

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 7 日現在

機関番号：52605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760477

研究課題名(和文) 試験信号を必要としない建造物の健康状態モニタリング

研究課題名(英文) Structural health monitoring without utilizing any test signals

研究代表者

高橋 義典 (Takahashi, Yoshinori)

東京都立産業技術高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：30547732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、雑音振動を用いた建造物のヘルスマニタリング手法についての検討である。風や交通騒音等による僅かな振動を利用した建造物の診断は、試験信号を用いないことから建造物のヘルスマニタリングとして有効とされている。しかしながら、雑音振動を利用したパッシブな診断手法では、音源の特性と伝達特性にあわせて最適な分析窓長を選択することが重要な鍵となる。本研究ではケプストラム比とそれに基づく最適な分析窓長の選択方法を提案した。模型実験では、ケプストラム比が0dB以上では建造物の伝達関数が優位に観測されていることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study is a structural health monitoring using external noise. Building diagnostics using the slight vibration caused by wind or traffic noise is effective for a structural health monitoring. However, selecting the optimum length of windowing is an important key for passive diagnostics. This study proposed a cepstrum ratio and selecting the optimum windowing length based on it. From the model experiment, it was shown that the estimation error of the building eigenfrequency is converged for the cepstrum ratio over 0dB.

研究分野：音響学

キーワード：建造物診断 伝達関数 音響信号処理 ケプストラム

1. 研究開始当初の背景

(1) 診断工学の分野では、対象物を診断用のハンマで叩く或は加振器で試験信号を与え、観測される伝達特性を解析する手法が研究されている[Lyon 1983]. 建造物のダンピング変化は、伝達関数における振幅周波数特性のピーク(固有振動数)の先鋭度合いから発見することができる[Hirata 2005]. しかし、試験信号を用いる従来法では、観測を実施した時しか建造物の健康状態を知る事ができない。

(2) これまでに、風などの環境雑音による建造物の僅かな振動を利用して、建造物の健康状態を常時モニタリングする手法(図 1)の研究を進めてきた[Takahashi 2008]. 通常の周波数分析では、建造物の伝達特性が環境雑音の調波構造に埋もれてしまい、建造物の診断は困難である。我々は、信号の入力過程に伴って過去のスペクトラムに累積加算することで、定常的な調波成分のみを強調する累積調波分析(CHA: Cumulative Harmonic Analysis)[Takahashi 2006]を提案し、雑音振動からの建造物の診断を試みている。既に模型実験によってその有効性を示してきた[Takahashi 2011 a]. これらの成果は、独創性と工学的価値が評価され「The Tokyo U-club 都市に関する研究奨励賞」にて最優秀賞を受賞した[Takahashi 2011 b]. しかし、時変性を含む環境雑音では、雑音源の影響で CHA スペクトラムの先鋭度が変化してしまう[Takahashi 2011 c]. これまでの提案手法を含め、短時間処理に基づく周波数分析では、最適な分析窓長を選択することが重要な鍵となることが知られている[Impedovo 2007]. 検出された変化が音源の性質に因るものか、あるいは建造物のダンピング変化に因るものかの判断、及び最適な分析窓長の決定方法が課題であった。

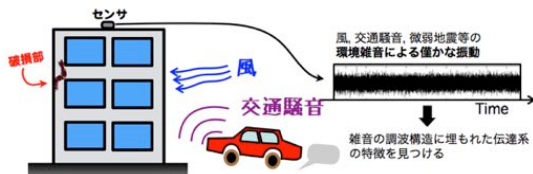


図 1 環境雑音を利用した建造物のモニタリング

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、試験信号を必要としない建造物の常時モニタリング手法の確立である。本研究では、これまでの研究の発展として、建造物の振動に含まれる伝達関数の音源に対する優位性を評価し、診断に有効な観測信号のみを選択する手法を検討する。ケプストラム領域では、観測される建造物の振動ケプストラムが環境雑音ケプストラムと伝達関数ケプストラムの和として表されることに着目し、雑音と伝達関数のケプストラム比を新たに提案する。その上で、ケプストラム比の分析に基づいて、環境雑音に対する伝達関数の優位性と分析窓長の関係を明らかにする。この結果を踏まえ、実建造物の雑音振動を観測するシステムを試験的に構築し、フィールド試験を試みる。

(2) 本研究で提案する建造物の診断は、従来の試験信号を用いる診断手法とは異なり、建造物の健康状態の常時モニタリングを可能にする。本研究では、環境雑音による建造物の僅かな振動を利用するが、特に安全確保が必要な都市部の高層ビル等では、地下鉄や幹線道路等からの振動・騒音など、常に多くの環境雑音にさらされており活躍が期待できる。また、発電設備や航空機などの機械診断も応用が期待できる。また本研究で提案するケプストラム比による音源に対する伝達系の優位性の分析・評価は、例えば、S/N 比では評価しきれなかった残響と音声の明瞭度評価や、インパルス応答のエネルギー減衰だけでは表現が困難であった残響音の音色表現など、伝達系の評価指標として、他分野でも幅広い応用が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 伝達関数と環境雑音のケプストラム比を提案する。環境雑音と建造物インパルス応答の畳み込みは、それらのケプストラムの和として表現できる。建造物の雑音振動を一定時間区間(フレーム)毎に観測した場合、環境雑音の振幅ケプストラムはフレーム間で変化する。一方、建造物の劣化は環境雑音の変動に比べて十分緩やかであると仮定すると、建造物における伝達関数の振幅ケプストラムは、概ね一定な直流成分と見なすことができる。従って、時間領域で一般的に用いられる SNR(signal-to-noise ratio)と同じ要領で、観測信号ケプストラムの時間平均を、その標準偏差で除したものは、時不変な建造物のインパルス応答と時変な外部雑音のケプストラム比として考えることができる。ケプストラム比が 1 より大きければ伝達関数が音源に対して優位であると評価できる。すなわち、観測信号が建造物の診断に適しているか否かの判断としてケプストラム比が有効であると考えられる。

(2) その上で模型実験を実施して、ケプストラム比で表される伝達関数の優位性、分析窓長と分析精度などの関係を検証する。研究開始当初は、時間とともに劣化する模型の製作と、それを使用したモニタリング実験を計画していた。しかし、劣化中の模型から振動特性を従来の診断手法等で測定することで、劣化が進み、提案手法との比較が困難となることが想定された。そこで、強度の異なる 3 種類の模型(図 2)を用いて個々に実験することで、これらの問題を回避する。

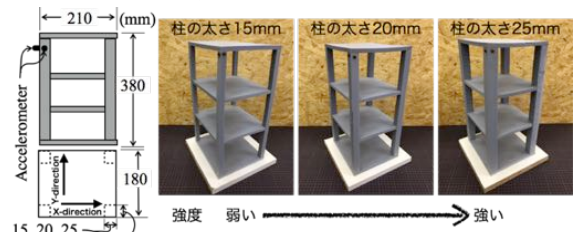


図 2 強度の異なる構造模型

(3) 本研究では、さらに実際の建造物の雑音振動を長期間観測して、提案手法の有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 本研究では時変な雑音振動に伝達系が畳み込まれた信号を観測した際に、伝達関数の優位性を評価する指標として、ケプストラム比を提案した。

① N 点の入力信号 $s(n)$ の振幅ケプストラム (AC: amplitude cepstrum) $c(m)$ は対数振幅スペクトル $\ln|S(k)|$ の逆フーリエ変換

$$c(m) \equiv \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \ln|S(k)| \exp(j2\pi mk/N) \quad (1)$$

として定義される [Tohyama 1998]. ただし $S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp(-j2\pi mk/N)$ とする.

② ケプストラム領域では、信号の畳み込みがケプストラムの和で表される. 観測信号の AC $c(m, l)$ は伝達関数の AC $c_H(m)$ と環境雑音の AC $c_N(m, l)$ の和として $c(m, l) = c_H(m) + c_N(m, l)$ のように表される (図 1). ここで, m はケフレンシの番号 (ケフレンシ τ はサンプリング周波数 f_s を用いて $\tau = m/f_s$), l はフレームの番号を表す. あるケフレンシ $m = \hat{m}$ では、雑音の AC のみがフレーム l の関数であり、時不変な伝達関数の AC は直流分と見なすことができる. 従って、伝達関数の AC $c_H(\hat{m})$ は観測信号 AC $c(\hat{m}, l)$ のフレーム平均値として、

$$c_H(\hat{m}) \cong \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} c(\hat{m}, l) = \mu_c(\hat{m}) \quad (2)$$

のように近似できると考えられる (図 2). ただし, L は観測フレームの総数とする. 即ち、伝達関数の AC の二乗平均平方根 (RMS-AC: root-mean-squared of amplitude-cepstrum) は、観測信号の AC のフレーム平均値 $\mu_c(\hat{m})$ を用いて、

$$\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} c_H^2(\hat{m})} = |c_H(\hat{m})| \cong |\mu_c(\hat{m})| \quad (3)$$

として表される. 一方、環境雑音の RMS-AC は観測信号の AC の標準偏差 $\sigma_c(\hat{m})$ を用いて、

$$\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} c_N^2(\hat{m}, l)} \cong \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \{c(\hat{m}, l) - \mu_c(\hat{m})\}^2} = \sigma_c(\hat{m}) \quad (4)$$

で表せる. 従って、伝達関数の RMS-AC と環境雑音の RMS-AC の比率を表すケプストラム比 $CR(\hat{m})$ は、

$$CR(\hat{m}) \equiv \frac{\sqrt{\frac{1}{L} \sum c_H^2(\hat{m})}}{\sqrt{\frac{1}{L} \sum c_N^2(\hat{m}, l)}} \cong \frac{|\mu_c(\hat{m})|}{\sigma_c(\hat{m})} \quad (5)$$

のように定義できる.

③ ケプストラム比はケフレンシの関数である. そこで本研究では、ケプストラム比 $CR(\hat{m})$ を有効なケフレンシの範囲において合算し、観測信号における伝達系の優位性を評価するインデックス CRI

$$CRI = 10 \log_{10} \sum_{m=1}^{N/2} CR^2(m) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

として用いた. ただし、有効なケフレンシの範囲は分析窓長 N の半分であり、 $m = 0$ のケプストラムは分析区間の信号のエネルギーに因ることから $m = 0$ は総和の計算範囲から除くものとする.

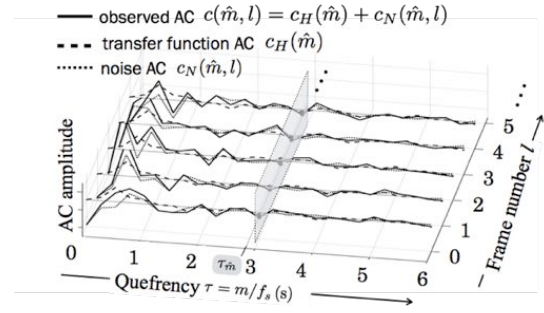


図 3 観測信号のケプストラムの概要

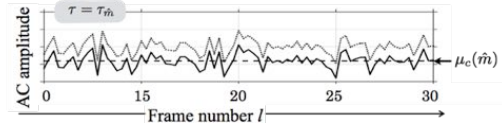


図 4 τ_m における観測信号のケプストラム

(2) 本研究では、環境雑音加振による模型実験を試みた.

① 実験では、模型は柱の太さが 15mm, 20mm, 25mm の 3 種類のウレタン模型 (図 2) に対し、図 5 に示す要領でスピーカ (YAMAHA, MSP5) 4 台による 4 チャンネルサラウンド再生によって、環境雑音加振を行った. 環境雑音は 90 度毎に配置した 4 チャンネルマイクロホンアレーにて同期録音した街頭雑音を用いた. 模型の柱の上部に、加速度ピックアップ (RION, PV-90) を 2 箇所設置し、長辺方向 (X 方向) と短辺方向 (Y 方向) の振動をそれぞれ 250 秒間観測した. ただし、観測される雑音振動は、予め 3-13Hz を通過させる帯域通過フィルタによって処理され、必要な周波数帯域のみ抽出した.

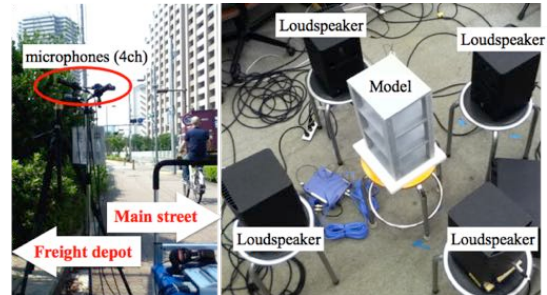


図 5 環境雑音の收音及び雑音加振実験

② 図 6 は、各模型をインパルスハンマーで加振した時の振幅-周波数特性である. それぞれ最大振幅で正規化されている. 図中の周波数はこの図から読み取れる模型の固有周波数である. 本実験では、この固有周波数を実測値として、環境雑音による振動実験で推定される値の評価に用いた.

③ 非定常な雑音振動に対しては、平田らの提案する観測区間の主要な周期の分布 (SIP: short interval periods) [Hirata 2004] が有効であると考えられる. しかし、定常雑音を想定した場合の診断においても、スペクトルの振幅情報を排除した主要なスペクトルピークの周波数ヒストグラムが有効性であ

ることは示されていない。一方、ハウリング予測に関する研究では、音源の調波構造に埋もれた伝達系の周波数成分の推定において、CHA とスペクトルピークの周波数ヒストグラムの有効性が示されてきている [Takahashi 2014]。そこで、本分析においても定常部の主要なスペクトルピークの周波数ヒストグラムを用いた診断手法を用いることとする。ただし、ケプストラム比と分析窓長の関係を示すことが本実験の目的であることから、CHA によるスペクトルの累積は行わないものとする。図 7 に処理の概要を示す。まず、観測振動は、1/8 フレームシフトしながら、矩形窓掛けされる。各分析区間で主要なスペクトルピークの周波数が選択される。本実験において、分析窓長は 0.06, 0.09, 0.12, 0.18, 0.25, 0.35, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.0 (s) の 12 種類が試された。各分析区間より推定された主要なスペクトルピークの周波数は、全区間の分析が終了後、混合ガウスモデルによるクラスタ分析を行い、混合比の大きなクラスタから、その平均値を固有周波数の推定値とした。

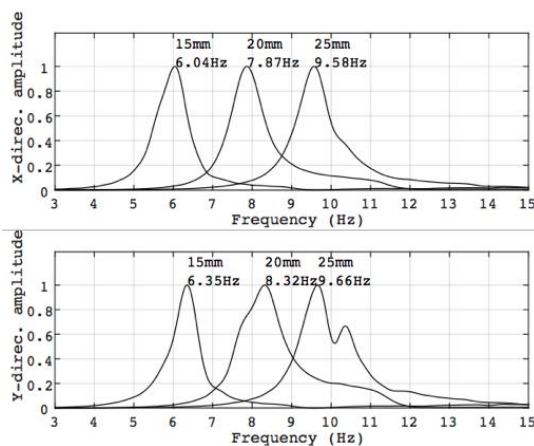


図 6 実測による構造模型の振幅-周波数特性

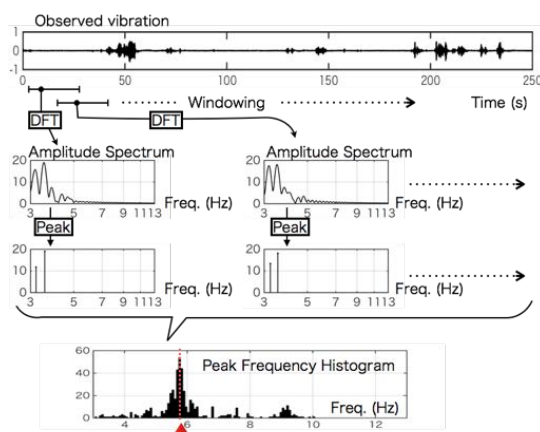


図 7 固有周波数の推定

④図 8 は分析窓長(フレーム長)と固有周波数の推定誤差の結果を示したものである。破線は図 6 に示した実測値の固有周波数を、各推定値を示すマーカーから上下に伸びるバー

は推定値の標準偏差である。この結果からは、分析窓長が長いほど実測値との誤差が減っていることが確認できるものの、模型の強度によっては、非常に短い分析窓でも安定して分析できている場合があるなど、分析窓で基準を設けるのは難しい。

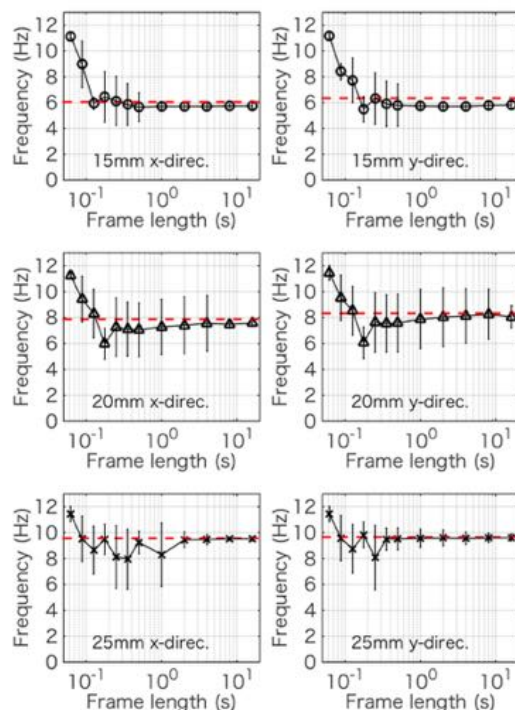


図 8 分析窓長と固有周波数の推定誤差

⑤一方、図 9 は CRI に対する模型の固有周波数の推定誤差を示したものである。CRI が負の場合は、CRI に伴って推定誤差が減少し、伝達系が優位と判断できる 0dB 以上では、推定誤差が概ね収束している様子が確認できる。このことから、雑音振動から伝達系の特徴を分析する際には、ケプストラム比が 0dB 以上となるように分析窓長を決定すべきであると結論付けられる。図 10 に CRI に対する固有周波数の相対誤差の関係をまとめる。

(3)また本研究では、実建造物によるフィールド試験を試みた。8 階建ての鉄筋コンクリート建造物(東京都立産業技術高等専門学校, 荒川キャンパス本館北ウィング)の屋上に加速度ピックアップを設置(図 11)、平成 27 年 8 月 10 日に 24 時間観測した雑音振動から固有周波数を推定した。図 12 は観測された雑音振動波形の例である。図 13 は、1 時間毎に推定した南北方向(○, ●)と東西方向(△, ▲)それぞれの固有周波数の値である。白マーカーはフレーム長 5(s)とした時の、黒マーカーは 0.5(s)とした時の結果である。各分析について図 14 の通り CRI の評価を行ったところ、フレーム長 0.5(s)では CRI が 0dB 未満であり、固有周波数の推定結果(図 12)からも時刻によって変動の様子が確認できる。従って、フレーム長 0.5(s)では環境雑音の周波

数特性の影響を受けていると考えられる。一方、フレーム長 5(s)では CRI が 0 dB を超えていることが確認でき、固有周波数の推定値も時間変化の少ない安定した推定値が得られていることから、良好なモニタリングができていていると考えられる。

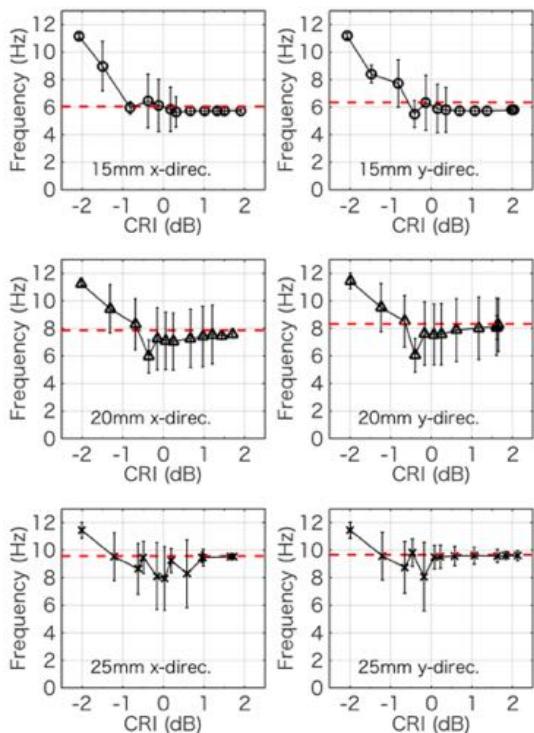


図 9 CRI と固有周波数の推定誤差

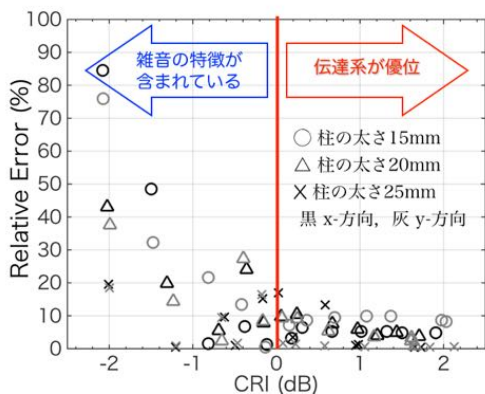


図 10 CRI と固有周波数の相対誤差

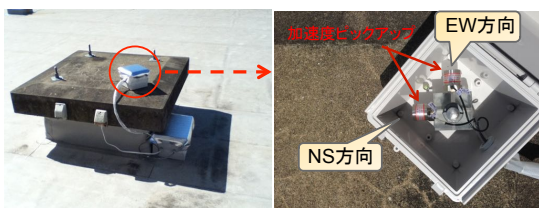


図 11 建造物の雑音振動測定装置

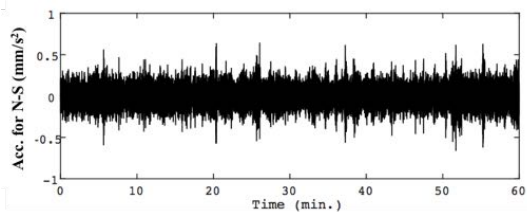


図 12 建造物の雑音振動波形の例

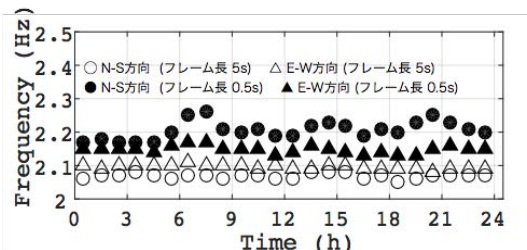


図 13 実建造物の固有周波数の推定結果

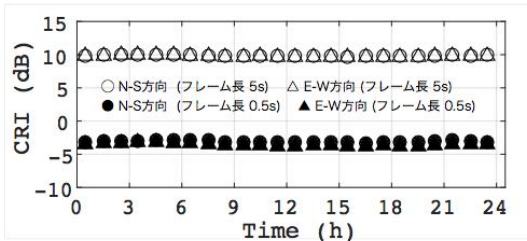


図 14 実建造物の固有周波数推定時の CRI

(4)本研究では、さらに CHA の応用として、拡声システムにおけるハウリングの発生予測についても検討した。

①雑音振動に埋もれた建造物の固有周波数を推定する診断手法は、拡声システムにおいて、音声信号に埋もれた伝達系の共振周波数を推定する場合と、問題としては同じである。会議システムやコンサートで使用される拡声システムにおいて、ハウリング制御は古典的な課題のひとつである [Schroeder 1962]。特に、ハウリング発生前のリングングの状態では、ハウリングになる危険性をもった周波数を予測できさえすれば、アンプのボリュームをユーザーやサウンドエンジニアによって調整できる余地がある。これまでに、CHA とそれを用いたハウリングに至る危険性のある周波数を予測する手法を検討してきており、コンピュータシミュレーションによってその効果が確認されてきている [Takahashi 2006]。

②本研究では、実環境での PureData [Puckette 1996] を用いた実時間拡声実験によりハウリング発生前にリングング周波数の検出効果を確認した。実験では、提案手法を用いて推定された周波数に対してノッチフィルタを施すことでハウリングの発生を防止できたことから、CHA を用いた推定手法の効果を示した [Takahashi 2014]。

参考文献

[Hirata 2004] Y. Hirata, J. of Sound and Vib., 270, 1041-1044, 2004

[Hirata 2005] Y. Hirata, J. of Sound and Vib., 287(3), 611-613, 2005.
[Impedovo 2007] D. Impedovo, M. Refice, IEEE Third International Symposium on Information Assurance and Security, 435-438, 2007
[Lyon 1983] R. H. Lyon, J. Acoust. Soc. Am., 79(4), 1223-1229, 1983.
[Puckette 1996] M. Puckette, Information Processing Society of Japan, 96(102), pp. 37-41, 1996
[Schroeder 1962] M. R. Schroeder, J. Audio Eng. Soc., Vol. 10, No. 2, pp. 108-109, 1962.
[Takahashi 2008] Y. Takahashi, T. Taniguchi, M. Tohyama, Advances in Acoustics and Vibration, doi:10.1155/2008/261758, 2008.
[Takahashi 2006] Y. Takahashi, M. Tohyama, Y. Yamasaki, J. Audio Eng. Soc., 54(7/8), 620-629, 2006.
[Takahashi 2011 a] 高橋義典, 科学研究費補助金研究成果報告書, 課題番号 21860084, 2011.
[Takahashi 2011 b] 高橋義典, The Tokyo U-club 都市に関する研究奨励賞, 最優秀賞, 2011.
[Takahashi 2011 c] Y. Takahashi, M. Tohyama, Inter-noise, Mon-P-6, 2011.
[Takahashi 2014] Y. Takahashi, IEEE 3rd GCCE, 430-431, 2014
[Tohyama 1998] M. Tohyama, T. Koike, Academic Press, 1998.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Satoru Goto, Yoshinori Takahashi, Mikio Tohyama, "Autocorrelation Analysis in Time and Frequency Domains for Passive Structural Diagnostics", Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2013, Article ID 204878, doi:10.1155/2013/204878, 2013
- ② Satoru Goto, Yoshinori Takahashi, Mikio Tohyama, "Structural Vibration Monitoring Using Cumulative Spectral Analysis", Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2013, Article ID 158329, doi:10.1155/2013/158329, 2013
- ③ Hiroki Hagiwara, Yoshinori Takahashi, Kazunori Miyoshi, "Wave front reconstruction using the spatial covariance matrices method", Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 60, No. 12, pp. 1038-1050, 2012
- ④ Yoshinori Takahashi, Satoru Goto, Mikio Tohyama, "Modal Experiment on Structural Condition Monitoring using Cumulative Harmonic Analysis", Advances in Acoustics and Vibration, Vol.2012, Article ID 327135, doi:10.1155/2012/327135, 2012

〔学会発表〕(計8件)

- ① 高橋義典, "建造物診断におけるケプストラム比に基づく最適分析窓長の決定手法", 電気音響研究会信学技報 EA2015-74, PP.45-50, 2016
- ② Yoshinori Takahashi, "Coloration Detection in Public-Address System Using Cumulative Harmonic Analysis", IEEE Global Conference on Consumer Electronics, pp. 430-431, 2014
- ③ Hiroki Hagiwara, Yoshinori Takahashi, Kazunori Miyoshi, "Reflected Wave Reproduction Using the Co-Variance Method", IEEE Global Conference on Consumer Electronics, pp. 104-105, 2014
- ④ 高橋義典, "累積調波分析を用いたPAシステムのカラレーション検知", 日本音響学会秋季研究発表会, pp. 855-858, 2014
- ⑤ 小山ちひろ, 成田翔一, 高橋義典, "環境雑音を利用したパッシブな構造物モニタリング", 第19回電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, p. 11, 2014
- ⑥ 高橋義典, 後藤理, 東山三樹夫, "3次元残響音場における最小位相応答の相互相関係数と直接音領域", 日本音響学会秋季研究発表会, 1-Q-8, 2013
- ⑦ 後藤理, 高橋義典, "信号波形に着目したパッシブな構造物診断", 日本音響学会秋季研究発表会, 1-Q-38, 2013
- ⑧ 高橋義典, 東山三樹夫, "雑音振動ケプストラムの同期加算平均を用いた伝達関数の推定", 日本音響学会秋季研究発表会, 2-Q-b18, 2012

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.metro-cit.ac.jp/files/education/pdf/135545427995715943.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 義典 (Yoshinori Takahashi)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授
研究者番号：30547732

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

東山 三樹夫 (Mikio Tohyama)
Wave Science Study・所長
研究者番号：90255604

(4) 研究協力者

後藤 理 (Satoru Goto)
Wave Science Study・研究員