

建物管理の高度化に向けた新たな技術適用に関する調査について

○作業状況

平成 21 年 2 月 16 日現在、下記の目次構成（案）で 本文（案）の記述を終えている。

このあと、管理技術部会において記述内容の確認を行う予定である。

※ 本資料では、12 ページまで収録している。

1. 1. 1	ヘルスマonitoringにおける損傷推定の位置づけ	1
1. 1. 2	損傷推定の方針設定	2
(1)	損傷推定の目的	2
(2)	損傷指標	3
1. 1. 3	システム同定の基本的考え方	5
(1)	システム同定とは	5
(2)	システム同定の手順	5
(3)	多項式モデルを用いたシステム同定理論	6
(4)	状態空間モデルを用いたシステム同定理論	10
1. 1. 4	構造物の損傷推定手法	12
1.1.4.1	モード特性同定による損傷推定	12
(1)	固有振動数（基本モード）を損傷指標とする方法	13
(2)	固有振動数（複数モード）を損傷指標とする方法	16
(3)	モード形状（振幅）を損傷指標とする方法	17
(4)	モード形状（層間変形角）を損傷指標とする方法	18
(5)	モード形状（曲率）を損傷指標とする方法	18
(6)	波形の不連続性を損傷指標とする方法	18
1.1.4.2	物理パラメータの直接同定による損傷推定	20
1.1.4.3	モード特性に基づく物理パラメータの段階的同定による損傷推定	23
(1)	固有振動数に基づく層パラメータ変化の推定方法	23
(2)	固有振動数・モード形に基づく層パラメータ変化の損傷推定方法	25
(3)	各種影響を加味した推定方法	28
1.1.4.4	ソフトコンピューティングを利用した損傷推定	31

1. 1. 1 ヘルスモニタリングにおける損傷推定の位置づけ

建築構造物のヘルスマニタリングは下図に示す通り、①データ取得（センシング）、②キュレーション（信号処理）、逆解析による③システム同定（構造物のモデル推定）、損傷や劣化の④診断・予測、建物管理者や消費者に対する⑤対応策提示（補修要否等）といった、5つのステップから構成することが最終的な目標となる。

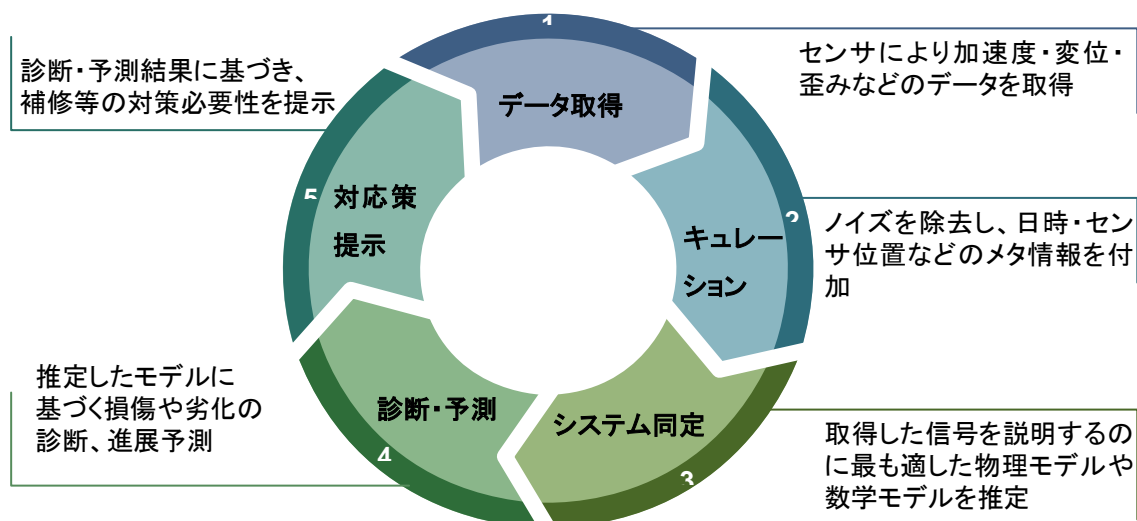


図 1. 1. 1-1 ヘルスモニタリング全体の流れ

近年、ヘルスマニタリングに関する研究は、センサシステム、システム同定手法など、個別の要素技術ごとには活発に行われてきた。しかし、システム同定によって推定されたモデルを踏まえて、構造安全性能をどう「解釈」し、今後どうなるかを「予測」すること（④）に関しては、十分な知見が集まっているとは言い難い。そのため、診断・予測結果に基づき補修要否等の対応策を提示する（⑤）という最終目標は未達成の状況であるが、これらは今後、実構造物へのヘルスマニタリングの適用事例が増えて損傷・劣化の症例データが整備されてくれば、格段に進歩していくことと考えられる。

ここでは、建築構造物の損傷推定について、システム同定（③）の方法論を中心に、診断（④）まで踏み込んだ一部の研究を含めて、文献調査を行う。

1. 1. 2 損傷推定の方針設定

(1) 損傷推定の目的

損傷推定を行うレベルとしては、構造物全体、層、部材、2次部材等、複数の階層が存在する。建築構造物の損傷推定問題は一般的に、グローバル（全体）からローカル（局所）へと、段階的に絞り込むことが適切と考えられる。今後、グローバルとローカルを戦略的に組み合わせ、トータルな損傷推定システムを構築していくことが重要と考えられる。

ローカルなモニタリングは、部材・2次部材レベルのひび割れ等の現象に基づく損傷検知がメインであり、ヒトによる診断や非破壊検査など、枠組みとしては既に確立されている。他にも例えば、免震のように予め損傷が蓄積する箇所が特定できる損傷制御設計の構造物であれば、免震デバイスの最大変位を集中的に観測しておくシンプルなシステムによって、ローカルな損傷推定の目的が達成される。しかし、建物の規模が大きく複雑で損傷位置を特定することが容易ではない場合や、仕上材や防火材により被覆され直に計測（視認）できない場合には、ローカル損傷検出の限界がある。

これに対しグローバルなモニタリングは、構造物の被覆の有無に関わらず、建物内に比較的少数のセンサを配置することにより、労力をかけずに損傷推定が可能となる。計測された振動データからその入出力関係を説明するのに適した数学モデルを構築し、システム同定手法を適用してモデル構造及びパラメータを推定するものである。損傷推定によって把握したい内容が構造物全体の損傷有無なのか、層レベルの損傷位置・損傷程度なのかに応じて、構築すべき計測・分析システムは異なってくる。

建築構造物のヘルスマニタリングは、構造物全体及び層レベルのグローバルな損傷推定問題を対象に議論が展開されることが多いため、本研究ではこれを調査の対象とする。

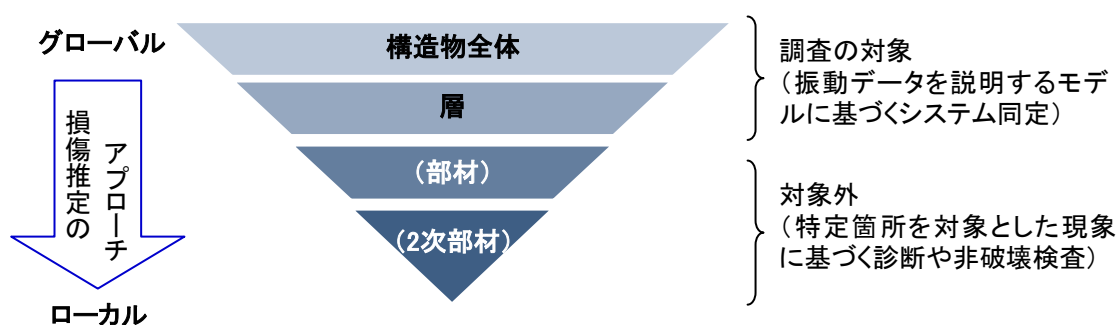


図 1.1.2-1 損傷推定の段階的アプローチ

(2) 損傷指標

建築構造物の性能には、構造性能、耐久性能、設備性能、空間性能など様々な性能がある。構造性能に絞っても、安全性、修復性、使用性等の性能がある。ヘルスマonitoringでは主に、地震や経年劣化による構造安全性能を、供用期間を通じて目標水準以上に維持管理し続けることを目的としている。

土木分野は建築分野と異なり、公共性が高く、常に高いレベルの外力に晒されているため予防保全の考え方が浸透しつつあること、構造が比較的単純であること等から、センサによるモニタリングの導入が進んでいる。例えば橋梁やトンネルについて、モニタリングのレベルや要求性能ごとに、性能指標及びモニタリング項目の整理が次のとおり行われている¹。

表 1.1.2-1 土木構造物における性能指標とモニタリング項目の例

レベル	要求性能	橋梁		トンネル	
		性能指標	モニタリング項目	性能指標	モニタリング項目
構造物全体	安全性能	剛体安定 風・地震時応答特性	変位・変形 剛性、応力、荷重	剛体安定 地震時応答特性	変位・変形 応力、荷重
	使用性能	— (橋梁の使用性能は部材レベルの性能)		走行性 流水	変位・変形 漏水
	耐久性能	時間経過後の 安全性能	沈下、構造系の変化	時間経過後の各性能	地山の変形 地下水位の変動
部材	安全性能	断面耐力 疲労耐力、じん性	荷重、材料物性 断面諸元	断面耐力	荷重、材料物性 断面諸元
	使用性能	走行性	変位・変形 ひび割れ、ポットホール	走行性 流水	変位・変形 漏水、摩耗
	第三者影響度 に関する性能	剥離、剥落	ひび割れ、浮き	剥離、剥落	ひび割れ、浮き
	耐久性能	時間経過後の各性能	鋼材の腐食、ひび割れ	時間経過後の各性能	鋼材の腐食、ひび割れ
特定箇所	安全性能	断面耐力 ケーブル破断	荷重、材料物性 断面諸元、ケーブル張力	—	—
	使用性能	走行性	ひび割れ、ポットホール	—	—
	第三者影響度 に関する性能	間詰め床版部の 剥離、剥落	ひび割れ、浮き	添加材の落下	ひび割れ、浮き
	耐久性能	時間経過後の各性能	ケーブルの腐食	時間経過後の各性能	コンクリートの鋼材の 腐食、ひび割れ
備考	部材	桁、床版、橋脚、橋台、塔、アンカレッジ、舗装		覆工コンクリート、舗装	
	特定箇所	間詰め床版、支承、複合構造接合部、各種 ケーブル、塔、アンカレッジ		架線、照明、換気等	

ここでは、(1)で定めた損傷推定の目的に照らして、建築構造物全体及び層レベルの構造安全性能を評価するための損傷指標について、次のように整理した。

例えば構造物全体の損傷有無を把握する目的であれば、主に固有振動数（基本モード）の経時変化を損傷指標とする。層レベルの損傷位置・損傷程度を把握する目的であれば、固有振動数（複数モード）や層剛性などのパラメータの変化を主な損傷指標とする。ま

¹土木学会：コンクリート構造物のヘルスマonitoring技術、第1編、pp.8(2007)

た、免震建物のように予め損傷が蓄積する箇所が特定できる場合であれば、免震層の最大変位が閾値を超えたかどうかを観測することで、層レベルのシンプルな計測・分析システムを構築できる。

表 1. 1. 2-2 ヘルスモニタリングにおける建築構造物の損傷推定の目的と損傷指標の対応

				(1) 損傷推定の目的		
				構造物全体	層	
				(損傷の有無)	(損傷の位置)	(損傷の程度)
(2) 損傷指標	モード特性の変化	固有振動数	基本モード	●		
			複数モード	●	●	● (他技術との組合せによる)
		モード形状	振幅		●	
			層間変形角		●	
			曲率		●	
	物理パラメータの変化	層剛性			●	●
		層減衰係数			●	●
		柔性マトリクス			●	●
	閾値を超える観測量				(予め特定)	● (構造形式による)
	モデルに基づく予測応答量と観測量との乖離				●	●

1. 1. 3 システム同定の基本的考え方

(1) システム同定とは

システム同定とは「入出力データから目的とする数学モデルを得る」ことを言い、特性の分からない物体に対して何らかの入力を与え、その結果返ってくる出力応答を観測し、その入出力関係を適切に表現するような物体の特性を推定することである。

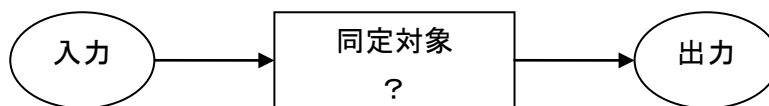


図 1. 1. 3-1 システム同定の概念

ヘルスマニタリングにおける損傷推定とは、建築構造物の動的特性をシステムと捉え、センサにより計測された振動データからその入出力関係を説明するのに適した数学モデルを構築し、システム同定手法を適用してモデル構造及びパラメータを推定し、損傷状況を把握することである。

(2) システム同定の手順

ヘルスマニタリングにおいてシステム同定を行う一般的な手順は次の通りである。

同定対象とする建物の先験情報（各層重量、設計固有周期など）があれば、それを踏まえて損傷推定問題を定義する。

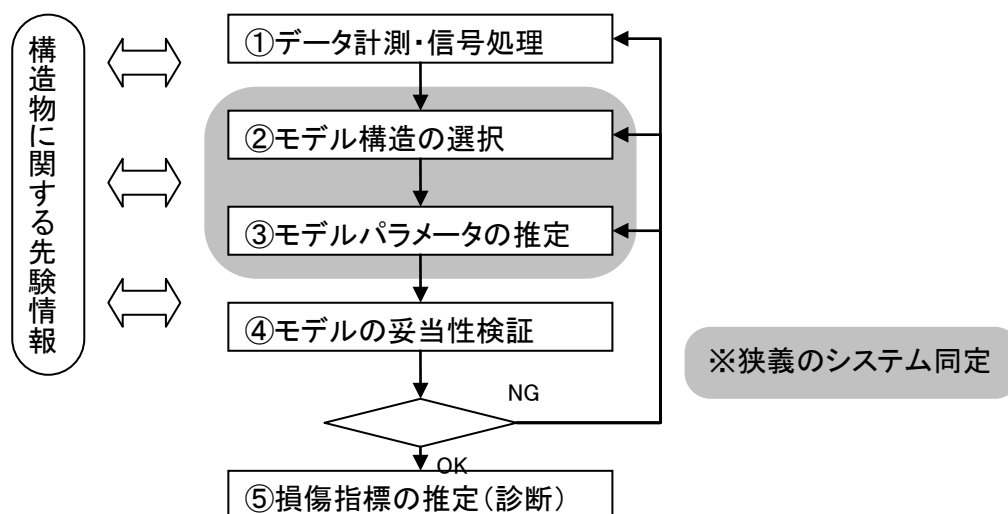


図 1. 1. 3-2 システム同定の実施フロー

①データ計測・信号処理

センサの種類やサンプリング周期などを決定し、建物の振動情報（加速度、速度、変位など）を収集する。入力とは、建物基礎部の常時微動あるいは地震時の計測データであり、出力とは、建物の頂部や各階層における計測データを指す。

実験から得られたデータは、例えば次のような信号処理を行う。

- ・アウトライア（異常値）の除去
- ・トレンド（低振動数領域の外乱）の除去
- ・同定に用いる時間帯の切り出し
- ・ナイキスト振動数を考慮したリサンプリング
- ・特定の振動数領域の信号を抽出するフィルタリング

②モデル構造の選択

建物の動特性を表現するモデル構造を選択する。代表的なモデルとして多項式モデル、状態空間モデルなどが挙げられる。

③モデルパラメータの推定

選択したモデルのパラメータを推定する。最小2乗法など、様々な推定手法がある。

④モデルの妥当性評価

同定モデルに基づく応答シミュレーションと実際の出力を比較したり、同定残差の白色性を確認したりすることにより、同定結果が信用できるものかどうかを検証する。

妥当と考えられる場合は当該モデルを採用し、妥当と考えられない場合は再び①～③のステップに戻る。

⑤損傷指標の推定（診断）

モデルのパラメータ自体は物理的意味を持たないため、ヘルスマonitoringにおいては、これを建物の損傷度合いを表す損傷指標に変換する必要がある。

損傷指標の種類は、固有周期やモード形状等のモーダルパラメータと、剛性や減衰係数等の物理パラメータに大別される。

(3) 多項式モデルを用いたシステム同定理論²

①多項式モデルの構造

構造物の入出力データが得られている場合に適用できる最も単純なモデル構造として、ARXモデル（Auto-Regressive eXo-geneous）がある。ARXモデルでは、入力データ u が n_b 個、出力データ y が n_a 個観測された場合に、外乱項に白色ノイズを仮定したモデルの入出力関係を、次の差分方程式で表現する。

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) + \omega(k) \quad (1.1.3-1)$$

シフトオペレータ q の多項式を用いることで（ z 変換と同一視してよい）、次のように書き直すことができる。

² 足立修一「MATLABによる制御のためのシステム同定」東京電気大学出版局

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + \omega(k) \quad (1.1.3-2)$$

但し、

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (1.1.3-3)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}$$

ARX モデルは、システムの伝達関数 $G(q)$ と雑音モデル $H(q)$ を次のようにおいている。

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)}, \quad H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (1.1.3-4)$$

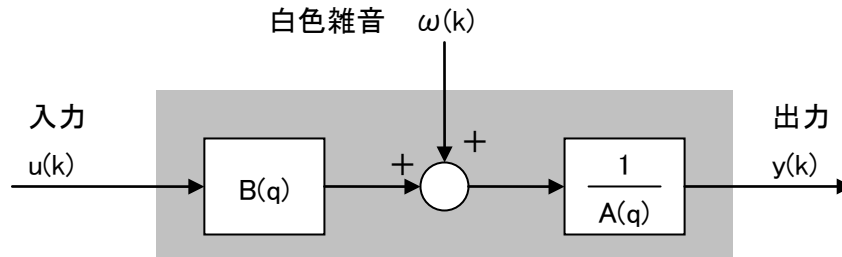


図 1.1.3-3 ARX モデルの構造

なお、最も一般的な多項式モデルは、次式で表現される。

$$A(q)y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)}\omega(k) \quad (1.1.3-5)$$

先に紹介した ARX モデルをはじめとする多項式モデルは、上式の特殊な場合として位置付けられる。多項式モデルの種類ごとに、システムの伝達関数 $G(q)$ と雑音モデル $H(q)$ を次の表にまとめる。

表 1.1.3-1 多項式モデルの種類

モデル		伝達関数 $G(q)$	雑音特性 $H(q)$
式誤差モデル	AR モデル	0	$1/A(q)$
	ARMA モデル	0	$C(q)/A(q)$
	ARX モデル	$B(q)/A(q)$	$1/A(q)$
	ARMAX モデル	$B(q)/A(q)$	$C(q)/A(q)$
	FIR モデル	$B(q)$	1
出力誤差モデル	OE モデル	$B(q)/F(q)$	1
	BJ モデル	$B(q)/F(q)$	$C(q)/D(q)$

○AR モデル (Auto-Regressive)

入力項 $u(k)$ がなく出力項のみであり、自由振動波形を表現するのに適している。

$$A(q)y(k) = \omega(k) \quad (1.1.3-6)$$

○ARMA モデル (Auto-Regressive Moving Average)

白色雑音に $C(q)$ というフィルタをかけることによって有色雑音を表現している。

$$A(q)y(k) = C(q)\omega(k) \quad (1.1.3-7)$$

○ARX モデル (Auto-Regressive eXo-geneous)

構造物の入出力データが得られている場合に適用できる、最も単純なモデル構造である。

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + \omega(k) \quad (1.1.3-8)$$

○ARMAX モデル (Auto-Regressive Moving Average eXo-geneous)

ARMA モデルと同じく雑音の有色性を取り扱うことができる。

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)\omega(k) \quad (1.1.3-9)$$

○FIR モデル (Finite Impulse Response)

入力にフィルタ $B(q)$ をかけたものが出力となっているモデルである。出力 $y(k)$ に自己回帰項 $A(q)$ がないので振動系を表現することができないため、構造物の同定モデルとしては不適當である。

$$y(k) = B(q)u(k) + \omega(k) \quad (1.1.3-10)$$

○OE モデル (Output Error)

出力に直接雑音が足しあわされるモデルで、雑音が出力観測時の観測ノイズだとした場合に合理的である。

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \omega(k) \quad (1.1.3-11)$$

○BJ モデル (Box and Jenkins)

出力誤差モデルのもっとも一般的な形式である。

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)}\omega(k) \quad (1.1.3-12)$$

②多項式モデルのパラメータ推定

○一括処理型最小 2 乗法

実験により得られた測定値を直線 $y=ax+b$ に当てはめる問題に代表される最小 2 乗法は、多項式モデルのパラメータ推定においても適用される。

例えば ARX モデルの場合、(1.1.3-1)式を出力 $y(k)$ について書き換えると次のとおり。

$$y(k) = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(k) + \omega(k) \quad (1.1.3-13)$$

但し、パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta} = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T$

$$\text{データベクトル } \boldsymbol{\varphi}(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T$$

このとき予測誤差は

$$\varepsilon(k) = y(k) - \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(k) \quad (1.1.3-14)$$

で与えられ、予測誤差として 2 次関数を選び最小化するようなパラメータ推定方法を最小 2 乗法という (なお、予測誤差として \log 関数を選ぶ方法は最尤推定法といわれる)。

最小 2 乗法におけるパラメータ推定のための評価規範は次式のようなになる。

$$J_N(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{y(k) - \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\varphi}(k)\}^2 \quad (1.1.3-15)$$

さらに計算すると、次式が得られる。

$$J_N(\boldsymbol{\theta}) = c(N) - 2\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{f}(N) + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{R}(N) \boldsymbol{\theta} \quad (1.1.3-16)$$

$$\text{但し、 } \mathbf{R}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \boldsymbol{\varphi}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k) \quad : (\mathbf{n}_a + \mathbf{n}_b) \times (\mathbf{n}_a + \mathbf{n}_b) \text{ 行列}$$

$$\mathbf{f}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k) \boldsymbol{\varphi}(k) \quad : (\mathbf{n}_a + \mathbf{n}_b) \text{ 次元ベクトル}$$

$$c(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y^2(k) \quad : \text{スカラ}$$

上式において評価規範 $J_N(\boldsymbol{\theta})$ を $\boldsymbol{\theta}$ に関して微分して $\mathbf{0}$ とおくと、 $\boldsymbol{\theta}$ に関する連立 1 次方程式が得られる。これを解くことにより、パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}$ を推定することができる。

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(N) = \mathbf{R}^{-1}(N) \mathbf{f}(N) \quad (1.1.3-17)$$

○逐次処理型最小 2 乗法

先に述べた一括処理で行う最小 2 乗法では、大規模な逆行列演算を行う場合、計算機の性能によってはリアルタイム性の確保や、構造物の動特性の時間変化への追従が難しい（但し一括処理であっても取り扱うデータの幅を短く区切って適用すれば対応可能とする考え方もある）。そのような場合に対処するため、逐次型のパラメータ推定手法を適用することがある。

代表的な逐次型のパラメータ推定手法として、逐次最小 2 乗法がある。基本的には、新しい計測データが 1 個追加されるごとにパラメータ補正を行っていく考え方であるが、パラメータ推定初期値や忘却係数などの専門家の判断を要する設定を必要とする。

③多項式モデルからのモード特性同定

多項式モデルのパラメータ自体は物理的意味を持たないため、建物の損傷指標に変換する必要がある。そこで、推定された多項式モデルのパラメータを、次の手順により、固有振動数や減衰定数といったモーダルパラメータに変換する。

ARX モデルの場合は(4)式に基づき、伝達関数 $G(q)$ を求めることができ、次式で再定義することができる。

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} = k + \sum_{i=1}^{n_a} \frac{r_i}{1 - p_i q^{-1}} \quad (1.1.3-18)$$

ここで p_j は $A(q)$ の根、つまり伝達関数 $G(q)$ の極である。 r_j は雑音特性 $H(q)$ を部分分数展開したときに留数として求めることができる。 k は直接項である。

最終的に伝達関数の極 p_i から、次式により対象構造物の i 次の固有振動数 ω_i 及び減衰定数 h_i を推定する。

$$\omega_i = \frac{|\log p_i|}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(\log |p_i|)^2 + (\arg p_i)^2}}{\Delta t} \quad (1.1.3-19)$$

$$h_j = -\frac{\log |p_i|}{\omega_i \Delta t} \quad (1.1.3-20)$$

但し、 Δt は解析を行うサンプリング周期 (秒)。

(4) 状態空間モデルを用いたシステム同定理論³

①状態空間モデルの構造

建物の 3 軸方向成分の応答が観測されている場合は、多入力多出力 (MIMO) モデルで同定問題を捉えていく必要がある。状態空間モデルは、参照する入出力データを単純にベクトル表記することにより MIMO モデルに容易に拡張することができる。

システムの次数が n_{states} である n_{in} 入力 n_{out} 出力モデルの離散時間システムの状態空間表現は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k \end{aligned} \quad (1.1.3-21)$$

但し、 $\mathbf{x}_k \in \mathcal{R}^{n_{states}}$ は状態ベクトル、 $\mathbf{u}_k \in \mathcal{R}^{n_{in}}$ 及び $\mathbf{y}_k \in \mathcal{R}^{n_{out}}$ は入出力ベクトル、

$\mathbf{A} \in \mathcal{R}^{n_{states} \times n_{states}}$ 、 $\mathbf{B} \in \mathcal{R}^{n_{states} \times n_{in}}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathcal{R}^{n_{out} \times n_{states}}$ 、 $\mathbf{D} \in \mathcal{R}^{n_{out} \times n_{in}}$ は定数行列。

②状態空間モデルのパラメータ推定

状態空間モデルのパラメータ推定問題は、「入力信号 \mathbf{u}_k 及び出力信号 \mathbf{y}_k からシステム特性行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ を推定する」こととして定義され、部分空間法が適用できる。部分空間法は、計測されたデータを信号部分空間と雑音部分空間に分解する手法で、通信・制御など多くの分野で用いられている。

部分空間法は、自由振動などの出力データのみからパラメータを推定する手法と、入出力データを参照してパラメータ推定する手法に分かれ、提案されているアルゴリズムも多岐にわたる。

○出力データのみからのパラメータ推定 (自由振動データからの推定)

- ・ ITD 法 (Ibrahim Time Domain)
- ・ ERA 法 (Eigensystem Realization Algorithm)
- ・ SSI 法 (Stochastic Subspace Identification)

○入出力データからのパラメータ推定

- ・ Moonen らによる方法

³ 片山徹「部分空間法によるシステム同定-実現理論からの接近-」システム/制御/情報、vol. 41、No. 9、pp. 380-387 (1997) など

- ・ MOESP 法 (MIMO Output-Error State sPace)
- ・ N4SID 法 (Numerical algorithm for Subspace-based State Space)

③状態空間モデルからのモード特性同定

部分空間法により得られる状態空間モデルのモード情報は、状態遷移行列 \mathbf{A} に格納されている。そこで行列 \mathbf{A} の固有値問題を解くことにより、多項式モデルの場合と同様、(1.1.3-19)及び(1.1.3-20)式に基づき、固有振動数及び減衰定数を求めることができる。

1. 1. 4 構造物の損傷推定手法

建築構造物の実測データからモデルに基づく損傷推定手法に関しては、過去多くの研究報告がなされてきた。ここでは次の4つの観点から損傷推定手法を類型整理し、それぞれの特徴をまとめていく。

- モード特性同定による損傷推定 (1.1.4.1)
- 物理パラメータの直接同定による損傷推定 (1.1.4.2)
- モード特性に基づく物理パラメータの段階的同定による損傷推定 (1.1.4.3)
- ソフトコンピューティングを利用した損傷推定 (1.1.4.4)

1.1.4.1 モード特性同定による損傷推定

固有振動数は、入出力関係を捉えるための最低2個のセンサから経時変化を追跡でき、あらゆる構造物に共通の指標として構造物間の比較やデータベース化が行いやすいため、簡易かつ汎用的なシステム構築に適している。

層レベルのローカルな損傷推定を行う場合は、各層1個のセンサが必要となるが、高次モードを含めたモード形状の変化を利用して、おおまかに損傷位置を特定できる。しかし、モード特性情報のみでは、損傷程度まで定量的に把握することは困難である。

損傷によるモード特性の変化を同定するための逆解析法は、1.1.3に記載した多項式モデルや状態空間モデルを用いた時間領域の解析以外にも、カーブフィッティング等の周波数領域の解析など方法論が多岐にわたる。ここでは、損傷指標に応じて適切な手法を選択することが重要であるため、手法単位ではなく、モーダルパラメータとして何を損傷指標とするかに着目し分類する。

表 1.1.4.1-1 損傷指標となるモーダルパラメータの特徴

損傷指標	メリット	デメリット
固有振動数 (基本モード)	○少ないセンサ数で推定可能 ○建物全体の損傷有無を推定可能	▼損傷に対する感度がやや低い ▼層レベルの損傷推定は困難 ▼損傷程度の定量的把握が困難
固有振動数 (複数モード)	○少ないセンサ数で推定可能 ○層レベルの損傷位置を推定可能	▼高次モードの推定精度がやや低い ▼損傷程度を定量的に把握するためには、他技術を組合せる必要がある
モード形状 (振幅)	○層レベルの損傷位置を推定可能	▼各層に最低1つのセンサ数が必要 ▼損傷程度の定量的把握が困難 ▼高次モードの推定精度がやや低い
モード形状 (層間変形角)	○層レベルの損傷位置を推定可能	▼各層に最低1つのセンサ数が必要 ▼損傷程度の定量的把握が困難 ▼高次モードの推定精度がやや低い
モード形状 (曲率)	○損傷に対する感度が高い ○層レベルの損傷位置を推定可能	▼各層に最低1つのセンサ数が必要 ▼ノイズの影響を受けやすい ▼高次モードの推定精度がやや低い