

令和元年6月4日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06159

研究課題名(和文) 実稼働出力応答による加振力の時間領域推定に関する研究

研究課題名(英文) Estimation of excitation forces in time domain using operational responses

研究代表者

日野 順市 (HINO, Junichi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授

研究者番号：10173189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：機械構造物の振動低減のために、実稼働状態の機械系に働く加振力の推定を目的とした。加振力推定の逆問題を解く際に、励振力の過渡特性を考慮するために時間領域での推定を行った。例としてインパルス入力 of 推定問題を扱った。系のモーダルパラメータからハンケル行列を作成して、チホノフの正則化に特異値分解とL曲線法を利用して直接逆問題を解く手法を開発した。さらに、オンライン推定を行うために、状態量中に加振入力を統合した拡大カルマンフィルタを適用した間接的に逆問題を解く推定法も開発した。その際に、実稼働振動データから系の振動特性を求めるために、部分空間同定および質量変更法により振動系の数学モデルの導出を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来行われていた周波数領域の加振力推定に比べ、過渡的な加振力の推定を行うことができる。過渡振動の原因となる非定常加振力の推定を行うことができると、加振力の時間的変動を把握することができ推定精度が向上するだけでなく、機械の故障診断などの突発的な振動特性の変化を検知することが可能になる。このことは、設計時の振動対策に加えて、実稼働中の機械の健康状態を監視することができる。また、付随して行っていた質量変更法による正規化モードの導出については、実稼働状態での振動データのみから有意な振動特性を抽出することが可能となるため、動特性改善のための実験の効率を大きく改善できる。

研究成果の概要(英文)：In order to suppress vibrations of the machine, it is important to estimate the excitation force acting on the mechanical system in the operating condition. The estimation of excitation forces was performed in the time domain via solving the inverse problem to consider the transient characteristics of the excitation force. As an example, we dealt with the estimation problem of impulse force. The Hankel matrix was derived from modal parameters of the system and a procedure was developed to solve the inverse problem directly using Tikhonov regularization, which integrated singular value decomposition and L-curve method. Furthermore, we also developed an indirect procedure by applying the augmented Kalman filter that integrates the input force into the state quantities. Then, the mathematical model of the vibration system was derived by the subspace identification and the mass change method to obtain the dynamics of the system from the vibration data in operating condition.

研究分野：機械力学

キーワード：モード解析 伝達経路解析 加振力推定 時間領域推定 非定常入力

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

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 機械構造物の振動低減の方策として、機械構造物自身の特性を解析して設計変更等の対策が取られてきた。しかしながら、稼働時において振動の源となる加振力の経路を推定することが重要な課題となっていた。実稼働モード解析(OMA)および伝達経路解析(TPA)等の種々の手法が開発されてきた。その中で振動の原因となる構造物に働く加振力推定の要望が生まれることは当然の流れである。すなわち、加振力が直接測定できない場合に、計測可能な点での振動応答から加振力を推定する手法が必要とされた。したがって、この加振力推定についても種々の手法が提案されてきたが、振動特性を周波数応答関数のように周波数領域で表すことが一般的であることから、TPA 手法の関連からも周波数領域の手法が主流であった。そのため、衝撃力や時間変動をする非定常な加振力に対してはあまり有効な手法ではなかった。過渡的な励振力である非定常信号の推定を行うためには時間領域の手法を用いる必要があった。時間領域における振動源の推定については地震の振動源の推定などの理学的な逆問題の見地から提案された手法もあり、より広い分野からの手法を利用することが期待できた。

(2) 本研究では、2 種類の手法について検討した。まず、たたみ込み形式による入出力関係式を用いて、悪条件となる連立1次方程式を正則化法により解く手法である。この手法をここでは直接法と呼んだ。一般にこれらの逆問題は悪条件となるためチホノフの正則化を用いて解を求めることが一般的であるが、その他にも特異値分解(SVD)を利用する方法、正則化とSVDを組み合わせる方法などが提案されていた。何れの場合も正則化パラメータの決定およびSVDでの採用特異値次数の決定などに問題が残されていた。その決定のための判定基準について、機械系の加振力推定に適した手法についての知見を得る必要があった。2 番目には、上述の逆問題の悪条件を回避するための変換法として、カルマンフィルタを利用する手法である。状態量中に入力信号を組み入れた拡大系に対してカルマンフィルタを適用する手法である。上述の直接法に対比して間接法と呼ぶ。前者に比較すると、オンライン推定の手法であることから実稼働時に加振力の異常から故障検知等にも応用が期待できる。

### 2. 研究の目的

(1) 実稼働状態の機械構造物に働く非定常な加振力の推定法の開発を行った。応答信号から入力を推定する問題は、一般に逆問題と呼ばれている。ここでの逆問題を解く際に、励振力の過渡特性を考慮するために時間領域での推定を行った。例としてインパルス入力の推定問題を扱った。系の入出力間のたたみ込み形式としてモーダルパラメータからハンケル行列を作成した。この入出力関係式から応答出力から入力信号を求める逆問題を解く。一般的にこの問題は悪条件となるため、チホノフの正則化にSVDとLカーブ法を利用して精度良く解く手法を開発することを目的とした。本課題では、計測可能な応答振動から加振力を間接的に推定する手法の開発を目的とした。下記の手法との対比から、ここでのチホノフの正則化を用いる方法を直接法と呼ぶことにする。

(2) 悪条件問題を回避するための方法として、上述の正則化法を用いる手法と関係式を変換して悪条件を回避する手法がある。したがって、状態量中に加振入力を統合した拡大カルマンフィルタを適用した間接的に逆問題を解く推定法(間接法とよぶことにする)を開発することで悪条件問題を回避して、安定的に加振力推定を行う手法を開発することを目的とした。カルマンフィルタは本来オンライン推定を行う手法であり、フィルタゲイン等の決定に関係する重み係数等の選定について検討する。インパルス力が働く時刻とその前後の加振力がゼロの際の推定性能を両立させるサンプリング周期等の条件について検討する。上述の2つの手法は、実稼働振動データから系の振動特性を求めるために、対象となる系の振動特性を正確に把握する必要がある。そのために、加振力が未知でも正確な系のモデルが推定できる必要がある。本研究は、部分空間同定および質量変更法により振動系の数学モデルの導出を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 直接法

入出力のたたみ込み形式を簡略的に表現すると

$$\ddot{x} = H_0 \hat{f} \quad (1)$$

となる。ここで、 $\hat{f}$  が推定したい入力ベクトルである。 $H_0$  は上述のように求められるので、応答加速度 $\ddot{x}$ が測定できれば、原理的に $\hat{f}$ を推定することが可能である。しかしながら、振動応答にノイズが含まれる場合やモデル化に誤差がある場合には、一般的に推定結果の誤差が増幅される悪条件問題となることが知られている。そのためにこのような逆問題を解くために、チホノフの正則化や打ち切り特異値分解(TSVD)などの手法が利用される。式(1)を正則化パラメータ およびSVDを用いて表すと

$$\hat{f} = V(\Sigma^T \Sigma + \lambda I^T L)^{-1} \Sigma^T U^T \ddot{x} \quad (2)$$

ただし、SVDにより $H_0$ は下のように直交行列 $U, V$ と特異値からなる対角行列 $\Sigma$ に分解できる。

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T \quad (3)$$

この逆問題を精度良く解くためには正則化パラメータの決定法が重要になる．ここでは，ハンセンのLカーブ法を利用して正則化パラメータの決定を行う．

## (2) 間接法

離散時間系で表した拡大カルマンフィルタによる手法の基本式は，時刻  $k$  において

$$\mathbf{x}^a(k+1) = \mathbf{A}_a \mathbf{x}^a(k) + \boldsymbol{\zeta}(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{G}_a \mathbf{x}^a(k) + \mathbf{v}(k)$$

ただし，

$$\mathbf{x}^a(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{p}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる．本手法では，状態量中に加振力  $\mathbf{p}$  を組み入れることに特長がある．この拡大系のカルマンフィルタをフィルタリングステップ(式(6))と予測ステップ(式(7))を逐次繰り返すことで，加振力の推定を行う．

$$\begin{cases} \mathbf{L}(k) = \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{G}_a^T (\mathbf{G}_a \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{G}_a^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}^a(k|k-1) = \hat{\mathbf{x}}^a(k|k-1) + \mathbf{L}(k) (\mathbf{y}(k) - \mathbf{G}_a \hat{\mathbf{x}}^a(k|k-1)) \\ \mathbf{P}(k|k) = \mathbf{P}(k|k-1) - \mathbf{L}(k) \mathbf{G}_a \mathbf{P}(k|k-1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}^a(k+1|k) = \mathbf{A}_a \hat{\mathbf{x}}^a(k|k) \\ \mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}_a \mathbf{P}(k|k) \mathbf{A}_a^T + \mathbf{Q}_a \end{cases} \quad (7)$$

ただし， $\mathbf{L}$  はカルマンゲインで逐次更新される．推定精度に影響を与える重み係数数は

$$\mathbf{Q}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S} \end{bmatrix}$$

である．推定の際に用いる振動応答は当初は変位を用いていたが，最終的には直接法と同様に加速度を用いる．

## 4. 研究成果

### (1) 直接法

加振力推定を行う対象構造として，多自由度系（5層構造物）と連続体（片持ちはり）を対象とした．いずれも，数値計算と実験装置により推定実験を行い提案手法の精度の検証を行った．

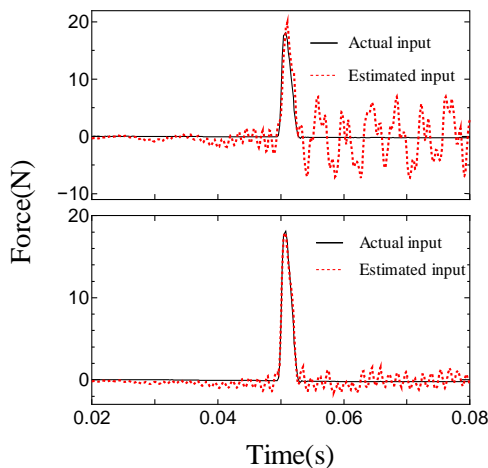


図1 直接法による加振力推定結果

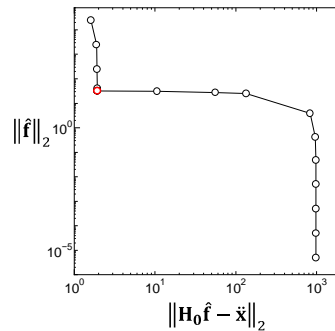


図2 Lカーブ法による正則化パラメータの決定

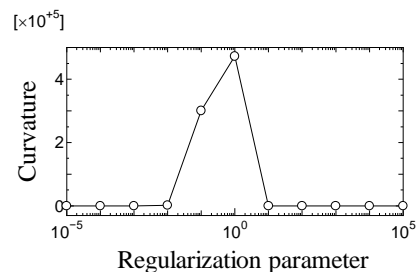


図3 Lカーブ法の曲率

5層構造物においても数値計算および実験で加振力推定が可能であることを示したが、ここでは連続体である片持ちはり(ステンレス板: 400mm×38mm×3mm)に適用した際の例を示す。片持ちはりの固定端から30cmの位置にインパルスハンマで加振力を与え、固定端から12cmおよび18cmの位置での加速度応答を測定した。サンプリング周波数は5120Hzでデータ数2048個である。図1に推定結果を示す。図1の上図はシミュレーションから予測した固有振動数によりたたみ込み形式を求めたものである。一方、下図は実際の加速度応答から得た固有振動数を使用して推定を行ったものである。固有振動数の推定が精度良くできれば、加振力の推定も行えることがわかった。図2にはLカーブの結果を示す。このコーナー近傍に最適な正則化パラメータが存在すると言われている。ここでは、コーナーではカーブの曲率が大きくなる特徴を利用して、判定の自動化のためLカーブの曲率を求めることで正則化パラメータの値を決定した。図3は図2に対応した曲率であり  $\lambda = 1$  で曲率が最大となっている。課題としては、当初想定していなかった、加振点と応答点が近い場合に推定精度が低下する問題が発生した。この問題については現在も検討を続けている。たたみ込み形式の作成に、部分空間法により実現問題を解き、状態方程式のシステム行列からたたみ込み形式を作成して推定実験を行うと、直達項の有無が推定結果に大きく影響を与えることがわかった。加速度応答を用いたことで、加振力の推定精度は向上したが、モーダルパラメータによるたたみ込み形式は直達項が考慮できないため、加振点を応答点が近い場合にその影響を大きく受けるため推定精度が悪化することがわかった。

## (2) 間接法

加振力推定の対象構造として用いた5層構造物を図4に計算モデルおよび図5に実験装置を示す。拡大カルマンフィルタによる加振力の推定結果を図6に示す。図7にはインパルス入力部分を拡大して表示した。当初は振動変位から加振力推定を行っていたが、インパルス入力の立ち上がり部分で時間遅れが生じ、重み係数  $Q$  および  $S$  を調整しても遅れを無くすことができなかったが、加速度応答を利用することで推定の時間遅れを無くすことができた。しかしながら、図6からわかるように、加振力を受けない時刻では本来は推定値がゼロとなるべきだが、推定値は偏差を持つ結果となった。変位により推定を行っていた際には、これが大きく問題になることは無かった。したがって、原因としては計測量に加速度を用いて推定を行うことで、状態量の推定値にも偏差が生じることがわかった。すなわち、拡大カルマンフィルタの推定過程において、出力方程式の加速度応答から状態量の推定を行う際に、偏差が生じてしまうことから加振力に偏差成分を含まなければならなくなったと考えられる。この原因は、インパルス力が加えられたときに時間遅れの無いように推定を行うために、推定値を変化させる感度が高くなっており、加振力が無い時刻においてノイズ等の影響を敏感に受けてしまうため

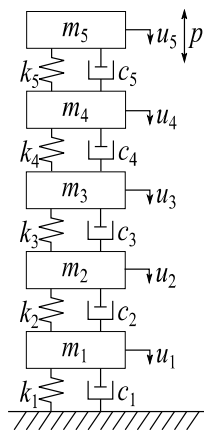


図4 多自由度(5層構造)モデル



図5 多自由度(5層構造)実験装置

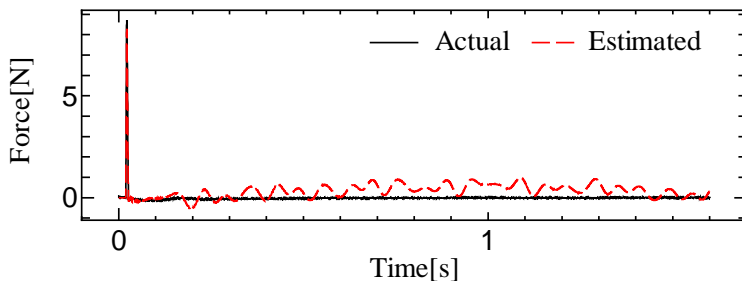


図6 インパルス加振力推定結果

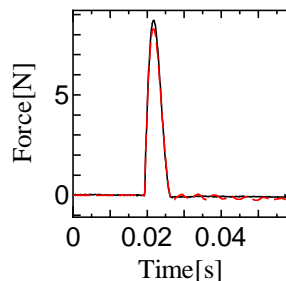


図7 拡大図

あると思われる。推定の感度を低下させると、偏差の発生は抑制されるが応答性が悪くなることがわかった。現在、感度と安定性を両立する目的で、時刻毎に重み係数を変化させて感度を調整する手法について検討を行っている。

### (3) まとめ

実稼働出力応答による加振力の時間領域推定に関する研究として、非定常加振力の一例としてインパルス力の推定を行った。たたみ込み形式による直接法および拡大カルマンフィルタによる間接法について、数値計算およびモデル実験により推定結果の検討を行った。課題は残っているが、何れも機械構造の数学モデルの精度が高ければ良い推定結果が得られる。直接法で行ったように、モーダルパラメータからモデル化ができれば、従来の振動試験により得られている振動特性から推定が可能である。特に、振動応答のみから正規化固有モードを求めることができれば、振動試験を行わなくても動特性を求めることができるため、質量変更法の改良についても行って行く必要がある。

### <引用文献>

Aster, R.C., Brchers, B., Thurber, C.H., "Parameter Estimation and Inverse Problems", Academic Press, (2013), pp.103.

堤正義, "逆問題の数学", (2000), 共立出版.

Hansen, P.C., "The L-Curve and its use in the numerical treatment of inverse problems", Computational Inverse Problems in Electrocardiology, WIT Press, No.5, (2001), pp.119-142.

Lourens, E., Reynders, E., Roeck, G.D., and Degrande, G., "An augmented Kalman filter for force identification in structural dynamics", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 27, (2012), pp. 446-460.

## 5. 主な発表論文等

### [学会発表](計 7 件)

日野 順市, 河野 晃大, 特異値分解と正則化法を用いた構造物に対する加振力の推定(推定結果に対する直達項の影響の検討), 日本機械学会 D&D2019 講演会, 2019.

日野 順市, 山室 亮太, カルマンフィルタによる機械構造物の時間領域加振力推定に関する研究(推定の安定化のための重み係数), 日本機械学会 D&D2019 講演会, 2019.

日野 順市, 森實 卓朗, 特異値分解と正則化法を用いた構造物に対する加振力の推定(加振位置に関する推定精度の検討), 日本機械学会 D&D2018 講演会, 2018.

Junichi Hino, Takuro Morizane, A TIME DOMAIN APPROACH OF EXCITATION FORCE ESTIMATION USING SVD AND REGULARIZATION, The 25<sup>th</sup> International Congress Sound and Vibration, 2018.

日野 順市, 大屋 怜史, 質量変更法による固有モードの正規化と固有振動数の推定, 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会講演会, 2018.

長町 周, 日野 順市, カルマンフィルタによる機械構造物の時間領域加振力推定に関する研究(5自由度モデルに対する適用), 日本機械学会 D&D2017 講演会, 2017.

森實 卓朗, 日野 順市, 特異値分解と正則化法を用いた構造物に対する加振力の推定, 日本機械学会 D&D2017 講演会, 2017.

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。