

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560267

研究課題名(和文) 機械の稼働中の騒音低減のための構造変更感度解析

研究課題名(英文) Sensitivity Analysis of Structural Modification for Noise Reduction under Operational State

研究代表者

吉村 卓也 (Yoshimura, Takuya)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：50220736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、把握困難な入力特性は未知のまま、振動騒音を低減するための構造変更箇所を簡便に見出すための感度解析方法を提案した。明らかになったことは、1) 質量付加による対策では、具体的な付加質量が定まれば、自己FRFを用いて取り付け後の応答を予測計算することが可能、多軸応答を考慮することも精度向上に有用。2) 曲げ剛性の感度解析は、角加速度を計測する必要があり精度確保が困難な場合も多い。この問題を解決するために並進計測に基づくスプライン関数による補間も試みた。3) 提案する感度解析法は定常応答を対象にし、周波数領域における対策を想定していたが、過渡応答を対象とした感度解析も可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：A sensitivity analysis method that finds out the appropriate location for structure modification is presented. The outcome of the research can be summarized as follows. 1) In the case of mass-added sensitivity analysis, it is possible to correctly predict the response after the mass addition under the condition that the driving point FRF (Frequency Response Function) is measured. Measurement of multi-axis auto FRF may contribute to the precision improvement. 2) Sensitivity analysis for bending stiffness needs the FRF with respect to rotational angular acceleration that is difficult to measure in conventional environments. For solving this problem we examined an interpolation approach by using a spline function, where the angular response is obtained by differentiating the interpolated function. 3) The proposed method is used for steady state response in the frequency domain. It is concluded that the sensitivity analysis for the transient response in the time domain is also applicable.

研究分野：振動工学

キーワード：機械力学・制御 振動騒音 モード解析 構造変更 実稼働解析

1. 研究開始当初の背景

機械の高度化，多機能化が進む中で，パワーや速さなどの第一義的な性能だけではなく，環境に対する十分な配慮が求められている．環境に関する重要な評価項目として振動・騒音が挙げられる．機械の低振動化，低騒音化のための方法としては，その機械の動特性を把握し，問題となっている事象の入力源を特定して，入力源に対する対策を施し，構造変更により伝達特性を改善するといった方法が取られている．

対策検討を行うためには，入力的位置，方向，周波数特性などを特定する入力同定が必要となる．入力同定は，構造物の周波数応答関数(FRF)を測定し，通常は複数の入力点と応答点間の FRF 行列の逆行列を応答ベクトルに乗じて力ベクトルを推定する逆行列法により行うのが主流である．しかしこの逆行列法は，測定した FRF 行列の逆行列を用いるため，測定誤差が拡大されて伝播され，入力同定結果の信頼性が低下する事が知られていた．

2. 研究の目的

本研究では上記の問題点を考慮して，入力同定を用いずに，直接振動騒音を低減することができる新たなアプローチを検討し，提案する．

本研究では，機械の稼働状況における振動・騒音を直接評価し，それらを低減するための感度解析法を提案するものである．以下の説明では，簡便のために評価対象を騒音として，構造音響連成系の騒音低減を例に説明する．

提案法では，系に作用する外力は未知のままでも良く，入力同定によってそれらを把握する必要はない．本研究で提案する方法では，まず騒音評価点をスピーカ加振し，構造物の振動応答(加速度)を周波数応答関数(FRF)として計測する．これは加速度/粒子加速度の次元を持つ FRF である．次に機械稼働中において，評価点音圧と構造物の加速度のクロススペクトルを計測する．

この両者の積が構造物の応答点に質量を付加した際の質量付加の感度となる．感度とは構造物の微小変化に対する評価点音圧の変化割合を示すものであり，例えば質量付加に対しては，負の勾配を持ち，最も絶対値の大きな箇所が最も騒音低減に有効な箇所であることがわかる．

同様にして，構造物に剛性や減衰を付加した際の感度を求めることができる．これらの感度分布の高い箇所は，構造変更に対して敏感に特性が変化する箇所であり，これにより構造対策箇所を特定することができる．

本研究では，提案法の有効性や適用範囲を明らかにすることを具体的な目的とする．

3. 研究の方法

(1)質量付加，剛性付加に対する有効範囲の

確認

感度解析は，わずかに特性値を変化させた時の応答量の変化を微分係数として表したものである．これにより，変化量が微小であれば，その変化を的確に予測し得るが，変更範囲が大きくなるとその予測は困難になる可能性がある．構造変更予測という実用上の視点からこれを検討する．

(2)減衰付加の感度解析に関する検討

構造変更方法としては，質量付加，剛性付加というのが変更となるが，これらの特性を変更した場合には，固有振動数が移動するだけで，騒音レベルはほとんど変化が見られないこともある．そこで，さらに減衰付加による構造変更に関する感度解析を検討した．周波数領域はモード密度がある程度高くなる中～高周波数領域を対象にする．

(3)適用範囲を拡大するための検討

提案法は，定常振動(騒音)を対象として，周波数領域においてそのレベルの低減を図るものである．多くの機械騒音においては，騒音レベルの卓越した周波数成分を対象としてその低減を図るが，周波数領域ではなく時間領域の過渡応答に着目して，その振幅やピークを低減したいという場合もある．そこで，適用可能な範囲を拡大するためにそのための基本的な検討も行った．

4. 研究成果

(1)感度解析の有効性の範囲

平板の有限要素モデルに対して，感度が高い要素の板厚を変化させて，所望の振動低減が達成されるかを確認したものが，図1である．

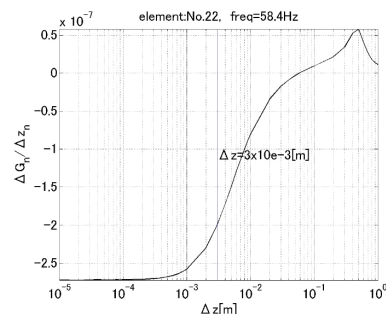


図1. 板厚変更による応答変化

これは，元の板厚を $3\text{mm} = 3 \times 10^{-3}\text{m}$ とした時の板厚変更による振幅変化の割合 $\Delta|G|/\Delta z$ を示している．これを見ると， $3 \times 10^{-4}\text{m}$ 程度の変化までは，一定の変化率を示しており，微分係数とほぼ等しい値になっていることがわかる．すなわち本例では，元の板厚に対して10%程度の構造変更までは精度良く構造変更の応答を予測できることが分かった．

この他に剛性付加の例では，2点間をバネでつなぐ剛性付加ではなく，例えばパネル構造物の曲げ振動における曲げ剛性のような剛性付加についても検討した．曲げ剛性の感

度解析を行うためには、以下のように角変位に関する周波数応答関数 FRF が必要になる。

$$\frac{dG_{rf}}{dk} = -t^2 (\theta_{ir} - \theta_{jr}) (\theta_{if} - \theta_{jf}) \quad (1)$$

ここで、 θ_{ir} は点 r を(並進)加振したときの点 i の角変位を表す FRF であり、 t は中立軸から部材表面までの距離である。距離 t と付加パネの関係を図 2 に表す。

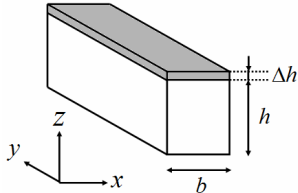


図 2 (a) 部材表面への板厚付加の概念

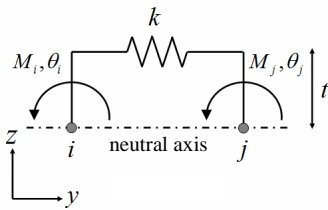


図 2 (b) 曲げ剛性付加の概念図

計測において角加速度(角変位)を計測することは困難なので、多点で計測した並進加速度から、スプライン補間を行い、補間関数の微分値から角変位を算出する方法を提案し検討した。まず初めに平面を持つ平板を対象として、多点計測を行い角変位を算出して、角変位を補間関数から算出した。その結果、スプライン関数の補間制度が、部材の端部付近では低下するために、感度の精度も低下することが明らかになった。このスプライン関数を平面だけでなく、曲面構造を持つ板部材にも適用し、その適用性を検討した。

さらに剛性付加に関して、その極限として、2点間を質量をもたない剛な部材で拘束した状態を仮定して、剛性付加の極限值がどのようになるかを考察した。これより、その2点間の変形をゼロにした場合に、評価点の応答量がどの程度変化するかを見積もることができる。

質量付加についても、同様に多角的な視点から検討を行った。特に部品を追加して補剛をする際には、剛性だけでなく質量も付加されることから、これらの両方の影響を考慮することが必要であることも分かった。

(2) 減衰付加の感度解析

減衰付加の基礎検討として、FEM モデル上で減衰要素全体を 1 倍にした時の、応答変化

を予測評価し、この係数で微分したものを感度として評価する方法を提案した。

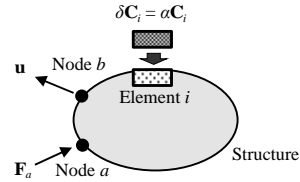


図 3 減衰付加モデル

この感度は微分係数として、下記により定義される。

$$\frac{d\mathbf{u}_b}{d\alpha (\alpha=0)} = -\mathbf{G}_{bi} \mathbf{C}_i j\omega \mathbf{G}_{ia} \mathbf{F}_a \quad (2)$$

これは減衰行列が何らかの方法で知りえたに利用可能な式であり、このようなモデル情報が無い場合には、有効ではない。しかしながら、このような感度を用いることにより、CAE モデル上では、妥当な減衰付加場所を探索することに有用であることが分かった。

(3) 適用範囲拡大のための検討

提案法は基本的には周波数領域で適用する方法であるが、適用範囲を拡大することを考え、時間領域の過渡現象のピーク低減にどのように適用することができるかを検討した。

過渡現象に対しては、次のような感度解析が可能であることが分かった。

$$\frac{d\dot{x}_r(t)}{dm_i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\ddot{X}_r(\omega)}{dm_i} e^{j\omega t} dt \quad (3)$$

これより、周波数領域の感度を評価することができれば、それを逆フーリエ変換することにより、時間領域における過渡現象の特定の時刻 t における感度を算出することができる。これをもとに、過渡現象における特定の時刻 t の応答 $\dot{x}(t)$ を対象として、そのピークを低減させるための感度解析を実行することができることが分かった。

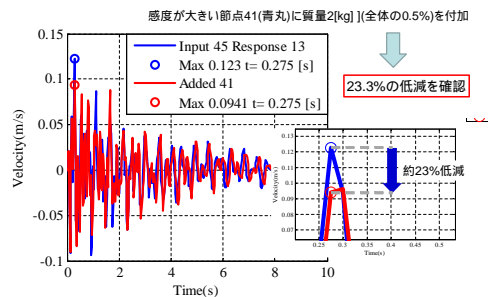


図 4 過渡現象の特性の時刻を対象とした感度解析の実施例

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Naoki HOSOYA, Shinji Yaginuma, Hiroshi ONODERA, Takuya YOSHIMURA, Estimation of the auto frequency response function at unexcited points using dummy masses, 査読付, Journal of Sound and Vibration, Vol. 337, 2015, p.14-27, 10/2014; 337

DOI:10.1016/j.jsv.2014.09.033

吉村 卓也, 音と振動の世界, RRR, 寄稿 Vol.71, No.11, 2014, pp.4~7

北原 篤, 吉村 卓也, 振動エネルギー解析に基づく減衰付加位置評価法の基礎検討日本機械学会論文集, 査読付, 80巻, 817号, 2014, DR0267,

DOI:10.1299/transjsme.2014dr0267

Takahito WATANABE, Takuya YOSHIMURA, Identification of Vibro-Acoustic Coupled Modes for Vehicle, 査読付, SAE Technical Paper 2014-01-0031, 2014, DOI:10.4271/2014-01-0031

北原 篤, 吉村 卓也, 振動エネルギー解析に基づく減衰付加位置評価法の基礎検討, 日本機械学会論文集, 80巻, 817号, 2014, 査読有, DR0267

高橋 一善, 吉村 卓也, 測定 FRF のばらつき評価と入力同定に及ぼす影響 - 実験セットアップ状態に起因する系統誤差の影響 -, 自動車技術会論文集, 44巻, 1号, 2013, 査読有, pp.99-104

齊藤 美羽子, 吉村 卓也 他4名, 音響系のモード特性同定と非加振点応答の予測, 日本機械学会論文集, C編, 78巻, 789号, 2012, 査読有, pp.1741-1748

[学会発表](計6件)

迎 恵利, 吉村 卓也 他3名, 時刻応答のピーク低減のための構造変更感度解析, 日本機械学会, 関東支部 21期総会講演会, No.10602, 2015年3月20日, 横浜国立大学(神奈川県・横浜市).

高野 賢太, 吉村 卓也, 時刻歴感度に基づく構造変更予測に関する基礎検討, 自動車技術会 2014 春季大会学術講演会, 2014年5月22日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市).

吉村 卓也, 振動騒音における実験解析技術の発展と現状, 自動車技術会シンポジウム「自動車の騒音とうまくつきあう方法 実験・CAE 技術の歴史と進化」2013年12月6日, 工学院大学(東京都・新宿区).

Kenta TAKANO, Takuya YOSHIMURA, Sensitivity analysis of time history data for improvement of transient response, Proceedings of Japan-Korea

Joint Symposium on Dynamics & Control 2013, 2013年8月27日, 九州産業大学(福岡県・福岡市)

中野 陽介, 吉村 卓也, モード特性を用いた減衰行列の同定, 日本機械学会機械力学・計測制御講演, 2013年8月27日, 九州産業大学(福岡県・福岡市)

齊藤 美羽子, 吉村 卓也 他2名, 車室内音場を対象とした多入力音響加振実験とモード解析, 自動車技術会, 2012 春季大会学術講演会, 2012年5月24日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市).

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等: 特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 卓也 (Takuya YOSHIMURA)

首都大学東京 理工学研究科

教授

研究者番号: 50220736

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し