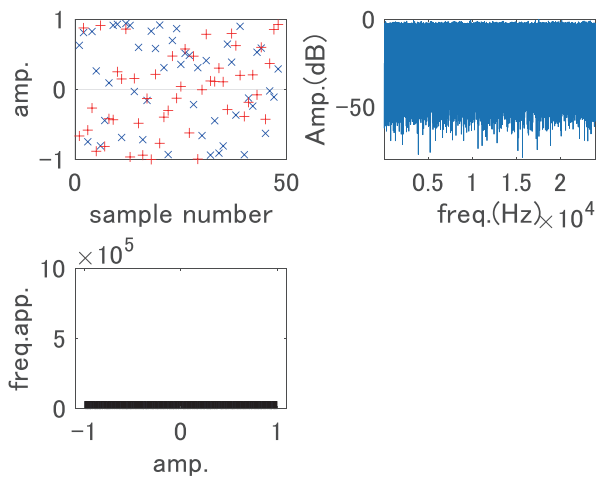


図4 作成した白色雑音の性質
左上：時間波形 右上：周波数振幅スペクトル
左下：振幅出現頻度（ヒストグラム）

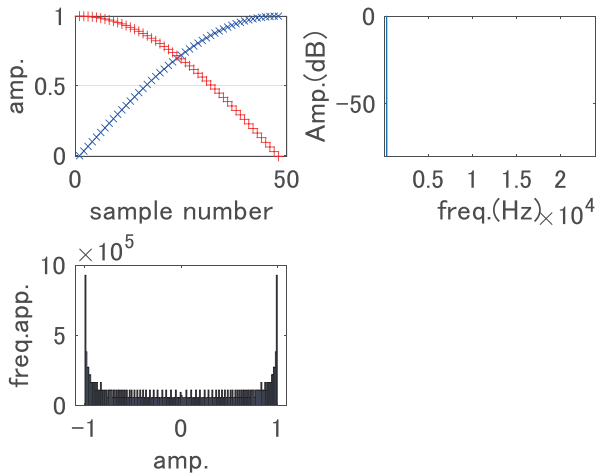


図5 純音の性質
左上：時間波形 右上：周波数振幅スペクトル
左下：振幅出現頻度（ヒストグラム）

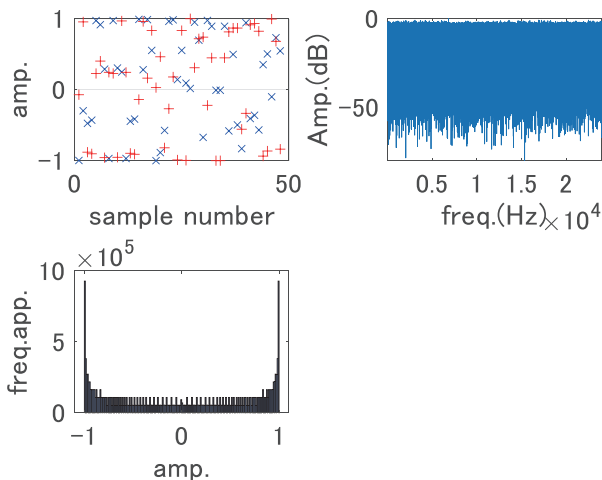


図6 純音時間方向ランダム化信号（TRaPS）の性質
左上：時間波形 右上：周波数振幅スペクトル
左下：振幅出現頻度（ヒストグラム）

3. 検証実験

作成した信号によりインパルス応答を推定し、いずれの信号系列が計測用信号に適しているかを評価する。

ここでは観測信号を作成するためインパルス応答を図7に示すものとする。

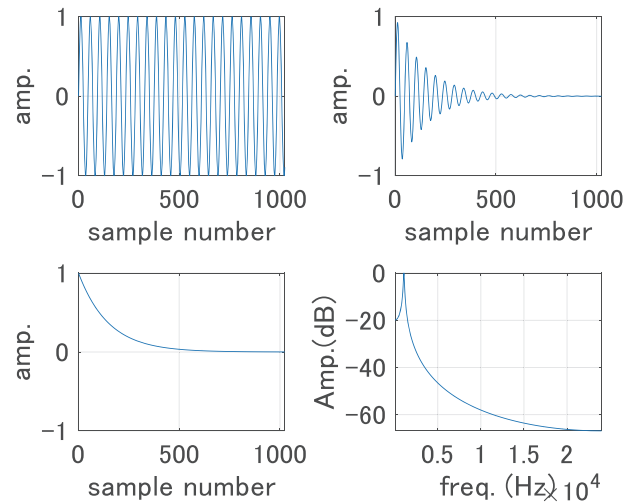


図7 単峰系インパルス応答(IR：Impulse Response)／伝達関数(TF：Transfer Function)の作成
左上：キャリア（純音） 右上：インパルス応答 IR
左下：包絡線 ($e^{-\alpha t}$) 右下：伝達関数 TF

インパルス応答推定では、Nサンプル区間を推定範囲とし計算する。観測信号はNサンプルよりも大きいため、gapサンプルだけずらして同じ計算を行い、その平均値から推定値の精度を上げる。gapサンプルが大きいほど、同じ平均回数で必要とする総サンプル数を多く必要とする。そこで、ここでは、gapを、1) N/2, 2) N/4, 3) N/8, 4) N/16, とし、平均操作回数による精度すなわち最小値を示す noise floor のレベルがどう変化するかを調べる。その結果を図8から図10に示す。

計測に適している信号であれば同一平均操作回数で noise floor が小さい値になることが予想され、白色雑音および TRaPS は予想通りの結果となっている。そこで、いずれが平均操作による精度向上率が高いかを比較するため、gap = N/2の条件で比較する。その結果を図11に示す。

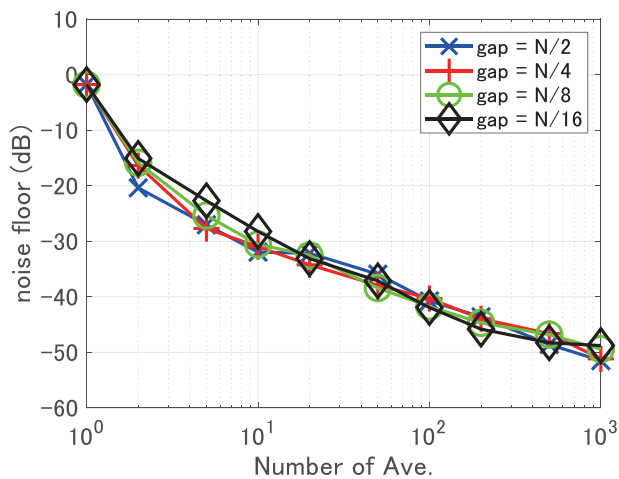


図8 白色雑音を使用した平均操作回数・gap・noise floor の関係

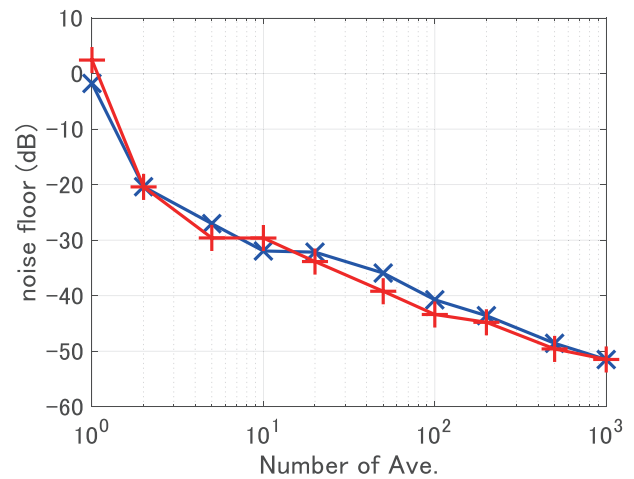


図11 白色雑音と TRaPS の平均操作回数による noise floor 低下の比較 (gap=N/2)

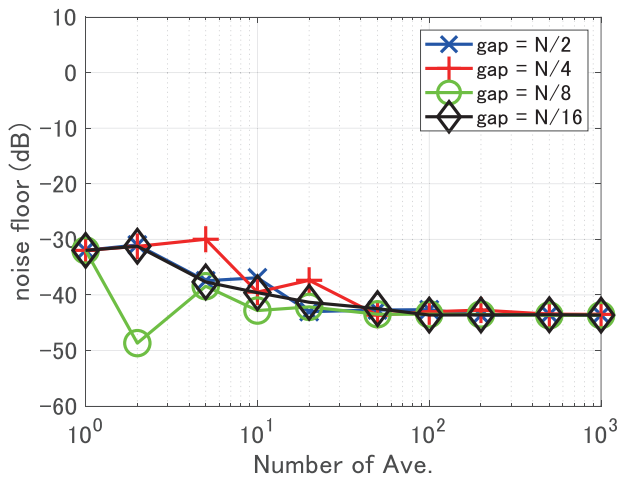


図9 純音を使用した平均操作回数・gap・noise floor の関係

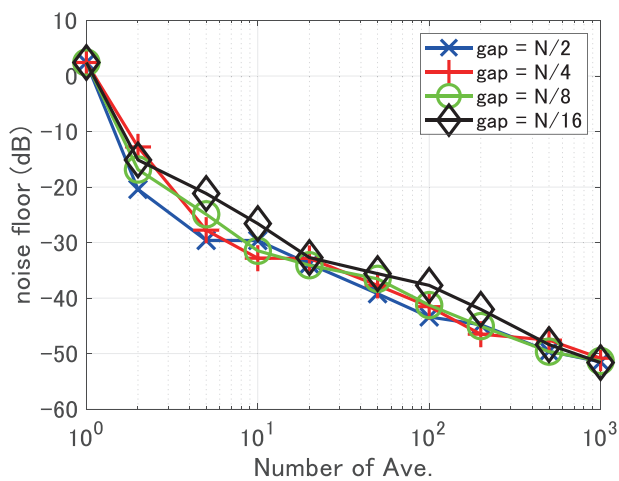


図10 TRaPS を使用した平均操作回数・gap・noise floor の関係

図11は、平均操作回数が10回を超えると TRaPS の方が若干 noise floor が低くなることを示しているが、ほぼ同じであることを示している。

次に、図9に示した純音の場合 noise floor が横ばいになっているが推定インパルス応答が図7となれているかを確認する。その結果を図12から図14に示す。なお、1段目および3段目に示す時間波形は振幅絶対値を dB で示している。

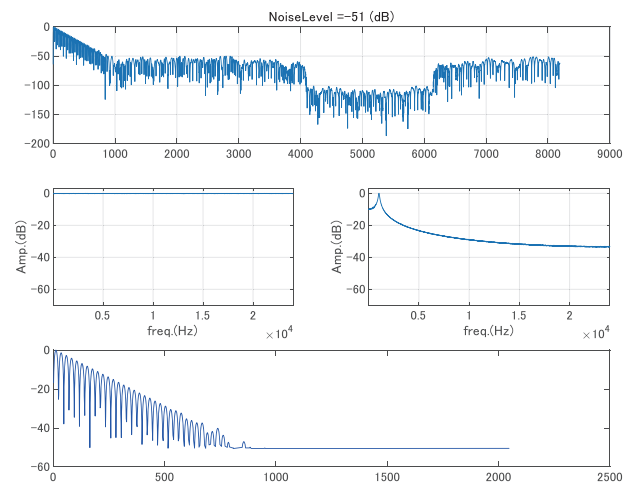


図12 白色雑音を使用して推定した音響伝送特性
1 段目：DLR 推定値 (左1/4が推定インパルス応答)
2 段目：左 音源の振幅スペクトル
右 伝達関数の振幅スペクトル
3 段目：推定インパルス応答

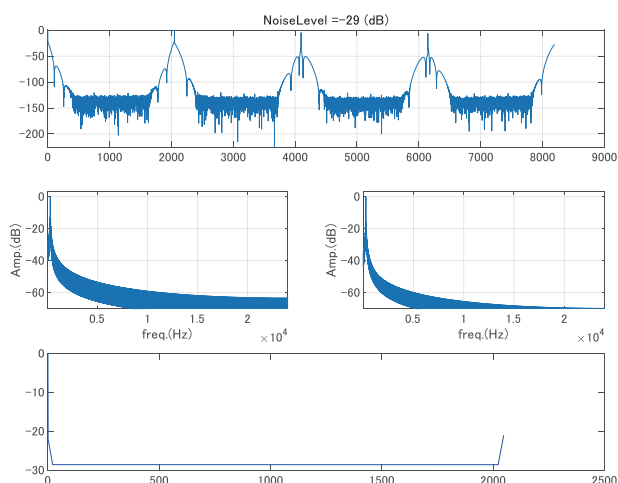


図13 純音を使用して推定した音響伝送特性
 1 段目：DLR 推定値 (左1/4が推定インパルス応答)
 2 段目：左 音源の振幅スペクトル
 右 伝達関数の振幅スペクトル
 3 段目：推定インパルス応答

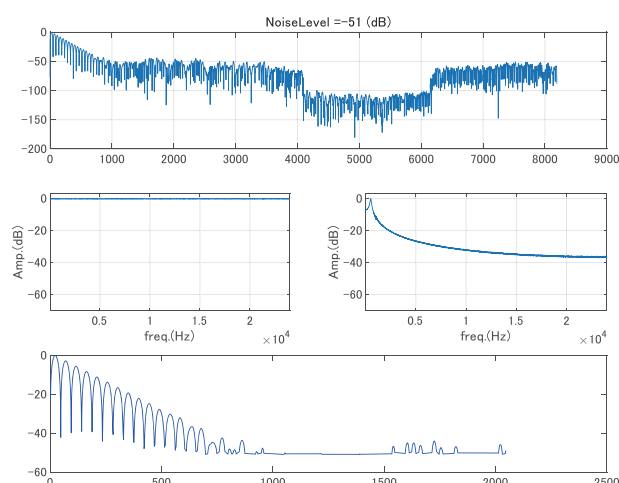


図15 図12で使した白色雑音と無相関な白色雑音で推定したインパルス応答
 1 段目：DLR 推定値 (左1/4が推定インパルス応答)
 2 段目：左 音源の振幅スペクトル
 右 伝達関数の振幅スペクトル
 3 段目：推定インパルス応答

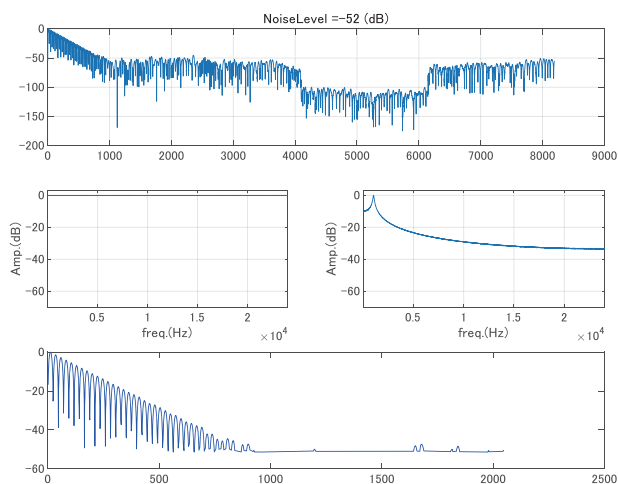


図14 TRaPS を使用して推定した音響伝送特性
 1 段目：DLR 推定値 (左1/4が推定インパルス応答)
 2 段目：左 音源の振幅スペクトル
 右 伝達関数の振幅スペクトル
 3 段目：推定インパルス応答

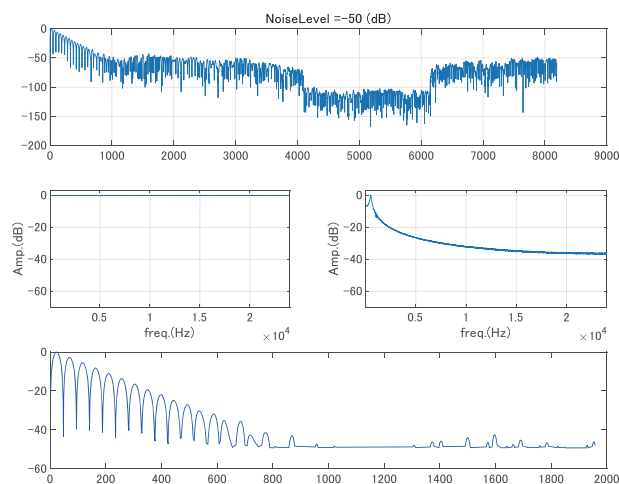


図16 図14で使した白色雑音と無相関な白色雑音で推定したインパルス応答
 1 段目：DLR 推定値 (左1/4が推定インパルス応答)
 2 段目：左 音源の振幅スペクトル
 右 伝達関数の振幅スペクトル
 3 段目：推定インパルス応答

ここで2系統同時計測が可能であることを確かめる。ここでは2系統のインパルス応答を用意し、それぞれに作成した観測信号を混合して観測信号として使用する。

図15に図12と無相関な白色雑音を用いて推定したインパルス応答を示す。同様に図16に図14と直交となる信号の結果を示す。

図12と図15を比較すると、混合信号から各系統のインパルス応答が求められていることが確認できる。同様に図14と図16も同様に推定出来ていることが確認できる。両者の推定結果を比較する。その結果を図17に示す。図は赤線で白色雑音、青線でTRaPSによる推定結果を示している。

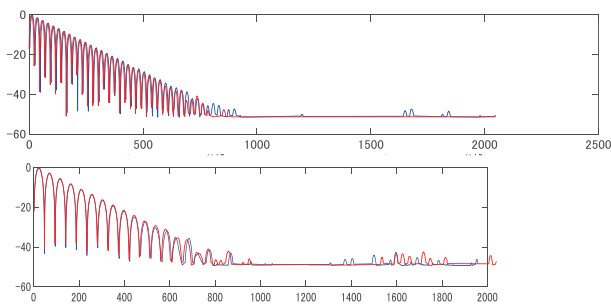


図17 推定インパルス応答の音源信号による比較
上段：系統1，下段：系統2

図17は、いずれの推定値も振幅が -40dB よりも小さい範囲で差を生じ、図7に示した作成したインパルス応答と比較すると TRaPS を用いた方が精度が高い傾向にある。いずれにしても、無相関信号系列を適切に使用することで、2系統のインパルス応答の同時計測が可能であることが確認できた。

4. おわりに

音空間の把握の必要性が日常生活でも重要となっている。把握はインパルス応答に基づいて行われていることに着目し、計測精度に影響する音源信号について検討した。ここでは計測手法の1つである DLR-CS 法を使用し、noise floor および推定結果から比較を行った。

その結果、白色雑音および TRaPS (Time Random Permuted Sinusoidal signal) により、1) 計測が可能であること、2) 2音源1観測点の2系統計測が可能であること、が明らかとなった。2系統計測の無相関白色信号を作成するのはモンテカルロ法を使用する等が必要であるが、TRaPS は容易に作成できるメリットがある。また、振幅が小さい推定値に関してパワーが大きくなる TRaPS が精度が高い傾向であった。

参考文献

- (1) 子安勝, 橘秀樹, “建築物に関する音響規格の動向”, 日本音響学会誌, Vol. 53, No. 6, pp. 483-486, 1997
- (2) 佐藤史明, “室内音響インパルス応答の測定技術”, 音響学会誌, Vol. 58, pp. 669-676, 2002
- (3) 佐藤史明, “はじめてのインパルス応答計測 (やさしい解説)”, 日本音響学会誌, Vol. 67, No. 4, pp. 155-162, 2011
- (4) 厚生労働省, “難聴への対応に関する省内連絡会

議”, https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000191192_00013.html (2023年10月1日アクセス)

- (5) 自民党・難聴対策推進議連, “Japan Hearing Vision2019年”, <https://www.mhlw.go.jp/content/12200000/001073457.pdf> (2023年10月1日アクセス)
- (6) 福島学, 城戸健一, “クロススペクトル法によるインパルスレスポンス推定における推定誤差の検討”, 日本音響学会誌, pp. 265-274, 55巻, 4号, 1999
- (7) Manabu Fukushima, Takatoshi Okuno, Hirofumi Yanagawa, Ken'iti Kido, “Improvement of the Accuracy in Attenuation Constant Estimation using the Cross-Spectral Technique”, J. IEICE (E), pp. 626-633, Vol. E82-A, No. 4, 1999
- (8) Takatoshi Okuno, Manabu Fukushima, Mikio Toyama, “Adaptive cross-spectral technique for acoustic echo cancellation”, J. IEICE (E), pp. 634-639, Vol. E82-A, No. 4, 1999
- (9) Ken'iti Kido, Hideo Suzuki, Takahiko Ono, Manabu Fukushima, “Deformation of Impulse Response Estimates by Time Window in Cross Spectral Technique”, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), pp. 349-361, Vol. 19, No. 5, 1998
- (10) Kiyooki Terada, Hirofumi Yanagawa, Mitsuharu Takagiwa, Manabu Fukushima, “Discrimination of temporal change in transient interaural cross-correlation coefficient using band-pass-filtered noise burst convolved with simulated impulse responses”, Acoustic Science and Technology, pp. 289-291, vol. 26, no. 3, 2005
- (11) 鈴木和博, 中迫昇, 中山雅人, 篠原寿広, 上保徹志, 福島学, “クロススペクトル法を用いた位相干渉に基づく音響測距法による対象物位置推定”, 電子情報通信学会論文誌, A, Vol. J97-A, No. 4, pp. 343-346, 2014
- (12) Masato Nakayama, Noboru Nakasako, Tetsuji Uebo, and Manabu Fukushima, “Acoustic distance measurement method based on phase interference using the cross-spectral method”, Acoustical Science and Technology, pp. 197-205, vol 34, no3, 2013
- (13) 沖田和久, 近藤善隆, 福島学, 窪田泰也, “音響素材の反射特性と透過特性計測に関する一検討”,

- 日本文理大学紀要, 第51巻, 第1号, pp. 73-80, 2023年
- (14) 米井嘉一, 福島学, “快眠研究と製品開発, 社会実装”, 株式会社エヌ・ティー・エス, pp. 497-505, 2022年6月30日
- (15) Manabu Fukushima, Shiori Uenaka, Masayuki Yagi, Wakako Takabe, Yoshikazu Yonei, “Effect of the newly developed articulatory panels (Aural Sonic) : A pilot clinical trial”, Glycative Stress Research 7 (2) : 123-131, 2020 (doi : 10.24659/gsr.7.2_123) (<https://www.toukastress.jp/webj/article/2020/GS19-11.pdf>)
- (16) Manabu Fukushima, “Characteristic and function of the newly developed articulatory panels (Aural Sonic)”, Glycative Stress Research 2019 ; 6 (2), 103-112, 2019, (doi : 10.24659/gsr6.2_103) (<http://www.toukastress.jp/webj/article/2019//GS19-05.pdf>)

(2023年11月24日受理)