

# A SUMMARY REVIEW OF VIBRATION-BASED DAMAGE IDENTIFICATION METHODS

Scott W. Doebling, Charles R. Farrar, and Michael B. Prime  
Engineering Analysis Group  
Los Alamos National Laboratory  
Los Alamos, NM

## ABSTRACT

### 要旨

#### 【抄訳】

この論文では、計測した振動応答の変化を調べることによって、構造系と力学系における損傷の特徴を明らかにし、発生位置を検出する手法の概要を説明する。振動を利用した損傷同定の研究は、過去数年間で急速に拡大している。この技術の背後にある基本的な考え方は、「モードパラメータ(特に周波数、モード形状、モード減衰)は、構造体の物理特性(質量、減衰、剛性)の関数である」ということである。つまり、物理特性の変化により、モード特性に検出可能な変化が生じるのである。この技術を発展させるための方法が発表されており、モデルベースと非モデルベースによる比較や、線形と非線形の比較によって与えられる損傷検出のレベル等、様々な基準に従って分類されている。それらの実施方法と正確さに関する難しさを含めて、一般論として説明する。また、実際のエンジニアリングシステムにおける技術の歴史と今後の計画の要約を示す。最後に、振動を利用した損傷同定の分野における、今後の研究のための重要な課題について考察する。

This paper provides an overview of methods to detect, locate, and characterize damage in structural and mechanical systems by examining changes in measured vibration response. Research in vibration-based damage identification has been rapidly expanding over the last few years. The basic idea behind this technology is that modal parameters (notably frequencies, mode shapes, and modal damping) are functions of the physical properties of the structure (mass, damping, and stiffness). Therefore, changes in the physical properties will cause detectable changes in the modal properties. The motivation for the development of this technology is presented. The methods are categorized according to various criteria such as the level of damage detection provided, model-based vs. non-model-based methods and linear vs. nonlinear methods. The methods are also described in general terms including difficulties associated with their implementation and their fidelity. Past, current and future-planned applications of this technology to actual engineering systems are summarized. The paper concludes with a discussion of critical issues for future research in the area of vibration-based damage identification.

この論文では、計測した振動応答の変化を調べることによって、構造系と力学系における損傷の特徴を明らかにし、発生位置を検出する手法の概要を説明する。振動を利用した損傷同定の研究は、過去数年間で急速に拡大している。この技術の背後にある基本的な考え方は、「モードパラメータ(特に周波数、モード形状、モード減衰)は、構造体の物理特性(質量、減衰、剛性)の関数である」ということである。つまり、物理特性の変化により、モード特性に検出可能な変化が生じるのである。この技術を発展させるための方法が発表されており、モデルベースと非モデルベースによる比較や、線形と非線形の比較によって与えられる損傷検出のレベル等、様々な基準に従って分類されている。それらの実施方法と正確さに関する難しさを含めて、一般論として説明する。また、実際のエンジニアリングシステムにおける技術の歴史と今後の計画の要約を示す。最後に、振動を利用した損傷同定の分野における、今後の研究のための重要な課題について考察する。

## INTRODUCTION

The interest in the ability to monitor a structure and detect damage at the earliest possible stage is pervasive throughout the civil, mechanical, and aerospace engineering communities. For the purposes of this paper, damage is defined as changes introduced into a system, either intentional or unintentional, which adversely effect the current or future performance of that system. These systems can be either natural or man-made. As an example, an anti-aircraft missile is typically fired to intentionally introduce damage that will immediately alter the flight characteristics of the target aircraft. Biological systems can be unintentionally subject to the damaging effects of ionizing radiation. However, depending on the levels of exposure, these systems may not show the adverse effects of this damaging event for many years or even future generations. Implicit in this definition of damage is that the concept of damage is not meaningful without a comparison between two different states of the system, one of which is assumed to represent the initial, and often undamaged, state.

Most currently used damage identification methods are included in one of the following categories: visual or localized experimental methods such as acoustic or ultrasonic methods, magnetic field methods, radiography, eddy-current methods or thermal field methods (Doherty, 1997). All of these experimental techniques require that the vicinity of the damage is known *a priori* and that the portion of the structure being inspected is readily accessible. The need for quantitative global damage detection methods that can be applied to complex structures has led to the development and continued research of methods that examine changes in the vibration characteristics of the structure.

The increase in research activity regarding vibration-based damage detection is the result of the coupling between many factors. These factors can be generally categorized as spectacular failures resulting in loss of life that have received ample news media coverage, economic concerns, and recent technical advancements. Failures such as the in-flight loss of the exterior skin on an Aloha Airlines flight in Hawaii and the resulting media coverage focus the public's attention on the need for testing, monitoring, and evaluation to ensure the safety of structures and mechanical systems used by the public. The public's concerns, in turn, focus the attention of politicians on this issue and, hence, industry and regulatory agencies are influenced to provide the funding resources necessary for the development and advancement of this technology. The current state of aging infrastructure and the economics associated with its repair have also been motivating factors for the development of methods that can be used to detect the onset of damage or deterioration at the earliest possible stage. Finally, technological advancements including increases in cost-effective computing memory and speed, advances in sensors including non contact and remotely monitored sensors and adaptation and advancements of the finite element method represent technical developments that have contributed to recent improvements in vibration-based damage detection. Additional factors that have contributed to these improvements are the adaptation and advancements in experimental techniques such as modal testing (most recently by the civil engineering community), and development of linear and nonlinear system identification methods. Recently, a workshop specific to the topic of vibration based health monitoring was held at Stanford University (Chang, 1997).

It is the authors' speculation that damage or fault detection, as determined by changes in the dynamic properties or response of systems, has been practiced in a qualitative manner, using acoustic techniques, since modern man has used tools. More recently, this subject has received considerable attention in the technical literature where there has been a concerted

effort to develop a firmer mathematical and physical foundation for this technology. However, the basic idea remains that commonly measured modal parameters (notably frequencies, mode shapes, and modal damping) are functions of the physical properties of the structure (mass, damping, and stiffness). Therefore, changes in the physical properties, such as reductions in stiffness resulting from the onset of cracks or loosening of a connection, will cause detectable changes in these modal properties. Because changes in modal properties or properties derived from these quantities are being used as indicators of damage, the process of vibration-based damage detection eventually reduces to some form of a pattern recognition problem.

The idea that changes in vibration characteristics can provide information regarding damage in a structure is very intuitive and one may ask the question: Why has this technology taken such a long time to be formally and generally adopted by the modern engineering community? The answer is that there are several confounding factors making vibration-based damage identification difficult to implement in practice. First, standard modal properties represent a form of data compression. Modal properties are estimated experimentally from measured response-time histories. A typical time-history may have 1024 data points, and if measurements are made at 100 points, there are 102,400 pieces of information regarding the current state of the structure. For this discussion the additional data typically obtained from averaging will not be considered as providing supplemental data, but rather improving the accuracy of 100 measurements. Through system identification procedures commonly referred to as experimental modal analysis (Ewins, 1984) this volume of data is reduced to some number of resonant frequencies, mode shapes and modal damping values. This data compression is done because the modal quantities are easier to visualize, physically interpret, and interpret in terms of standard mathematical modeling of vibrating systems than are the actual time-history measurements. If twenty real modes are identified, then the 102,400 pieces of information will have been reduced to 2020-2040 pieces of information (20 modes each consisting of 1 resonant frequency value, 1 modal damping value and 100 modal amplitude values).

Intuitively, information about the current state of the structure must be lost in this data reduction and system identification process. The loss of information occurs primarily from the fact that for a linear system the modal properties are independent of the excitation signal characteristics (amplitude and frequency content) and the location of the excitation, whereas the time histories are not. In addition, if the input excites response at frequencies greater than those that can be resolved with the specified data sampling parameters, the identified modes will not provide any information regarding the higher frequency response characteristics of the structure that are contributing to the measured time-history responses. Within the measured frequency range of response it is often difficult to identify all the modes contributing to the measured response because of coupling between the modes that are closely spaced in frequency. This difficulty is observed more commonly at the higher frequency portions of the spectrum where the modal density is typically greater. Also, the introduction of bias (or systematic) errors, such as those that arise from windowing of the data, finite frequency resolution, and those that arise from changing environmental conditions during the test, will tend to make the identified modal parameters less representative of the true dynamic properties of the structure.

Another confounding factor is the fact that damage typically is a local phenomenon. Local response is captured by higher frequency modes whereas lower frequency modes tend to capture the global response of the structure and are less sensitive to local changes in a structure. From a testing standpoint it is more difficult to excite the higher frequency

response of a structure, as more energy is required to produce measurable response at these higher frequencies than at the lower frequencies. These factors coupled with the loss of information resulting from the necessary reduction of time-history measurements to modal properties add difficulties to the process of vibration-based damage identification. These factors also contribute to the limitation of this technology to the research arena with only limited practice by the engineering community.

A logical question then is why not examine the time-histories directly for indications of damage? The answer is that, despite the difficulties associated with damage detection based on changes in modal properties, it is even more difficult to identify damage by examining response-time histories directly. To identify that damage has occurred based on the changes in patterns of these time histories and relate these changes to physical changes in the structure is a very difficult problem. If excitation sources change and/or environmental conditions change this process becomes even more difficult. However, it should be pointed out that in a situation where the system response changes from linear to nonlinear, time histories alone (actually their frequency domain power spectra) could be sufficient to identify damage. Generally, correct identification requires that the location of the damage be known *a priori*, as is typically the case with loosening of bearings on rotating machinery. Detecting the onset of nonlinear vibration behavior in rotating machinery represents one of the most widely practiced forms of vibration-based damage identification (Wowk, 1991).

Notwithstanding the difficulties discussed above, advances in vibration-based damage detection over the last 20-30 years have produced new methods of examining dynamic data for indications of structural damage. These methods are seeing more widespread applications. One of the most prominent examples of this application is NASA's space shuttle modal inspection system (Hunt, et al., 1990). Because of difficulties accessing the exterior surface caused by the thermal protective system, a vibration-based damage detection system was developed. This system has identified damage that would have eluded traditional non-destructive testing methods because of inaccessibility to the damaged components and has been adopted as a standard inspection tool for the Space Shuttle Orbiter structures.

It is the intent of this paper to provide an overview of these recent advances in vibration-based damage detection. This paper is based on a previous detailed review of the vibration-based damage detection literature (Doebbling, et al., 1996a). As mentioned previously, the field of damage identification is very broad and encompasses both local and global methods. This paper will be limited to global methods that are used to infer damage from changes in vibration characteristics of the structure. Many different issues are critical to the success of using the observed changes in mechanical vibration characteristics of a structure for damage identification and health monitoring. Among the important issues are excitation and measurement considerations, including the selection of the type and location of sensors, and the type and location of the excitations. Another important topic is signal processing, which includes such methods as Fourier analysis, time-frequency analysis and wavelet analysis. In this paper, these peripheral issues will not be directly addressed. The scope of this paper will be limited to the methods that use changes in modal properties (i.e. modal frequencies, modal damping ratios, and mode shapes) to infer changes in mechanical properties, and the application of these methods to engineering problems. The review includes both methods that are based solely on changes in the measured data as well as those methods that use a finite element model (FEM) in the formulation. The reader should note that methods based on identifying nonlinear response or non-parametric models (such as neural network-based approaches) are not included in this review. Also the large amount

of literature applicable to fault detection and diagnosis in rotating machinery is not reviewed. Application-specific experimental considerations are also not included within the scope of this paper.

## CLASSIFICATION OF DAMAGE AND DAMAGE IDENTIFICATION METHODS

### 損傷分類と損傷同定法

#### 【抄訳】

本章は、損傷分類と損傷同定法についてまとめている。

- 構造物の損傷状態は、線形性あるいは非線形性で分類できる。
- 線形損傷状態とは、初期の弾性構造物が損傷を受けた後も弾性体として挙動する場合に定義される。モード特性の変化は、構造物の幾何学形状の変化および（あるいは）材料特性の変化によるものであるが、構造物の応答は線形運動方程式でモデル化できる状態である。
- 非線形損傷とは、初期の弾性構造物が損傷を受けた後に非線形挙動を示す場合に定義される。例えば、通常の振動環境下での疲労き裂が開口と閉口を繰り返して伸展するものが挙げられる。
- 損傷同定法では、4つの損傷同定レベルで定義されている。
  - レベル1：損傷発生の決定
  - レベル2：損傷位置の決定
  - レベル3：損傷程度の定量化
  - レベル4：構造物の残存寿命の推定
- 損傷同定技術は、構造物性能の長期モニタリング法と重大災害によって引き起こされた損傷検出法で区別される。一般的には、構造物の健全度を評価するためのデータとして同じ解析技術が適用される。

The effects of damage on a structure can be classified as linear or nonlinear. A linear damage situation is defined as the case when the initially linear-elastic structure remains linear-elastic after damage. The changes in modal properties are a result of changes in the geometry and/or the material properties of the structure, but the structural response can still be modeled using linear equations of motion. Linear methods can be further classified as model-based and non-model based. Model-based methods assume that the monitored structure responds in some predetermined manner that can be accurately discretized by finite element analysis, such as the response described by Euler-Bernoulli beam theory.

構造物の損傷状態は、線形性あるいは非線形性で分類できる。線形損傷状態とは、初期の弾性構造物が損傷を受けた後も弾性体として挙動する場合に定義される。モード特性の変化は、構造物の幾何学形状の変化および（あるいは）材料特性の変化によるものであるが、構造物の応答は線形運動方程式でモデル化できる状態である。更に線形法は、モデル化によるものとモデル化によらないものに分類できる。モデル化手法とは、対象とする構造物がある条件下において離散化された有限要素解析どおりに応答すると仮定したものであり、例えばオイラー・ベルヌーイの梁理論による応答値のようなものである。

Nonlinear damage is defined as the case when the initially linear-elastic structure behaves in a nonlinear manner after the damage has been introduced. One example of nonlinear damage is the formation of a fatigue crack that subsequently opens and closes under the normal operating vibration environment. Other examples include loose connections that rattle and nonlinear material behavior such as that exhibited by polymers. The majority of the studies reported in the technical literature address only the problem of linear damage detection.

非線形損傷とは、初期の弾性構造物が損傷を受けた後に非線形挙動を示す場合に定義される。非線形損傷の一例としては、通常の振動環境下において疲労き裂が開口と閉口を繰り返して伸展するものが挙げられる。また、ガタガタ音を鳴らすようなルーズな継手部やポリマーのような非線形材料挙動もその一例である。文献に報告されている研究の大多数は、線形損傷検出問題にのみ取り組んだものである。

Another classification system for damage-identification methods defines four levels of damage identification, as follows (Rytter, 1993):

- Level 1: Determination that damage is present in the structure
- Level 2: Level 1 plus determination of the geometric location of the damage
- Level 3: Level 2 plus quantification of the severity of the damage
- Level 4: Level 3 plus prediction of the remaining service life of the structure

To date, vibration-based damage identification methods that do not make use of some structural model primarily provide Level 1 and Level 2 damage identification. When vibration-based methods are coupled with a structural model, Level 3 damage identification can be obtained in some cases. Level 4 prediction is generally associated with the fields of fracture mechanics, fatigue-life analysis, or structural design assessment and, as such, is not addressed in this paper.

一方、損傷同定法による分類システムは、以下に示すような4つの損傷同定レベルで定義されている (Rytter,1993) .

- レベル1 : 構造物に損傷発生の決定
- レベル2 : レベル1に加えて、損傷位置の決定
- レベル3 : レベル2に加えて、損傷程度の定量化
- レベル4 : レベル3に加えて、構造物の残存寿命の推定

構造モデルを使用しない振動に基づいた損傷同定法は、主にレベル1の損傷同定にレベル2の損傷同定を行うものである。振動に基づいた損傷同定法は、構造モデルと組み合わせて利用する場合があります、レベル3の損傷同定に適用される。一般的に、レベル4の残存寿命は、破壊力学、疲労寿命解析あるいは構造設計アセスメントなどの分野から推定される。

Another category of classification for damage identification techniques makes the distinction between methods that are used for continuous monitoring of structural performance and methods that are applicable to the detection of damage caused by extreme events. As an example, a system that uses continuous or intermittent accelerometer measurements from sensors mounted permanently to a bridge is different in terms of instrumentation and data acquisition requirements from a system that does not acquire data except during and immediately following an earthquake or a hurricane. It should be noted that the primary distinction between these situations has to do with the sensors and data acquisition system requirements. Typically, the same types of analytical techniques can be applied to the data to determine the integrity of the structure.

損傷同定技術に関する別のカテゴリーとして分類されるものとして、構造物性能の長期モニタリング法と重大災害によって引き起こされた損傷検出法に区別されている。例えば、橋梁に常に設置されたセンサーから連続的あるいは断続的に加速度を計測するシステムは、地震およびハリケーンの発生時およびその直後を除いてはデータを取得されないシステムとは、計測機器やデータ取得の点からも異なるものである。それは、主にセンサー配置やデータ取得に関するシステム要求で区別されるものである。一般的には、構造物の健全度を評価するためのデータとして同じ解析技術が適用される。

## EARLY DIFFICULTIES

### 研究初期の難題

#### 【抄訳】

振動ベースの損傷検出を軸とした最も近代的な研究は、1970年代～80年初めに海底油田業界により行われたが、ほとんどの提案技術は成功に至らなかった。水面上における計測で、唯一共振周波数についての情報が得られたが、環境変動の影響により損傷を原因としない測定値の変化が発生した。また、共振周波数だけが使われた場合、空間的な損傷位置を特定できない問題が見つかった。これらの失敗が元で、石油業界は、1980年代半ばにこの技術の追求の大部分を放棄した。

Most of the modern developments in vibration-based damage detection stem from studies performed in the 1970s and early 1980s by the offshore oil industry. See Vandiver (1975, 1977); Begg, et al. (1976); Loland and Dodds (1976); Wojnarowski (1977); Coppolino and Rubin (1980); Duggan et al. (1980); Kenley and Dodds (1980); Crohas and Lepert (1982); Nataraja (1983); and Whittome and Dodds (1983) for details on these studies. However, most of the proposed techniques were less than successful. Instead, it was found that above-water-line measurements could provide information about resonant frequencies only. Environmental conditions such as marine growth that added significant mass to the structure, equipment noise, and changing mass associated with changing fluid tank levels caused changes in the measurements that were not the result of damage. These tests also identified uniqueness issues associated with locating the damage spatially if only resonant frequencies are used. Because of the lack of success, the oil industry mostly abandoned pursuit of this technology in the mid- 1980s.

振動ベースの損傷検出を軸とした最も近代的な研究は、1970年代と1980年代の初め、海底油田業界により行われた。これらの研究の詳細は、Vandiver (1975, 1977), Begg, et al. (1976), Loland and Dodds (1976), Wojnarowski (1977), Coppolino and Rubin (1980), Duggan et al. (1980), Kenley and Dodds (1980), Crohas and Lepert (1982), Nataraja (1983), Whittome and Dodds (1983)等の文献を参照のこと。しかしながら、ほとんどの提案技術は成功に至らなかった。その代わり、水面上における計測では、唯一共振周波数についての情報が得られた。構造物の有効質量に付加されるマリングロス等の環境条件や装置騒音、流体タンクの水位変化に伴う質量変化により、損傷を原因としない測定値の変化が発生した。また、これらの研究では、共振周波数だけが使われた場合、空間的な損傷位置を特定できない問題が見つかった。これらの失敗が元で、石油業界は、1980年代半ばにこの技術の追求の大部分を放棄した。

# DAMAGE DETECTION BASED ON CHANGES IN BASIC MODAL PROPERTIES

## 基本的なモード特性の変化に基づく損傷検出

### 【抄訳】

本章は、振動モード特性の変化に基づく損傷検出の中で、特に、周波数変化に着目した開発事例についてまとめている。

- 構造特性が変化した際に振動周波数の変化を引き起こすことが観測され、損傷同定やヘルスマニタリングにモード手法が適用されるようになった。
- 損傷による周波数の変化は感度が非常に低いため、計測精度を向上させるあるいは損傷レベルを上げないと、損傷検出に周波数変化を適用することは困難である。
- 40橋における高速道路橋の振動計測結果より、周波数の変化が損傷の指標として、十分な感度を有していないと結論付けた。プレートガーターの支間中央部における断面剛性が96.4%減少した場合、橋梁全体の曲げ剛性の減少は21%となり、ほんのわずかなモード周波数の減少が観測される程度であった。
- 工場の品質管理のように環境条件が制御された非常に厳密な計測が可能な場合に、周波数変化による損傷検出の適用が実用化されている。例えば、精密な正弦波スイープ波形を計測するホモダイン検出法である「共鳴超音波分光法」をボールベアリングの真球度検出に適用した。
- マルチ周波数変化は、異なる複数の位置で構造物の変化を計測して、モード周波数の組合せの変化を捉えることにより、構造物の損傷に対する空間的な情報を得ることができる。ただし、高モード密度が生じる局所モードを励起および抽出するには限界があり、損傷同定をより困難なものにしている。
- レベル1 損傷同定のカテゴリーに分類される順問題は、既知である損傷タイプから周波数変化を計算するものであり、損傷を数学モデルでモデル化して、実測周波数と損傷モデルによる推定周波数を比較検討するものである。
- レベル2あるはレベル3の損傷同定である逆問題は、周波数の変化からクラックの長さあるいは位置等の損傷パラメーターを算定するものである。

Numerous other investigators who have tried to examine changes in basic modal properties have encountered issues similar to those encountered in the offshore oil industry. In this context basic modal properties will be defined as resonant frequencies, modal damping, and mode shape vectors.

基本的なモード特性の変化に関して調査しようとする、海洋石油産業において直面したものと同様な課題に直面する。ここで、基本的なモード特性としては、共振周波数、モード減衰およびモード形状ベクトルが定義される。

### FREQUENCY CHANGES

#### 周波数変化

The amount of literature related to damage detection using shifts in resonant frequencies is quite large. Salawu (1997a) presents an excellent review on the use of modal frequency changes for damage diagnostics. The observation that changes in structural properties cause changes in vibration frequencies was the impetus for using modal methods for damage identification and health monitoring. Because of the large amount of literature, not all papers that the authors have reviewed on this subject are included in the reference list of

this paper. A more thorough review and reference list can be found in Doebling (1996a). An effort has been made to include the early work on the subject, some papers representative of the different types of work done in this area, and papers that are considered by the authors to be significant contributions in this area.

共振周波数の変化を用いた損傷検出に関する文献は非常にたくさん発表されている。Salawu (1997a)は、モード周波数の変化に着目した損傷診断法に関する素晴らしい成果を発表している。構造特性が変化した際、振動周波数の変化を引き起こすことが観測されたことによって、損傷同定やヘルスマニタリングにモード手法を適用するきっかけとなった。巻末の参考文献には、モード手法による損傷同定やヘルスマニタリングに関してレビューした文献を記載している。参考文献にも記載されているDoebling (1996a)は、初期の検討段階を含めて、この分野において素晴らしい成果を挙げている。

It should be noted that frequency shifts have significant practical limitations for applications to the types of structures considered in this review, although ongoing and future work may help resolve these difficulties. The somewhat low sensitivity of frequency shifts to damage requires either very precise measurements or large levels of damage. However, recent studies have shown that resonant frequencies have much less statistical variation from random error sources than other modal parameters (Farrar, et al. (1997), Doebling, et al. (1997a)).

現時点での評価では、周波数の変化を適用するには構造物の種類がかなり限定されることになるが、進行中あるいは将来の研究成果によってそれらの問題が解決されるであろう。損傷による周波数の変化は、感度が非常に低いため、計測精度を向上させるあるいは損傷レベルを上げるかしないと適用することが難しい。しかし、最近のFarrarら(1997)、Doeblingら(1997a)の研究では、他のモードパラメーターに比べて、共振周波数は不規則なエラー要因による統計学的な変動量が非常に小さいことが指摘されている。

For example, in offshore platforms damage-induced frequency shifts are difficult to distinguish from shifts resulting from increased mass from marine growth. Tests conducted on the Interstate 40 highway bridge (Farrar, et al., 1994) also demonstrate that frequency shifts are not sensitive indicators of damage. When the cross-sectional stiffness at the center of a main plate girder had been reduced 96.4%, reducing the bending stiffness of the overall bridge cross-section by 21%, no significant reductions in the modal frequencies were observed. Currently, using frequency shifts to detect damage appears to be more practical in applications where such shifts can be measured very precisely in a controlled environment, such as for quality control in manufacturing. As an example, a method known as “resonant ultrasound spectroscopy”, which uses homodyne detectors to make precise sine-sweep frequency measurements, has been used successfully to determine out-of-roundness of ball bearings (Migliori, et al., 1993).

例えば、海洋プラットフォームの損傷によって引き起こされた周波数の変化が、損傷に起因するものなのか、質量増加によるものなのか、海洋生成物によるものなのかを判断することが困難である。Farrarら(1994)は、40橋における高速道路橋の振動計測結果より、周波数の変化が損傷の指標として、十分な感度を有していないことを結論付けた。プレートガーターの支間中央部における断面剛性が96.4%減少した場合、橋梁全体の曲げ剛性の減少は21%となり、ほんのわずかなモード周波数の減少が観測される程度である。最近では、工場の品質管理のように環境条件が制御された非常に厳密な計測が可能な場合に、周波数変化による損傷検出の適用が実用化されてきている。例えば、Miglioriら(1993)は、精密な正弦波スイープ波形を計測するホモダイン検出法である「共鳴超音波分光法」をボールベアリングの真球度の検出に適用した。

Also, because modal frequencies are a global property of the structure, it is not clear that shifts in this parameter can be used to identify more than Level 1 damage. In other words, the frequencies generally cannot provide spatial information about structural changes. An exception to this limitation occurs at higher modal frequencies, where the modes are associated with local responses. However, the practical limitations involved with the excitation and extraction of these local modes, caused in part by high modal density, can make them difficult to identify. Multiple frequency shifts can provide spatial information about structural damage because changes in the structure at different locations will cause different combinations of changes in the modal frequencies. However, as pointed out by several authors, there are often an insufficient number of frequencies with significant enough changes to determine the location of the damage uniquely.

モード周波数は、構造物全体の特性であるため、レベル1の損傷同定にモード周波数の変化を適用できるか否かは定かでない。また、周波数は、一般的に構造物の変化に対する空間的な情報を供給するものではない。ただし、局所的な応答現象に関連した高次モードの周波数はその例外である。しかし、高モード密度が生じる局所モードを励起および抽出するには限界があり、損傷同定をより困難なものにしている。マルチ周波数変化は、異なる複数の位置で構造物の変化を計測して、モード周波数の組合せの変化を捉えることにより、構造物の損傷に対する空間的な情報を得ることができる。しかし、損傷位置を検出するために必要な周波数の数が不足することがしばしば起こることが指摘されている。

## The Forward Problem

### 順問題

The forward problem, which usually falls into the category of Level 1 damage identification, consists of calculating frequency shifts from a known type of damage. Typically, the damage is modeled mathematically, then the measured frequencies are compared to the predicted frequencies to determine the damage. This method was used extensively by the previously mentioned offshore oil industry investigators.

レベル1 損傷同定のカテゴリーに分類される順問題は、既知である損傷タイプから周波数変化を計算するものである。通常、損傷を数学モデルでモデル化して、実測周波数と損傷モデルによる推定周波数を比較検討する。本手法は、先に述べた海洋石油産業の調査員がよく使っているものである。

As an example, Cawley and Adams (1979) give a formulation to detect damage in composite materials from frequency shifts. They start with the ratio between frequency shifts for two different modes. A grid of possible damage points is considered, and an error term is constructed that relates the measured frequency shifts to those predicted by a model based on a local stiffness reduction. A number of mode pairs is considered for each potential damage location, and the pair giving the lowest error indicates the location of the damage. The formulation does not account for possible multiple-damage locations. Special consideration is given to the anisotropic behavior of the composite materials.

例えば、Cawley と Adams (1979)は、周波数の変化から複合材料における損傷検出を定式化した。彼らは、2つ異なるモードの周波数変化の比率に着目した。まず、損傷が発生しそうな点の格子を考えて、周波数変化の実測値と局所的に剛性を低下させたモデルによる推定値との関係から誤差項を算定する。各モードの組合せから損傷位置としての可能性を考えて、誤差が最も小さくなるモードの組合せを損傷位置として決定付ける。この定式化は、複数の損傷位置を検出するものではない。複合材料の異方性挙動を有する場合、特に留意する必要がある。

Friswell, et al. (1994) present the results of an attempt to identify damage based on a known catalog of likely damage scenarios. The authors presumed that an existing model of the structure is highly accurate. Using this model, they computed frequency shifts of the first several modes for both the undamaged structure and all the postulated damage scenarios. Then ratios of all the frequency shifts were calculated. For the candidate structure, the same ratios were computed, and a power-law relation was fit to these two sets of numbers. When the body of data is noise-free, and when the candidate structure lies in the class of assumed damages, the correct type of damage should produce a fit that is a line with unity slope. For all other types of damage the fit will be inexact. The likelihood of damage was keyed on the quality of the fit to each pattern of known damage. Two measures of fit were used: the first was related to the correlation coefficient; the second was a measure of how close the exponent and coefficient were to unity. Both measures were defined on a scale from 0 to 100. It was hypothesized that damage was present when both measures were near 100.

Friswellら (1994)は、想定される損傷シナリオの一覧より損傷同定に適用した結果を報告している。著者らは、構造物の現存モデルが非常に高い精度を有するものと推察している。このモデルを使って、彼らは健全時と想定した全ての損傷シナリオを対象として、いくつかの低次モードの周波数変化を計算した。そして、全ての周波数変化の比率を計算した。候補構造の中から、同じ比率が計算された2セットに対してべき乗則で近似される。データ全体にノイズが含まれず、かつ候補構造が仮定された損傷クラスにある場合、正しい損傷タイプとして一定勾配の直線近似が与えられる。その他の損傷タイプに対しては、正確な近似が得られないであろう。損傷の尤度は、損傷パターンの近似精度が鍵を握っている。近似手法としては、相関係数によるものと、指数回帰係数によるものがある。両手法とも0から100のスケールで定義されている。損傷が存在する場合には、両手法とも100に近い値となる。

Juneja, et al. (1997) present a forward technique called contrast maximization to match the response of the damaged structure to a database of structural responses to locate the damage. They also develop a predictive measure of the detectability of the damage. Gudmundson, (1982), Tracy and Pardoen, (1989), and Penny, et al. (1993) present other approaches to the forward problem.

Juneja,ら (1997)は、損傷した構造物の応答と構造応答データベースと損傷位置を組み合わせたコントラスト最大化と呼ばれる順問題技法を公表している。また、彼らは、損傷検出推定法に関しても開発している。Gudmundson (1982), Tracyと Pardoen (1989)そして Pennyら (1993)は、順問題への他のアプローチ手法を公表している。

## The Inverse Problem

### 逆問題

The inverse problem, which is typically Level 2 or Level 3 damage identification, consists of calculating the damage parameters, e.g., crack length and/or location, from the frequency shifts. Lifshitz and Rotem (1969) present what may be the first journal article to propose damage detection via vibration measurements. They look at the change in the dynamic moduli, which can be related to the frequency shift, as indicating damage in particle-filled elastomers. The dynamic moduli, which are the slopes of the extensional and rotational stress-strain curves under dynamic loading, are computed for the test articles from a curve-fit of the measured stress-strain relationships, at various levels of filling.

レベル2あるはレベル3の損傷同定である逆問題は、周波数の変化からクラックの長さあるいは位置等の損傷パラメーターを算定するものである。LifshitzとRotem (1969)は、振動計測によって損傷検出

を推定する最初の文献を発表した。彼らは、周波数の変化に関連する動的係数の変化に着目し、微粒子充填エラストマーの損傷を検出した。動的係数は、動的荷重の作用下における引張方向と回転方向の応力ひずみ曲線勾配であり、さまざまな充填状態における応力ひずみ関係の実測値の曲線近似から前提条件として計算される。

Stubbs and Osegueda (1990a, 1990b) developed a damage detection method using the sensitivity of modal frequency changes that is based on work by Cawley and Adams (1979). In this method, an error function for the each mode and each structural member is computed assuming that only one member is damaged. The member that minimizes this error is determined to be the damaged member. This method is demonstrated to produce more accurate results than their previous method in the case where the number of members is much greater than the number of measured modes. The authors point out that this frequency-change sensitivity method relies on sensitivity matrices that are computed using a FEM. This requirement increases the computational burden of these methods and also increases the dependence on an accurate prior numerical model. To overcome this drawback, Stubbs, et al. (1992) developed a damage index method, which is presented in the section on methods that use mode shape curvature changes.

Stubbsと Osegueda (1990a, 1990b)は、CawleyとAdams (1979)の研究成果に基づき、モード周波数変化の感受性を用いた損傷検出手法を開発した。この手法は、あるひとつの部材が損傷したと仮定して、各モードと各構造部材の誤差関数を計算するものである。この誤差関数を最小化する部材が損傷部材として検出される。部材数が計測したモード数よりも多くなる場合、従来手法に比べて検出精度の向上が認められた。著者らは、この周波数変化感受性手法の信頼性に関して、FEMを使って計算された感受性マトリックスで検証した。この要求事項は、これらの手法の計算負荷を増加させるとともに、より正確な数値モデルに対する依存性が増加する。この欠点を解決するために、Stubbsら (1992)は、モード形状の曲率変化による損傷指標法を開発した。

Morassi (1997) presents an inverse technique to localize notch effects in steel frames using changes in modal frequency. This study focuses particularly on the accuracy of the assumed reference (undamaged) structural configuration and the practicality of making vibration measurements in the field. Koh, et al. (1995) use a recursive method based on static condensation to locate damage based on measured modal frequencies.

Morassi (1997)は、モード周波数の変化を用いて鋼骨組構造におけるノッチ効果の位置を検出するため逆問題技法を発表した。この研究は、健全な想定構造物の正確な諸言や実橋振動計測の実用性に焦点を当てている。Kohら (1995)は、モード周波数計測から損傷位置を検出するために、静的縮約による回帰法を適用した。

Further examples of inverse methods for examining changes in modal frequencies for indications of damage are presented by: Adams, et al. (1978); Wang and Zhang (1987); Stubbs, et al. (1990); Hearn and Testa (1991); Richardson and Mannan (1992); Sanders, et al. (1992); Narkis (1994); Brincker, et al. (1995); Balis Crema, et al. (1995); Skjaerbaek, et al. (1996a); Al-Qaisia and Meneghetti (1997); and Villemure, et al. (1996).

この他、モード周波数の変化から損傷同定するために逆問題を検討した研究事例としては、Adamsら(1978)、WangとZhang (1987)、Stubbsら(1990)、HearnとTesta (1991)、RichardsonとMannan (1992)、Sandersら(1992)、Narkis (1994)、Brinckerら (1995)、Balis Cremaら(1995)、Skjaerbaekら (1996a)、Al-QaisiaとMeneghetti (1997)、Villemureら (1996)が挙げられる。

# MODE SHAPE CHANGES

## モード形状の変化

[抄訳]

モード形状の変化による損傷評価に関して以下のように示されている。

- FEM を使用しない構造物の損傷位置同定について、モード形状に対するモードの保証基準 (MAC) を使用が提案されている。モード形状は様々な手法により分割され、全ての分割手法において、MAC の変化が構造物の損傷位置同定に適用される。
- 特定のモードの節点に近接する測定点に基づく MAC である “Node line MAC” は損傷によるモード形状の変化に対するより敏感な指標であり、損傷位置同定のためにモードの節点と最大振幅点を関連づける簡単な手法およびモード形状の相対的変化の測定手法が提案されている。
- 構造の並進および回転に関する誤差照査 (STRECH) としてモード形状の変化によるモード誤差位置同定の手法が示されている。関連するモード変位の比を用いて、STRECH は異なる 2 つの構造自由度における構造剛性の正確性を評価できる。
- また、モード形状データに対して Laplacian 演算子の差分近似を使用した梁の損傷位置検出手法、固有ベクトル感度解析に基づく構造損傷同定のためのセンサーの位置の優先付けの手法が提案されている。他にも、モード形状の変化の検証について MAC (COMAC) の値を調整している研究事例が報告されている。

### (1) モード形状の曲率／ひずみモード形状変化

モード形状の曲率とひずみモード形状による損傷評価に関して以下のように示されている。

- 振動変化の源の空間的な情報を得るために、モード形状を適用する代わりに、曲率 (曲率と曲げひずみは直接的関係) のようなモード形状からの誘導体を使用する。なお、曲率はモード変位より中央差分演算を用いて算出可能である。
- 測定モードの曲率から定義される 2 つの構造自由度の間におけるモードひずみエネルギーの減少に基づく手法が提示されており、基準となるモードパラメータ無しにこの手法を使用した損傷位置の決定の可能性も検証されている。
- モード形状からの曲率の数値的な算出が結果として許容できない誤差に結びつく場合には、測定されたひずみ直接使用することにより結果が改善されることが報告されている。

### (2) 動的に測定された柔性に基づく手法

動的に測定された柔性に基づく損傷評価に関して以下のように示されている。

- 損傷同定手法として、動的測定された柔性マトリックスを使用する。柔性マトリックスと静剛性マトリックスは逆関係であり、柔性マトリックスは作用力と変位を関係付ける。したがって、柔性マトリックスの各列は、対応する自由度に作用させた単位荷重に対応する変形形状を示している。質量標準化された測定モード形状と振動数から、測定された柔性マトリックスを評価することができる。この方法による柔性マトリックスの定式化は、通常は極めて低次のモードのみが測定されることから、近似式となる。
- 通常、健全な構造物のモードにより合成された柔性マトリックスあるいは FEM による柔性マトリックスを損傷した構造物のモードにより合成された柔性マトリックスを比較することにより、損傷が柔性マトリックスにより検出される。モード振動数の二乗との逆相関のため、測定された柔性マトリックスは低次モードにおける変化に最も敏感である。

### (3) 柔性変化の比較

柔性変化の比較による損傷の評価に関する手法について以下のように示されている。

- 橋梁の相対的な健全性を示す状態指標として、測定された柔性の使用が提案されている。また、構造物の測定された柔性の変化に基づく損傷検出と位置決定の手法も提案されている。

- 橋梁の測定された柔性を解析し、基準となるデータの有無に関わらず断面方向の柔性の異常から損傷を発見できることが報告されている。
- 構造物のバネ-質点モデルの荷重-変位関係の変化を評価する損傷検証手法(STRECH)のインプットとして測定された柔性を使用する手法が提案している。
- 等分布荷重に柔性を用いて算出される等分布荷重による表面の曲率は局部損傷の敏感な指標であることを提示が示されている。等分布荷重による柔性行列は、測定された柔性行列の列の和により構成され、曲率は等分布荷重による柔性の中央差分演算により算出される。さらに、関連する評価方法などについて以下の手法が紹介されている。

**(調和チェック法)**

調和チェック法は、構造剛性行列と動的に測定された柔性行列の間の擬逆関係を基本としている。誤差行列は、この擬逆関係はどの程度満足されているかを測定することにより定義される。誤差行列の最大値の発生位置をエラーの位置決定など損傷検出に適用される。

**(剛性誤差行列法)**

剛性誤差行列法は、健全な剛性行列と構造物の柔性変化の関数である誤差行列を計算することを基本としている。損傷同定において、剛性行列は一般的に、質量行列より情報を提供するため、誤差行列においてより幅広く使用されている。

**(残差柔性の影響)**

残差柔性行列は、測定された振動数域を超えたモードの柔性行列に対する影響を示している。そのため、正確な柔性行列は測定されたモードと残差柔性行列に関係付けられ、測定された柔性行列の計算に対する残差柔性行列の適用が静的柔性行列のより正確な推定に繋がることを提示されている。

**(測定された剛性行列の変化)**

損傷同定において適用される動的に測定された柔性行列の適用における変化は、動的に測定された柔性行列との擬逆関係により定義されるように、動的に測定された剛性行列に適用される。

West (1984) presents what is possibly the first systematic use of mode shape information for the location of structural damage without the use of a prior FEM. The author uses the modal assurance criteria (MAC) to determine the level of correlation between modes from the test of an undamaged Space Shuttle Orbiter body flap and the modes from the test of the flap after it has been exposed to acoustic loading. The mode shapes are partitioned using various schemes, and the change in MAC across the different partitioning techniques is used to localize the structural damage.

West (1984)は、FEM を使用しない構造物の損傷位置同定に対するモード形状の最初のシステム的使用の可能性について提示している。著者は、スペースシャトル Orbiter の健全な機体のフラップと音速飛行による荷重を受けた後のフラップの実験によるモードについて相関レベルを決めるために、モードの保証基準 (MAC) を使用している。モード形状は様々な手法により分割され、全ての分割手法において、MAC の変化が構造物の損傷位置同定に適用される。

Fox (1992) shows that single-number measures of mode shape changes such as the MAC are relatively insensitive to damage in a beam with a saw cut. Again this highlights the problem that too much data compression can cause in damage identification. "Node line MAC," a MAC based on measurement points close to a node point for a particular mode, was found to be a more sensitive indicator of changes in the mode shape caused by damage. Graphical comparisons of relative changes in mode shapes proved to be the best way of detecting the damage location when only resonant frequencies and mode shapes were examined. A simple method of correlating node points—in modes that show relatively little change in resonant frequencies—with the corresponding peak amplitude points—in modes that show large changes in resonant

frequencies—was shown to locate the damage. The author also presents a method of scaling the relative changes in mode shape to better identify the location of the damage.

Fox (1992) は、MAC のようなモード形状変化に関する一桁の数の測定値がこぎりで切断することにより与えた梁の損傷について比較的鈍感であることを示した。さらに、損傷同定ではデータを圧縮しすぎることが問題となり得るということを強調した。特定のモードの節点に近接する測定点に基づく MAC である “Node line MAC” は、損傷によるモード形状の変化に対するより敏感な指標となることがわかった。モード形状の相対的変化の図式的な比較は、共鳴振動数とそのモード形状のみにおいて、損傷位置を検出する最も良い方法であることがわかった。損傷位置同定に対して、モードの共鳴振動数において比較的小さな変化を示す節点と大きな変化を示す最大振幅点を関連づける簡単な手法が示された。また、作者は、損傷位置をより特定しやすくするため、モード形状の相対的変化の計測手法を提示する。

Mayes (1992) presents a method for modal error localization based on mode shape changes known as structural translational and rotational error checking (STRECH). By taking ratios of relative modal displacements, STRECH assess the accuracy of the structural stiffness between two different structural degrees of freedom (DOF). STRECH can be applied to compare the results of a test with an original FEM or to compare the results of two tests. Ratcliffe (1997) presents a technique for locating damage in a beam that uses a finite difference approximation of a Laplacian operator on mode shape data. Cobb and Liebst (1997) present a method for prioritizing sensor locations for structural damage identification based on an eigenvector sensitivity analysis. Skjaereak, et al. (1996b) examine the optimal sensor location issue for detecting structural damage based on changes in mode shapes and modal frequencies using a substructure iteration method.

Mays (1992)は、構造の並進および回転に関する誤差照査(STRECH)として知られる、モード形状の変化によるモード誤差位置同定の手法を提示している。関連するモード変位の比を用いて、STRECH は異なる2つの構造自由度における構造剛性の正確性を評価する。自由度の異なった2つの構造物の構造的剛性 (DOF) の精度を評価する。STRECH は、試験結果とその原型の FEM の比較、または2つの試験結果の比較に適用できる。

Ratcliffe (1997) は、モード形状データに対して Laplacian 演算子の差分近似を使用した梁の損傷位置を見つけるための手法を提示している。Cobb と Liebst は、固有ベクトル感度解析に基づく構造損傷同定のためのセンサーの位置の優先付けの手法を提示している。Skjaereak ら(1996) は、基礎反復法を使用して、モード形状と振動数における変化による構造物の損傷を見つけるためのセンサーの最適位置問題について検討している。

Yuen (1985); Rizos, et al. (1990); Osegueda, et al. (1992); Kam and Lee (1992); Kim, et al. (1992); Srinivasan and Kot (1992) ; Ko, et al. (1994); Salawu and Williams (1994, 1995); Lam, et al. (1995); Salawu (1995); Salawu (1997); and Saitoh and Takei (1996) provide examples of other studies that examine changes in mode shapes. The studies focus primarily on MAC and coordinate MAC (COMAC) values to identify damage.

Yuen (1985) ; Rizos ら (1990) ; Osegueda ら (1992) ; Kam と Lee (1992) ; Kim ら (1992) ; Srinivasan と Kot (1992) ; Ko ら (1994) ; Salawu と Williams (1994, 1995); Lam, 他 (1995); Salawu (1995); Salawu (1997); そして Saitoh and Takei (1996)はモード形状の変化の検証に関する他の研究事例を提示している。その研究は、損傷を特定するため、最初に MAC に着目し、さらに MAC (COMAC)の値を調整している。

## MODE SHAPE CURVATURE/STRAIN MODE SHAPE CHANGES

### モード形状の曲率／ひずみモード形状変化

An alternative to using mode shapes to obtain spatial information about sources of vibration

changes is using mode shape derivatives, such as curvature. It is first noted that for beams, plates, and shells there is a direct relationship between curvature and bending strain. Some researchers discuss the practical issues of measuring strain directly or computing it from displacements or accelerations.

振動変化の源の空間的な情報を得るために、モード形状を適用する代わりに、曲率のようなモード形状からの誘導体を使用する。まず、梁、板、シェルにおいて曲率と曲げひずみは直接的関係にあることを注意する。直接ひずみを測定するか変位あるいは加速度からひずみを計算かの実用的な問題について議論する研究者もいる。

Pandey, et al. (1991) demonstrates that absolute changes in mode shape curvature can be a good indicator of damage for the FEM beam structures they consider. The curvature values are computed from the displacement mode shape using the central difference operator.

Pandey ら (1991)は、彼らが考えた FEM の梁の構造に対してモード形状の曲率の絶対的な変化が損傷の良い指標であることを検証している。曲率はモード変位より中央差分演算を用いて算出している。

Stubbs, et al. (1992) present a method based on the decrease in modal strain energy between two structural DOF, as defined by the curvature of the measured mode shapes. Topole and Stubbs (1994a, 1995b) examine the feasibility of using a limited set of modal parameters for structural damage detection. In a more recent publication, Stubbs and Kim (1996) examine the feasibility of localizing damage using this technique without baseline modal parameters.

Stubbs ら (1992)は、測定モードの曲率から定義される 2 つの構造自由度の間におけるモードずみエネルギーの減少に基づく手法を提示している。Topole と Stubbs (1994a, 1995b)は、構造損傷検出のためのモードパラメータの限定された組合せの適用の可能性について検証している。最近の著書では、Stubbs と Kim (1996)が、基準となるモードパラメータ無しにこの手法を使用した損傷位置の決定の可能性を検証している。

Chance, et al. (1994) found that numerically calculating curvature from mode shapes resulted in unacceptable errors. They used measured strains instead to measure curvature directly, which dramatically improved results.

Chance ら(1994)は、モード形状からの曲率の数値的な算出が結果として許容できない誤差に結びつくことを発見した。彼らは、曲率を測定する代わりに測定されたひずみ直接使用し、結果が劇的に改善された。

Chen and Swamidas (1994); Dong, et al. (1994); Kondo and Hamamoto (1994); Nwosu, et al. (1995); and Yao and Chang (1995) present other studies that identify damage from changes in mode shape curvature or strain-based mode shapes.

Chen と Swamidas (1994) ; Dong ら (1994) ; Kondo と Hamamoto (1994) ; Nwosu ら (1995)そして Yao と Chang (1995)は、モード形状の曲率あるいはひずみに基づくモード形状の変化から損傷を特定するその他の研究を提示している。

## **METHODS BASED ON DYNAMICALLY MEASURED FLEXIBILITY**

### **動的に測定された柔性に基づく手法**

Another class of damage identification methods uses the dynamically measured flexibility matrix to estimate changes in the static behavior of the structure. Because the flexibility matrix is defined as the inverse of the static stiffness matrix, the flexibility matrix relates the applied static force and resulting structural displacement. Thus, each column of the flexibility matrix represents the displacement pattern of the structure associated with a unit force applied at the corresponding DOF. The measured flexibility matrix can be estimated from the mass-normalized

measured mode shapes and frequencies. The formulation of the flexibility matrix by this method is approximate due to the fact that only the first few modes of the structure (typically the lowest frequency modes) are measured. The synthesis of the complete static flexibility matrix would require the measurement of all of the mode shapes and frequencies.

もう1つのクラスの損傷同定手法は、構造物の静的挙動の変化の評価のために動的測定された柔性マトリックスを使用する。柔性マトリックスが静剛性マトリックスの逆と定義されるため、柔性マトリックスは作用する静的な力とその結果の構造的変位を関係付ける。したがって、柔性マトリックスの各列は、対応する自由度に作用させた単位荷重に対応する変形形状を示している。質量標準化された測定モード形状と振動数から、測定された柔性マトリックスを評価することができる。この方法による柔性マトリックスの定式化は、構造物の初期の少ないモード（通常、極めて低次のモード）のみが測定されるという事実から、近似式となる。完全な静的柔性マトリックスの合成は、全てのモード形状と振動数の測定を必要とする。

Typically, damage is detected using flexibility matrices by comparing the flexibility matrix synthesized using the modes of the damaged structure to the flexibility matrix synthesized using the modes of the undamaged structure or the flexibility matrix from a FEM. Because of the inverse relationship to the square of the modal frequencies, the measured flexibility matrix is most sensitive to change in the lower-frequency modes of the structure.

通常、健全な構造物のモードにより合成された柔性マトリックスあるいはFEMによる柔性マトリックスを損傷した構造物のモードにより合成された柔性マトリックスを比較することにより、損傷が柔性マトリックスにより検出される。モード振動数の二乗との逆相関のため、測定された柔性マトリックスは低次モードにおける変化に最も敏感である。

### Comparison of Flexibility Changes

#### 柔性変化の比較

Aktan, et al. (1994) propose the use of measured flexibility as a “condition index” to indicate the relative integrity of a bridge. They apply this technique to 2 bridges and analyze the accuracy of the flexibility measurements by comparing the measured flexibility to the static deflections induced by a set of truck-load tests.

Aktanらは、橋梁の相対的な健全性を示す状態指標として、測定された柔性の使用を提案している。彼らは、この手法を2つの橋梁に適用し、柔性の測定の確実性について一組のトラック載荷試験における静的たわみと測定された柔性を比較することにより検証している。

Pandey and Biswas (1994,1995) present a damage-detection and -location method based on changes in the measured flexibility of the structure. This method is applied to several numerical examples and to an actual spliced beam where the damage is linear in nature. Results of the numerical and experimental examples showed that estimates of the damage condition and the location of the damage could be obtained from just the first two measured modes of the structure.

Pandey と Biswas (1994,1995)は、構造物の測定された柔性の変化に基づく損傷検出と位置決定の手法を示している。この手法は、複数の数値問題に適用されると共に、自然に線形的に損傷した実際の添接された橋梁に適用されている。その数値的および実験的な事例の結果より、構造物の最初の2つの測定されたモードより、損傷の発生と損傷位置の推定が可能であることが示されている。

Toksoy and Aktan (1994) compute the measured flexibility of a bridge and examine the cross-sectional deflection profiles with and without a baseline data set. They observe that anomalies in the deflection profile can indicate damage even without a baseline data set.

Toksoy と Aktan (1994)は、橋梁の測定された柔性を解析し、基準となるデータの有無に関わらず断面方向の柔性を検証している。彼らは、たとえ基準となるデータが無くても柔性の異常から損傷を発見できることを確認している。

Mayes (1995) uses measured flexibility to locate damage from the results of a modal test on a bridge. He also proposes a method for using measured flexibility as the input for a damagedetection method (STRECH) which evaluates changes in the load-deflection behavior of a spring-mass model of the structure.

Mayes (1995)は、橋梁のモード試験結果より損傷位置を決定するために測定された柔性を用いている。また、彼は、構造物のバネ-質点モデルの荷重-変位関係の変化を評価する損傷検証手法(STRECH)のインプットとして測定された柔性を使用する手法を提案している。

Peterson, et al. (1995) propose a method for decomposing the measured flexibility matrix into elemental stiffness parameters for an assumed structural connectivity. This decomposition is accomplished by projecting the flexibility matrix onto an assemblage of the element-level static structural eigenvectors.

Petersonら(1995)は、構造的結合条件の推定のための要素剛性特性値への測定された柔性行列の分解手法を提案している。この分解は、柔性行列を要素レベルの静的構造固有ベクトルの集合に投影することにより実施される。

Zhang and Aktan (1995) suggest that changes in curvatures of the uniform load surface (deformed shape of the structure when subjected to a uniform load), calculated using the uniform load flexibilities, are a sensitive indicator of local damage. The authors state that changes in the uniform load surface are appropriate to identify uniform deterioration. A uniform load flexibility matrix is constructed by summing the columns of the measured flexibility matrix. The curvature is then calculated from the uniform load flexibilities using a central difference operator.

Zhang とAktan (1995)は、等分布荷重に柔性を用いて算出される等分布荷重による表面の曲率（等分布荷重を載荷した時の構造物の曲率）は局部損傷の敏感な指標であることを提示している。著者らは、均等な劣化の評価に等分布荷重による表面形状の変化が適当であることを数式で示している。等分布荷重による柔性行列は、測定された柔性行列の列の和により構成されている。その曲率は、等分布荷重による柔性の中央差分演算により算出される。

## Unity Check Method

### 調和チェック法

The unity check method is based on the pseudoinverse relationship between the dynamically measured flexibility matrix and the structural stiffness matrix. An error matrix is defined which measures the degree to which this pseudoinverse relationship is satisfied. The relationship uses a pseudoinverse rather than an inverse since the dynamically measured flexibility matrix is typically rank-deficient.

調和チェック法は、構造剛性行列と動的に測定された柔性行列の間の擬逆関係を基本としている。誤差行列は、この擬逆関係はどの程度満足されているかを測定することにより定義される。動的に測定された柔行列は通常にランク不足となるため、両者の関係には逆関係より擬逆関係が用いられる。

Lim (1990) proposes the unity check method for locating modeling errors and uses the location of the entry with maximum magnitude in each column to determine the error location. He applies

the method to FEM examples and also investigates the sensitivity of the method to nonorthogonality in the measured modes.

Lim (1990)は、調和チェック法をモデル化エラーの位置決定として提案し、誤差行列の最大値の発生位置をエラーの位置決定に用いている。彼はその手法をFEM例題に適用し、測定された変形モードの非直交性問題に対してその手法の感度を検証している。

Lim (1991) extends the unity check method to the problem of damage detection. He defines a least-squares problem for the elemental stiffness changes—which are consistent with the unity check error—in potentially damaged members.

Lim (1991)は、調和チェック法を損傷検出に拡張している。潜在的に損傷した部材の要素剛性変化に対する最小二乗問題（それは調和チェック法と一致する）を定義している。

### **Stiffness Error Matrix Method**

#### **剛性誤差行列法**

The stiffness error matrix method is based on the computation of an error matrix that is a function of the flexibility change in the structure and the undamaged stiffness matrix. He and Ewins (1986) present the stiffness error matrix as an indicator of errors between measured parameters and analytical stiffness and mass matrices. For damage identification, the stiffness matrix generally provides more information than the mass matrix, so it is more widely used in the error matrix method.

剛性誤差行列法は、健全な剛性行列と構造物の柔性変化の関数である誤差行列を計算することを基本としている。彼とEwins (1986)は、剛性誤差行列を解析による剛性・質量行列と測定された特性値との誤差の指標として提示している。損傷同定において、剛性行列は一般的に、質量行列より情報を提供するため、誤差行列においてより幅広く使用されている。

Gysin (1986) demonstrates the dependency of this method on the type of matrix reduction used and on the number of modes used to form the flexibility matrices. The author compared the reduction techniques of elimination, Guyan-reduction, and indirect reduction, and found that the latter two techniques gave acceptable results, while the first technique did not.

Gysin (1986)は、この手法の柔性行列を算出するために適用するモード数とマトリクス換算（演算）法への依存性について提示している。著者は、消去、Guyan換算、間接換算の各換算技法について比較を行っており、最初の手法以外の後者の2手法が良好な結果が得られることを確認している。

Park, et al. (1988) present a weighted error matrix, where the entries are divided by the variance in natural frequency resulting from damage in each member. The authors apply their formulation to both beam models and plate models.

Parkら (1988)は、重み付き誤差マトリクスを提案しており、その値は各要素の損傷による自由振動数の変化から決定される。

### **Effects of Residual Flexibility**

#### **残差柔性の影響**

The residual flexibility matrix represents the contribution to the flexibility matrix from modes outside the measured bandwidth so that the exact flexibility matrix can be related to the measured modes and the residual flexibility. Doebling, et al. (1996b) and Doebling (1995) present a technique to estimate the unmeasured partition of the residual flexibility matrix because only

one column of the frequency response function (FRF) matrix can be measured for each modal excitation DOF. This technique does not add any new information into the residual flexibility, but it does complete the reciprocity of the residual flexibility matrix so that it can be used in the computation of measured flexibility. The authors demonstrate that the inclusion of the measured residual flexibility in the computation of the measured flexibility matrix yields a more accurate estimate of the static flexibility matrix.

残差柔性行列は、測定された振動数域を超えたモードの柔性行列に対する影響を示している。そのため、正確な柔性行列は測定されたモードと残差柔性行列に関係付けられる。Doeblingら (1996b) と Doebling (1995)は、振動数応答関数 (FRF) 行列の一行が各自由度のモード刺激に対して測定することができることから、測定されない範囲の残差柔性行列の評価手法について提案している。この手法は残差柔性に対して何の新しい情報も追加しないが、残差柔性行列の相互依存性を満足しているため測定された柔性マトリクスを計算するために使用される。著者らは、測定された柔性行列の計算に対する残差柔性行列の適用が静的柔性行列のより正確な推定に繋がることを提示している。

### Changes in Measured Stiffness Matrix

#### 測定された剛性行列の変化

A variation on the use of the dynamically measured flexibility matrix is the use of the dynamically measured stiffness matrix, defined as the pseudoinverse of the dynamically measured flexibility matrix. Similarly, the dynamically measured mass and damping matrices can be computed. Salawu and Williams (1993) use direct comparison of these measured parameter matrices to estimate the location of damage.

動的に測定され柔性行列の使用上の変量は、動的に測定された柔性行列との擬逆関係により定義されるように、動的に測定された剛性行列に使用される。同様にして、動的に測定された質量および減衰行列が計算することができる。SalawuとWilliams (1993)は、損傷位置の同定のため、測定されたこれらの特性行列の直接比較を使用している。

Peterson, et al. (1993) propose a method to use the measured stiffness and mass matrices to locate damage by solving an “inverse connectivity” problem, which evaluates the change in impedance between two structural DOF to estimate the level of damage in the connecting members.

Petersonら (1993)は、“逆接合”問題を解くことにより損傷位置同定への測定された剛性および質量行列の使用手法について提案しており、それは接合部材の損傷レベルの推定のため2つの構造自由度のインピーダンスの変化を評価している。

# METHODS BASED ON UPDATING STRUCTURAL MODEL PARAMETERS

## 構造モデルパラメータのアップデートング法

### 【抄訳】

モデルアップデートング法には、静的応答または動的応答から計測し、可能な限り厳密に再現した構造モデル（質量、剛性、減衰等）の行列を修正する方法がある。

この同定法では、運動方程式、公称モデル、計測データに基づく制約付最適化問題を形成し、更新された行列（または、更新行列から求められた形式的なモデルの摂動）を求める。

損傷の指標や位置、程度は、更新行列と元の相関行列を比較することで、算出できる。

なお、損傷同定法のアルゴリズムの違いは、「目的関数の最小化」、「制約充足問題」、「最適化に使用される数値計算法」の3つに分類できる。

#### (1) 目的関数と制約条件

目的関数と以下に示す制約条件として、モーダルフォース誤差が用いられる。

- 対称行列の特性を保持するための制約条件
- 疎行列の特性を保持するための制約条件
- 正行列における特性を保持するための制約条件

#### (2) 最適な行列の更新方法

最適な行列の更新方法としては、損傷モデルの行列、または、行列の摂動を計算するための閉形式直接解を用いる方法が一般的である。また、ラグランジュの未定乗数法、または、ペナルティベースの最適化として定式化されている。

最適化問題の一般的な公式は、モーダルフォース誤差ゼロ点と対称行列の特性の制約条件を用いた、全体パラメータ行列の摂動のプロベニウスノルムを最小にする。

センサー数は、損傷検出するために、計測モード数の次に重要なパラメータである。

十分なモーダルデータが利用できる場合、計測されたモーダル周波数とモードシェイプから、トラス構造の要素剛性と質量パラメータをコンピュータで解析することができる。

その他の方法として、行列の摂動のノルムではなく、行列の摂動のランクの最小化に影響を与える手法がある。

MRPT アルゴリズム (Minimum Rank Perturbation Theory) について、以下に示す。

- ◆ 損傷ベクトルの非ゼロ成分は、損傷位置を示す。
- ◆ 摂動の結果は、モーダルフォース誤差の計算で用いられたモード数と同じ階数となる。(構造の剛体モードを維持することから証明される)

MRPT アルゴリズムの拡張版は、次の様に用いられる。

- ◆ 片持梁に載荷された集中荷重の位置を見つける。
- ◆ 質量、剛性、比例減衰行列の摂動を同時に評価する。
- ◆ 仮定質量と剛性マトリックスが関連するベースラインデータセットを使用することで、元の FEM がない場合の最適化を行う。
- ◆ 振動テストと FEM 解析との間でモード数が一致しないことを避けるために、複数の静的荷重と振動実験の結果から、剛性の摂動を計算する。

#### (3) 感度ベースの更新方法

感度ベースの更新方法には、行列の摂動の誤差関数を最小にする、一次のテイラー級数の解を基にしたものがある。なお、基本となるのは、修正モデルパラメータ（材料特性や幾何学パラメータ）のベクトルを特定することである。パラメータの摂動ベクトルは、ニュートン・ラプソン反復法で計算され、誤差関数を最小にする。

いくつかの感度ベースの更新方法間の主な違いは、感度行列の評価の使用方法である。それぞれ、実験または解析の結果を評価するために用いられる。感度ベースの実験で得られた直行相関関係は、モデルパラメータの導関数の計算で用いられる。感度ベースの解析では、通常、剛性行列と質量行列の導関数の評価が必要となり、それらはデータのノイズとパラメータの大きな摂動に対し、実験的な感度行列よりも敏感である

行列の更新方法の計算バリエーションには、質量と剛性の系、重心系、固有振動数とモードシェイプの変化、構造パラメータと実験的な計測のための統計的な信頼ファクター等によるものがある

#### (4) 固有構造配置法

固有構造配置法は、モーダルフォース誤差を最小化する仮想のコントローラ的设计をベースとしたものである。仮想コントローラのゲインは、無損傷構造モデルのパラメータ行列の摂動として解釈される。また、仮想コントローラのゲインは、公称構造モデルと損傷構造がゼロと計測モーダルパラメータ間のモーダルフォース誤差としても選択される。

最適達成可能固有ベクトルと計測固有ベクトルとの関係は、損傷位置の計測に使用される。特に、特定部材が損傷している場合、計測固有ベクトルと最適達成可能固有ベクトルは同じものとなる。また、最適達成可能固有ベクトルと計測固有ベクトルとの間の角度は、特定部材が特定モードの変化にどの程度影響するかを指標を示し、構造的な損傷の位置を仮定するのに用いることができる。

最適達成可能固有ベクトル、無損傷モデル行列、モーダルフォース誤差方程式を満足するコントローラといった固有構造配置法を用いて、損傷の大きさを計算することができる。

なお、固有構造配置法の改良版、類似版として、以下の方法がある。

- ◆ モードシェイプの譲渡性と更新モデルのスパース性を維持するための改良を加えたものがあり、片持ち梁の弾性係数の同定に用いられた。
- ◆ 構造部材毎の損傷係数を定義し、固有構造配置法を用いて各部材の損傷係数を解析した。これは、10 ベイトラス FEM でシミュレートした損傷を検出するために用いられた。
- ◆ 周波数応答関数配置方式 (FRF assignment) という要素レベルの剛性と質量の摂動要素の線形解として問題を定式化したものがある。直接 FRF の計測値を使用する方が、モードシェイプを抽出するよりも簡単である。

#### (5) ハイブリッドな行列更新方法とその他事項

ハイブリッドな行列更新方法として、以下の方法がある。

- ◆ 大規模構造の局所的な計測において、“損傷が発生している構造の領域を識別する”ために行列更新の最適化を行った後、“損傷が発生している特定の構造要素の位置を識別する”ために感度ベースの手法を用いる方法がある。
- ◆ FEM の連結性を保持することで、剛性行列の摂動を制限し、要素剛性パラメータに応じて摂動ベクトルの大きさを最小にする方法がある。
- ◆ 要素レベルの剛性パラメータの摂動の形式で、損傷の大きさの推定値を概算する方法がある。
- ◆ LSQIC と呼ばれるモードシェイプ拡張アルゴリズムは、計測不可能な FEM 自由度で、計測されたモードシェイプを概算するために用いられる。

Another class of damage identification methods is based on the modification of structural model matrices such as mass, stiffness, and damping to reproduce as closely as possible the measured static or dynamic response from the data. These methods solve for the updated matrices (or perturbations to the nominal model that produce the updated matrices) by forming a constrained optimization problem based on the structural equations of motion, the nominal model, and the measured data. Comparisons of the updated matrices to the original correlated matrices provide an indication of damage and can be used to quantify the location and extent of damage. The methods use a common basic set of equations, and the differences in the various algorithms can be classified as follows:

1. Objective function to be minimized
2. Constraints placed on the problem
3. Numerical scheme used to implement the optimization

The following sections describe each of the classification items in this list. For the formulas and equations for each of these sections, please refer to Doebling, et al. (1996a).

損傷同定法のもうひとつのクラスとして、静的または動的応答から計測し可能な限り厳密に再現した、質量、剛性、減衰等の構造モデルの行列の修正に基づくものがある。これらの同定法では、運動方程式、公称モデル、そして、計測データに基づく制約付最適化問題を形成することにより、更新行列（または、更新行列から求められた形式的なモデルの摂動）を求める。更新行列と元の相関行列の比較により、損傷の指標を規定し、損傷の位置と程度を示すために使用することができる。その方法では、一般的な基本方程式を使い、そして、以下の様に、各種アルゴリズムの違いを分類することができる。

1. 目的関数の最小化
2. 制約充足問題
3. 最適化に使用される数値計算手法

以下のセクションでは、このリストの分類細目について述べる。各セクションで用いられる公式と方程式は、Doebling等（1996a）の論文を参照のこと。

## Objective Functions and Constraints

### 目的関数と制約条件

There are several different physically based equations that are used as either objective functions or constraints for the matrix update problem, depending upon the update algorithm. The structural equations of motion are the basis for the “modal force error equation.” It is first assumed that the structural eigenequation is satisfied for all measured modes. Substituting the eigenvalues (modal frequencies) and eigenvectors (mode shapes) measured from the damaged structure into this equation along with the mass and stiffness matrix from the undamaged structure yields a vector that is defined as the “modal force error,” or “residual force.” As described by Ojalvo and Pilon (1988), this vector represents the harmonic force excitation that would have to be applied to the undamaged structure at the damaged frequency so that the structure would respond with the damaged mode shape.

いくつかの異なる物理方程式は、更新アルゴリズムによる行列更新問題のための目的関数または制約条件として用いられる。運動方程式は、モーダルフォース誤差方程式の基本である。最初に、全ての計測モードを満足した固有方程式を仮定する。固有値(モード周波数)と、質量および無傷の構造の剛性行列を考慮した方程式に損傷構造から計測した固有ベクトル(振動モードシェイプ)を代入することで、モーダルフォース誤差と定義されるベクトル、または、残留力が得られる。OjalvoとPilon(1988)によって説明されるように、このベクトルは、構造が損傷後のモードシェイプで応答するような損傷頻度で無傷構造に与えられる調和励振力に相当する。

There are several methods that have been used to compute the analytical model matrices of the damaged structure such that the resulting equation of motion (EOM) is balanced and the modal force error is minimized. The modal force error is used as both an objective function and a constraint in the various methods described below. Preservation of the property matrix symmetry is used as a constraint. Preservation of the property matrix sparsity (the zero/nonzero pattern of the matrix) is also used as a constraint. The preservation of sparsity is one way to preserve the allowable load paths of the structure in the updated model. Preservation of the property matrix positivity is also used as a constraint.

“均衡のとれた運動方程式”と“最小化されたモーダルフォース誤差”を結果とするような、損傷構造の解析モデルマトリックスを計算するためのいくつかの方法がある。モーダルフォース誤差は、以下で説明する様々な方法における目的関数と制約条件として用いられる。また、対称行列における、特性を保持する制約条件として使用される。また、疎行列(ゼロ/非ゼロの行列パターン)における特性を保持する制約条件としても使用される。疎行列の保持は、更新モデルの構造の許容荷重経路を保持する一つの方法である。また、正行列における特性を保持する制約条件としても使用される。

## Optimal Matrix Update Methods

### 最適な行列の更新方法

Methods that use a closed-form direct solution to compute the damaged model matrices or the perturbation matrices are commonly referred to as optimal matrix update methods. Smith and Beattie (1991a), Zimmerman and Smith (1992), Hemez (1993), and Kaouk (1993) have published reviews of these methods. The problem is generally formulated as a Lagrange multiplier or penalty-based optimization.

一般的に最適な行列の更新方法は、損傷モデルの行列、または、行列の摂動を計算するための閉形式直接解を用いる方法である。Smith と Beattie(1991a), ZimmermanとSmith (1992), Hemez (1993), および, Kaouk (1993)は、これらの方法のレビューを報告した。その方法は、一般に、ラグランジュの未定乗数法、または、ペナルティベースの最適化として定式化されている。

Baruch and Bar Itzhack (1978), Kabe (1985), and Berman and Nagy (1983) have a common formulation of the optimal update problem that is essentially minimization of the Frobenius norm of global parameter matrix perturbations using zero modal force error and property matrix symmetry as constraints.

Baruch と Bar Itzhack (1978), Kabe (1985), および, Berman と Nagy (1983)は、最適な更新問題の一般的な公式を用いた。その方法は本質的に、モーダルフォース誤差ゼロ点と対称行列の特性の制約条件を用いた、全体パラメータ行列の摂動のフロベニウスノルムを最小にする。

Chen and Garba (1988a, 1988b) present a method for minimizing the norm of the model property perturbations with a zero modal force error constraint. They also enforce a connectivity constraint to impose a known set of load paths onto the allowable perturbations. The updates are thus obtained at the element parameter level, rather than at the matrix level. This method is demonstrated on a truss FEM.

Chen と Garba (1988a, 1988b)は、モーダルフォース誤差ゼロ点の制約条件と共に、モデル特性の摂動のノルムを最小化するための方法を示した。また、彼らは、許容可能な摂動における、荷重経路の既知の集合を制御するための拘束条件の連結性を示した。このような更新問題は、行列レベルより、むしろ要素パラメータレベルで得られる。この方法は、トラスFEMで裏付けられる。

Another approach to this problem used by Kammer (1988) and Brock (1968) can be formulated as minimization of modal force error with a property matrix symmetry constraint. The symmetry constraint preserves the reciprocity condition in the updated structural model.

Kammer (1988) と Brock (1968)によって用いられた, 更新問題への他のアプローチでは, 対称行列特性の制約条件と共に, モーダルフォース誤差を最小化するように定式化することができる. 対称行列の制約は, 更新構造モデルにおける相互状態を保持する.

McGowan, et al. (1990) report ongoing research that examines stiffness matrix adjustment algorithms for application to damage identification. Based on measured mode shape information from sensor locations that are typically fewer than the DOF in an analytical model, mode shape expansion algorithms are employed to extrapolate the measured mode shapes such that they can be compared with analytical model results. These results are used to update the stiffness matrix while maintaining the connectivity and sparsity of the original matrix.

McGowan等(1990)は, 損傷同定に応用するための剛性行列の調整アルゴリズムに関する調査内容の研究報告を行った. モードシェイプ展開アルゴリズムは, 通常, 分析モデルの自由度より少ないセンサー位置からの計測モードシェイプ情報に基づいて, 分析モデル結果と比較ができるよう, 計測モードシェイプを推定するために使われる. これらの結果は, 元の行列の連続性とスパース性を維持している間, 剛性行列を更新するのに用いられる.

Smith and Beattie (1991a) extend the formulation of Kabe (1985) to include a sparsity preservation constraint and also formulate the problem as the minimization of both the perturbation matrix norm and the modal force error norm subject to the symmetry and sparsity constraints.

Smith と Beattie (1991a)は, スパース性の保存制約条件を考慮してKabe (1985)の定式化を拡張し, “行列の摂動のノルム”と“対称性とスパース性の制約条件に従うモーダルフォース誤差のノルム”の両方を最小化する方法を定式化した.

Smith (1992) presents an iterative approach to the optimal update problem that enforces the sparsity of the matrix at each iteration cycle. Multiplying each entry in the stiffness update by either one or zero enforces the sparsity pattern. Kim and Bartkowicz (1993) investigate damage detection capabilities with respect to various matrix update methods, model reduction methods, mode shape expansion methods, numbers of damaged elements, numbers of sensors, numbers of modes, and levels of noise. The authors develop a hybrid model reduction / eigenvector expansion approach to match the order of the undamaged analytical model and the damaged test mode shapes in the matrix update. They also introduce a more realistic noise level into frequencies and mode shapes for numerical simulation. From both numerical and experimental studies, the authors showed that the number of sensors is the most critical parameter for damage detection, followed by the number of measured modes.

Smith (1992)は, 反復サイクル毎に行列のスパース性を強化する最適化問題への反復アプローチを提示した. 1か0のいずれかにより更新された剛性のエントリを乗じることで, スパースパターンは強化される. KimとBartkowicz(1993)は, 様々な行列更新方法, モデル低減法, 振動モードシェイプの展開法, 損傷要素の数, センサ数, モード数, およびノイズレベルの観点から, 損傷検出能力を調査した. 彼らは, 損傷していない解析モデルと更新行列の損傷実験のモードシェイプの順序に一致する, 縮小ハイブリッドモデル/固有ベクトルの検証方法を開発した. また彼らは, 周波数に含まれる, よりリアルなノイズレベルと数値シミュレーションのために振動モードシェイプを取り入れた. 数理的研究と実験的研究の両方から, 筆者等は, センサー数が, 計測モード数に続いて損傷検出するために最も重要なパラメータである, というを示した.

Lindner, et al. (1993) present an optimal update technique that formulates an overdetermined system for a set of damage parameters representing reductions in the extensional stiffness values for each member. The value represents the amount of stiffness reduction in that

member. Lindner and Kirby (1994) extend the technique to account for changes in elemental mass properties.

Lindner等(1993)は、各部材の伸び剛性の減少で表される損傷パラメータセットの過剰決定系を定式化する最適な更新手法を提示した。伸び剛性の減少量は、その部材の剛性低下量を表す。Lindner と Kirby (1994)は、基本的な要素質量特性に変換するための計算手法に拡張した。

Liu (1995) presents an optimal update technique for computing the elemental stiffness and mass parameters for a truss structure from measured modal frequencies and mode shapes. The method minimizes the norm of the modal force error. The author demonstrates that if sufficient modal data are available, the elemental properties can be directly computed using the measured modal frequencies, measured mode shapes, and two matrices which represent the elemental orientations in space and the global connectivity of the truss. In this case, the solution for the elemental properties is shown to be unique and globally minimal. The method is used to locate a damaged member in a FEM of a truss using the first four measured modes in sets of three at a time.

Liu (1995) は、計測モーダル周波数とモードシェイプからトラス構造の要素剛性と質量パラメータをコンピュータで解析するための最適な更新手法を示した。その方法は、モーダルフォース誤差のノルムを最小化するものである。彼らは、十分なモーダルデータが利用できるならば、要素特性は、計測モーダル周波数、モードシェイプ、そして、空間での部材方向とトラスの全体的な接続性を示す2つの行列を用いて、直接コンピュータで計算できることを示した。このケースでは、部材特性の解は、一意で極小となることを示している。この方法は、一回3セットの最初の4つの計測モードを使用するトラスFEMの損傷部材を見つけるために用いられる。

Another type of approach to the optimal matrix update problem involves the minimization of the rank of the perturbation matrix, rather than the norm of the perturbation matrix. This approach is motivated by the observation that damage will tend to be concentrated in a few structural members, rather than distributed throughout a large number of structural members. Thus, the perturbation matrices will tend to be of small rank. This approach has been published extensively by Zimmerman and Kaouk (see Refs. below). The solution for the perturbation matrices is based on the theory that the a unique minimum rank matrix solution of the underdetermined system exists.

その他の最適な行列更新問題へのアプローチは、行列の摂動のノルムではなく、行列の摂動のランクの最小化に影響を与える。このアプローチは、多数の構造部材の全体に分散するのではなく、いくつかの構造部材に集中する傾向があるという損傷の計測により動機づけられる。つまり、行列の摂動は小さいランクになる傾向がある。このアプローチは、Zimmerman と Kaoukにより広く公開された。行列の摂動の解は、劣決定系が存在するユニークな最小階数の行列解であるという理論に基づいている。

Zimmerman and Kaouk (1994) present the basic minimum rank perturbation theory (MRPT)

algorithm. A nonzero entry in the damage vector is interpreted as an indication of the location of damage. The resulting perturbation has the same rank as the number of modes used to compute the modal force error. It is demonstrated that the MRPT algorithm preserves the rigid body modes of the structure and the effects of measurement and expansion errors in the mode shapes are demonstrated and discussed.

Zimmerman と Kaouk (1994) は、基本的な最小階数の摂動理論(MRPT)アルゴリズムを示した。損傷ベクトルの非ゼロ成分は、損傷位置を示すものとして解釈される。摂動の結果は、モーダルフォース誤差の計算で用いられたモード数と同じ階数となる。MRPTアルゴリズムが構造の剛体モードを維持することで、それは証明された。そして、モードシェイプの計測誤差と拡張誤差の効果は、議論され、証明された。

Kaouk and Zimmerman (1994a) further develop this algorithm and demonstrate how perturbations to two of the property matrices can be estimated simultaneously by using complex conjugates of the modal force error equation. The method is demonstrated numerically for a truss with assumed proportional damping. Also, the technique is used experimentally to locate a lumped mass attached to a cantilevered beam.

Kaouk と Zimmerman (1994a) は、このアルゴリズムをより発展させ、2つの行列特性の摂動が、どのようにして、モーダルフォース誤差方程式の複素共役を用いたシミュレーションから推測できるかを証明した。その方法は、比例減衰で仮定されたトラス構造で数値的に裏付けされた。また、その手法は、片持梁に載荷された集中荷重の位置を見つけるために、実験的に使われる。

Kaouk and Zimmerman (1994b) extend the MRPT algorithm to estimate mass, stiffness, and proportional damping perturbation matrices simultaneously. The computation of these individual perturbation matrices is accomplished by exploiting the cross-orthogonality conditions of the measured mode shapes with respect to the damaged property matrices. The authors examine the results by computing a cumulative damage vector.

Kaouk と Zimmerman (1994b) は、質量、剛性、比例減衰行列の摂動を同時に評価するためにMRPTアルゴリズムを拡張した。これら個々の行列の摂動の計算は、損傷特性行列に重点をおいたモードシェイプで計測された直交性検査の条件を利用し、実行される。彼らは、累積損傷ベクトルを計算することにより結果を調査した。

Kaouk and Zimmerman (1994c) present a technique that can be used to implement the MRPT algorithm with no original FEM. The technique involves using a baseline data set to correlate an assumed mass and stiffness matrix, so that the resulting updates can be used as the undamaged property matrices.

Kaouk と Zimmerman (1994c) は、元のFEMがない場合のMRPTアルゴリズムを最適化に用いる手法を示した。この手法では、仮定質量と剛性マトリックスが関連するベースラインデータセットを使用しているので、更新結果は無損傷の行列特性のように用いる事ができる。

Zimmerman and Simmermacher (1994, 1995) compute the stiffness perturbation resulting from multiple static load and vibration tests. This technique is proposed partially as a method for circumventing the mismatch in the number of modes between test and FEM. They apply this technique to a FEM of a structure similar to a NASA test article. They also present two techniques for overcoming the rank deficiency that exists in the residual vectors when the results of one static or modal test are linear combinations of the results of previous tests.

Zimmerman と Simmermacher (1994, 1995) は、複数の静的荷重と振動実験の結果から、剛性の摂動を計算した。この手法は、振動テストとFEM解析の間で、モード数が一致しないことを回避する方法として部分的に提案された。彼らは、NASAの実験体と類似構造のFEM解析にこの手法を適用した。彼らはまた、1つの静的またはモーダル実験の結果が、前述の実験結果の線形結合である時の残差ベクトルが存在する場合のランク欠損を解決するために、2つの手法を提示した。

Kaouk and Zimmerman (1995a) introduce a partitioning scheme into the MRPT algorithm by writing the parameter matrix perturbations as sums of elemental or substructural perturbations. The partitioning procedure reduces the rank of the unknown perturbation matrices and thus reduces the number of modes required to successfully locate the damage. The technique is demonstrated on data from the NASA 8-bay Dynamic Scale-Model Truss (DSMT) testbed. In a related paper, Kaouk and Zimmerman (1995b) further examine the reduction of the number of modes required for model updating using a two-level matrix partitioning technique.

Kaouk と Zimmerman (1995a)は、要素または部分構造の摂動の和として、摂動マトリックスの特性を書き込むことで、MRPTアルゴリズムを分割する手法を示した。その分割手順では、不明な行列の摂動のランクが低減し、損傷を予想通りを見つける為に要求されたモード数も低減する。その手法は、NASAの8-bay Dynamic Scale-Model Truss (DSMT)実験のデータで裏付けられた。関連論文によると、Kaouk と Zimmerman (1995b)は、2段階の行列分配手法を用いるモデル更新で必要な、モード数の減少に関する調査を行った。

Zimmerman, et al. (1995a) extend the theory to determine matrix perturbations directly from measured FRFs. This method is implemented by solving for the perturbation in the dynamic impedance matrix from the generalized off-resonance, dynamic-force residual equation. They discuss the benefits of this formulation, including the elimination of the need to match modes between FEM and test, reduction in the amount of frequencies required in the test (and thus test time), and the elimination of the need to perform modal parameter identification.

Zimmerman等(1995a)は、計測周波数応答(FRFs)から、直接行列の摂動を決定するために理論を拡張した。この理論は、一般的なオフレソナンスとダイナミックフォース残差方程式から、ダイナミックインピーダンス行列の摂動を目的とした解決法によって実装される。彼らは、FEMと実験の間でのモード一致の必要性の排除を含めてこの理論の優位性を検討し、実験(その実験回数)で必要とする周波数帯域を縮小し、そして、モーダルパラメータの同定の必要性を削減した。

Zimmerman, et al. (1995b) investigate the role of engineering insight and judgment in the implementation of the MRPT techniques to damage detection. Specifically, the issues of evaluation of the damage location, selection of how many measured modes to use, filtering of the eigenvectors and the damage vector, and decomposition of the damage vector into contributions from individual property matrices are addressed. This paper also contains a list of publications related to the theory and application of MRPT.

Zimmerman等(1995b)は、エンジニアとしての立場で調査し、損傷検出のためのMRPT手法の可用性を判断した。具体的には、損傷位置の評価の方法、使用する計測モードの選定、固有ベクトルと損傷ベクトルのフィルタリング、そして、個々の行列の特性から与えられる損傷ベクトルの分解、を指している。また、この報告書には、理論に関連した出版物とMRPTアプリケーションのリストも含まれている。

Doebbling (1996) presents a method to compute a minimum-rank update for the elemental parameter vector, rather than for global or elemental stiffness matrices. The method uses the same basic formulation as the MRPT, but constrains the global stiffness matrix perturbation to be an explicit function of the diagonal elemental stiffness parameter perturbation matrix that preserves the finite element strain-displacement relations. A limitation of this method as with all minimum-rank procedures is that the rank of the perturbation is always equal to the number of modes used in the computation of the modal force error.

Doebbling (1996)は、全体または要素剛性行列のためというより、むしろ要素パラメータベクトルのために、最小のランク更新を計算する方法を示した。その方法では、MRPTと同じ基本公式を用いるが、全体剛性行列の摂動は、有限要素の歪み-変異関係として保持される対角要素剛性パラメータの行列の摂動の陽関数に限定される。全最小ランク手法が、モーダルフォース誤差の計算で使われるモード数と常に等しい摂動ランクであることが、この方法の制限である。

### **Sensitivity-Based Update Methods**

#### **感度ベースの更新方法**

Another class of matrix update methods is based on the solution of a first-order Taylor series that minimizes an error function of the matrix perturbations. Such techniques are known as

sensitivity-based update methods. An exhaustive list and classification of various sensitivity-based update techniques is given in Hemez (1993). The basic theory is the determination of a modified model parameter vector (consisting of material and/or geometric parameters), where the parameter perturbation vector is computed from the Newton-Raphson iteration problem for minimizing an error function.

他の行列の更新方法のクラスは、行列の摂動の誤差関数を最小にする一次のテイラー級数の解を基にしたものである。そのような手法は感度ベースの更新方法として知られている。Hemez (1993)は、様々な感度ベースの更新手法の網羅リストと分類を示した。基本的なセオリーは、修正モデルパラメータベクトル（材料特性や幾何学パラメータ）を特定することであり、パラメータの摂動のベクトルは、誤差関数を最小化するためにニュートン・ラプソン反復法で計算される。

A main difference between the various sensitivity-based update schemes is the method used to estimate the sensitivity matrix. Basically, either the experimental or the analytical quantities can be used in the differentiation. For experimental sensitivity, the orthogonality relations can be used to compute the modal parameter derivatives. Norris and Meirovitch (1989), Haug and Choi (1984) and Chen and Garba (1980) have proposed such an approach.

いくつかの感度ベースの更新手法間の主な違いは、感度行列の評価の使用方法である。基本的に、実験または解析の結果を評価するために用いられる。感度ベースの実験によって得られた直行相関関係は、モデルパラメータの導関数を計算するために用いられる。そのような手法は、Norris と Meirovitch (1989), Haug と Choi (1984) と Chen と Garba (1980)により提案された。

Analytical sensitivity methods usually require the evaluation of the stiffness and mass matrix derivatives, which are less sensitive than experimental sensitivity matrices to noise in the data and to large perturbations of the parameters.

感度ベースの解析では、通常、剛性と質量行列の導関数の評価が必要となり、それらは、データのノイズとパラメータの大きな摂動に対し、実験的な感度行列よりも敏感である。

Ricles (1991) presents a methodology for sensitivity-based matrix update, which takes into account variations in system mass and stiffness, center of mass locations, changes in natural frequency and mode shapes, and statistical confidence factors for the structural parameters and experimental instrumentation. The method uses a hybrid analytical/experimental sensitivity matrix, where the modal parameter sensitivities are computed from the experimental data, and the matrix sensitivities are computed from the analytical model. This method is further developed and applied to more numerical examples by Ricles and Kosmatka (1992).

Ricles (1991)は、感度ベースの行列の更新のための方法論を示し、それらには、質量と剛性の系、重心系、固有振動数とモードシェイプの変化、構造パラメータと実験的な計測のための統計的な信頼ファクター、等による計算バリエーションがある。それらの方法では、ハイブリッドな解析/実験による感度行列を使用し、モーダル感度パラメータは実験データから計算され、感度行列は解析モデルから計算される。この方法は、さらに発展し、Ricles と Kosmatka (1992)により多くの数値例に適用された。

Sanayei and Onipede (1991) present a technique for updating the stiffness parameters of a FEM using the results of a static load-displacement test. A sensitivity-based, element-level parameter update scheme is used to minimize the error between the applied forces and forces produced by applying the measured displacements to the model stiffness matrix. The sensitivity matrix is computed analytically. The structural DOF are partitioned such that the locations of the applied loads and the locations of the measured displacements are completely independent. The technique is demonstrated on two FEM examples.

Sanayei と Onipede (1991) は、静的載荷試験の結果を用いたFEMの剛性パラメータの更新テクニックを示した。感度ベース、要素レベルのパラメータ更新手法は、“加振力”と“モデルの剛性行列に計測変位を適用することで生じた力”の間の誤差を最小にするために用いられる。感度ベースの行列は、解析的に計算される。構造の自由度は、載荷点と独立した変位の計測地点で分割される。このテクニックは、2つのFEM例で裏付けられる。

In a related paper, Sanayei, et al. (1992) examine the sensitivity of the previous algorithm to noisy measurements. The influence of the selected measurement DOF set on the errors in the identified parameters is studied. A heuristic method is proposed that recursively eliminates the measurement DOF that the elemental stiffness parameters are the most sensitive to. In this manner, the full FEM DOF set is reduced to a manageable size while preserving the ability to identify the structural stiffness parameters. In later work, Sanayei and Saletnik (1995a, 1995b) extend the algorithm and the error analysis to use static strain, rather than displacement, measurements.

関連論文で、Sanayei等(1992)は、ノイズが多い計測値に対して、前述のアルゴリズムの感度を調査した。特定のパラメータで生じる誤差による計測自由度の選択の影響についての研究である。経験則として、最も敏感な要素剛性パラメータとなる計測自由度を再帰的に除去する方法が提案されている。このように、最大のFEM自由度セットは、構造的な剛性パラメータを識別する能力を維持しながら、管理可能なサイズに減少される。その後の研究で、Sanayei と Saletnik (1995a, 1995b) は、静的なひずみではなく、動的な変位、計測値を使用する誤差解析とアルゴリズムに拡張した。

Hemez and Farhat (1995) present a sensitivity-based matrix update procedure that formulates the sensitivities at the element level. This has the advantage of being computationally more efficient than forming the sensitivities at the global matrix level. It also allows the analysis to “focus” on damage in specific members. A modified version of this algorithm, developed by Alvin (1996), improves the convergence, utilizes a more realistic error indicator, and allows the incorporation of statistical confidence measures for both the initial model parameters and the measured data.

Hemez と Farhat (1995) は、要素レベルで感度を定式化する感度ベースの行列更新手順を示した。この方法は、全体的な行列レベルでの感度を形成するよりも計算効率の面で優位である。また、特定部材の損傷にフォーカスした解析を可能にする。このアルゴリズムの修正版は、Alvin (1996) によって開発され、収束性の向上、より現実的な誤差の指標の利用、そして、初期モデルのパラメータと計測データ両方の統計的信頼度の取り込みを可能とした。

## Eigenstructure Assignment Method

### 固有構造配置法

Another matrix update method, known as “eigenstructure assignment,” is based on the design of a fictitious controller that would minimize the modal force error. The controller gains are then interpreted as parameter matrix perturbations to the undamaged structural model. Lim (1994, 1995) provides a clear overview of the eigenstructure assignment technique: Consider the basic structural EOM with a controller. Suppose that the control gains are selected such that the modal force error between the nominal structural model and the measured modal parameters from the damaged structure is zero. Then the “best achievable eigenvectors” can be written in terms of the measured eigenvectors. The relationship between the best achievable eigenvectors and the measured eigenvectors is then used as a measure of damage location. Specifically, if damage is in a particular member, then the measured and best achievable eigenvectors are identical. Thus, the angle between the two vectors gives an indicator of how much a particular member contributes to the change in a particular mode. This information can be used to hypothesize the location of the structural damage. The magnitude of the damage is then computed using the eigenstructure assignment technique such that the best achievable eigenvectors, undamaged model matrices, and controller satisfy the modal force error equation. Lim and Kashangaki (1994) introduce the use of the best achievable eigenvectors for the location of structural damage and apply the technique to the detection of damage in an 8-bay cantilevered truss.

他の行列更新方法として、モーダルフォース誤差を最小化する仮想のコントローラ的设计をベースとした“固有構造配置”がある。仮想コントローラのゲインは、無損傷構造モデルのパラメータ行列の摂動として解釈される。Lim (1994, 1995) は、コントローラと運動方程式の基本構造を考慮し、固有構造配置のテクニックの概要を明らかに示した。仮想コントローラのゲインは、公称構造モデルと損傷構造がゼロと計測モーダルパラメータ間のモーダルフォース誤差として選択される。そして、“最適達成可能固有ベクトル”は、計測固有ベクトルの項として扱える。最適達成可能固有ベクトルと計測固有ベクトルとの関係は、後に損傷位置の計測に使用される。特に、特定部材が損傷している場合、その後の計測固有ベクトルと最適達成可能固有ベクトルは同じものである。このように、2つのベクトル間の角度は、特定部材が特定モードの変化にどの程度影響するかの指標を示す。この情報は、構造的な損傷の位置を仮定するのに用いることができる。最適達成可能固有ベクトル、無損傷モデル行列、そして、モーダルフォース誤差方程式を満足するコントローラといった固有構造配置法を用いて、損傷の大きさが計算される。Lim と Kashangaki (1994) は、損傷位置と 8 ベイの片持ちトラスの損傷の検出する手法を適用するために、最適達成可能固有ベクトルの利用を提示した。

Zimmerman and Kaouk (1992) implement such an eigenstructure assignment technique for damage detection. They include algorithms to improve the assignability of the mode shapes and preserve sparsity in the updated model. They apply their technique to the identification of the elastic modulus of a cantilevered beam.

Zimmerman と Kaouk (1992) は、損傷検出のためにこのような固有構造配置法を用いた。彼らは、アルゴリズムに、モードシェイプの譲渡性と更新モデルのスパース性を維持するための改良を加えた。彼らは、片持ち梁の弾性係数の同定に、そのテクニックを適用した。

Lindner and Goff (1993) define damage coefficients for each structural member. They then use an eigenstructure assignment technique to solve for the damage coefficient for each member. They apply this technique to detect simulated damage in a 10-bay truss FEM.

Lindner と Goff (1993) は、構造部材毎の損傷係数を定義した。彼らは、各部材の損傷係数を解析するために固有構造配置法を用いた。彼らは、10 ベイトラスFEMでシミュレートした損傷を検出するために、この手法を適用した。

Lim (1994, 1995) applies a constrained eigenstructure technique experimentally to a twenty-bay planar truss. His approach identifies element-level damage directly, rather than finding perturbations to the stiffness matrix. The computation of element-level perturbations is accomplished by diagonalizing the control gains, then interpreting the diagonal entries as changes to the elemental stiffness properties. The technique is shown to work well even with limited instrumentation.

Lim (1994, 1995)は、20 ベイ平面トラスに実験的に制約付きの固有構造配置法を適用した。そのアプローチでは、剛性行列の摂動を見つけるというより、直接要素レベルの損傷を識別する。要素レベルの摂動の計算は、コントロールゲインを対角化することによって行われ、その後、要素剛性特性の変更として対角要素を解釈する。

Schulz, et al. (1996) present a technique similar to eigenstructure assignment known as “FRF

assignment.” The authors formulate the problem as a linear solution for element-level stiffness and mass perturbation factors. They point out that using FRF measurements directly to solve the problem is more straightforward than extracting mode shapes. They use measured mobility functions (FRFs from velocity measurements) to obtain higher numerical accuracy, since the velocity response is flatter over the entire spectrum than either the displacement or acceleration response. The technique is applied to an FEM of a bridge structure. Cobb and Liebst (1997) present another eigenstructure assignment-based method for structural damage identification.

Schulz等 (1996) は、周波数応答関数配置方式 (FRF assignment) という固有構造配置に似た手法を示した。彼らは、要素レベルの剛性と質量の摂動要素の線形解として問題を定式化した。彼らは、問題解決のために直接FRFの計測値を使用するのが、モードシェイプを抽出するよりも簡単であることを示した。彼らは、速度応答が、変位または加速度応答のいずれかよりも、スペクトル全体にわたって平坦にされているので、より高精度の計測値を得るために計測モビリティ機能(速度計測からFRF)を使用した。その手法は、橋梁構造のFEMに適用された。Cobb と Liebst (1997) は、構造損傷同定のために、固有構造配置法をベースとしたもう一つの方法を示した。

## Hybrid Matrix Update Methods and Other Considerations

### ハイブリッドな行列更新方法とその他事項

Baruh and Ratan (1993) use the residual modal force as an indicator of damage location. They separate the residual modal force into the effects of identification error in the measurements, modeling error in the original structural model, and modal force error resulting from structural damage. They examine the sensitivity of the damage location solution to errors in the original structural model and to inaccuracies in the modal identification procedure.

Baruh と Ratan (1993)は、損傷位置の指標として残留モーダルフォースを用いた。彼らは、計測による同定誤差、オリジナル構造モデルによるモデル化誤差、そして、構造的な損傷に起因するモーダルフォース誤差の影響により、残留モーダルフォースを分離した。彼らは、オリジナル構造モデルの誤差とモーダル同定手法の最大誤差で、損傷位置結果に対する感度を調査した。

Kim and Bartkowicz (1993, 1994) and Kim, et al. (1995a) present a two-step damage-detection procedure for large structures with limited instrumentation. The first step uses optimal matrix update to identify the region of the structure where damage has occurred. The second step is a sensitivity-based method, which locates the specific structural element where damage has occurred. The first advantage of this approach lies in the computational efficiency of the optimal update method in locating which structural parameters are potentially erroneous. The second advantage lies in the small number of parameters updated by the sensitivity-based technique.

Kim と Bartkowicz (1993, 1994), ならびに, Kim等 (1995a) は, 大規模構造の局所的な計測における2段階の損傷検出手順を提示した。第1段階では, 損傷が発生している構造の領域を識別するために, 行列更新の最適化を用いる。第2段階では, 損傷が発生している特定の構造要素の位置を識別するために, 感度ベースの手法を用いる。このアプローチの第1の長所は, 潜在的な構造パラメータの間違いを見つけるための最適な更新方法の計算効率化を図れることである。第2の長所は, 感度ベースの手法により更新パラメータを少なくできることである。

Li and Smith (1994, 1995) present a hybrid model update technique for damage identification that uses a combination of the sensitivity and optimal-update approaches. This method constrains the stiffness matrix perturbation to preserve the connectivity of the FEM, and the solution minimizes the magnitude of the vector of perturbations to the elemental stiffness parameters. The hybrid technique is shown to be more computationally efficient than the iterative sparsity-preserving algorithm presented by Smith (1992).

Li と Smith (1994, 1995)は, 感度と最適な更新アプローチの組み合わせた, 損傷同定のためのハイブリッドモデルの更新手法を示した。この方法は, FEMの連結性を保持することで剛性行列の摂動を制限し, 要素剛性パラメータに応じて摂動ベクトルの大きさを最小にする。このハイブリッドな手法は, Smith (1992) によって示されたスパース性を保持した反復アルゴリズムよりも, 効果的な計算方法として示された。

Dos Santos and Zimmerman (1996a) examine the effects of model reduction via component mode synthesis (specifically using the Craig-Bampton technique) on the accuracy of damage identification results obtained using the MRPT force residual and angle residual vectors. Numerical examples were conducted using a FEM of a clamped-clamped beam divided into five substructures of 3 or 4 elements each. Damage was simulated on one of the elements within one of the substructures by reducing the cross-sectional moment of inertia by 25%.

The results indicated that the MRPT force residual vector was unable to accurately locate the damaged substructure. The results of applying the angle residual vector indicated that the damaged substructure could be identified using a highly truncated component mode set, and the damaged element could be identified using a more rich component mode set.

Dos Santos と Zimmerman (1996a)は、MRPT残留力と残差ベクトルの角度を使用して得られた損傷同定の結果の精度で、コンポーネントモード合成法 (Craig-Bampton法が特に用いられる) によるモデル縮小の影響を調査した。数値例は、それぞれが3か4要素の、5つの部分構造に分割されたクランプ支持梁のFEMで利用された。損傷は、横断面慣性モーメントを25%に減らした1つの部分構造の1つの要素としてシミュレートされた。MRPT残留力ベクトルとして示された結果は、損傷を受けた部分構造を正確に見つけられなかった。損傷を受けた部分構造を示す残差ベクトルの角度を適用した結果は、高次が打ち切られたコンポーネントモードセットを利用することにより特定できた。

Dos Santos and Zimmerman (1996b) propose a method for damage identification that uses MRPT in conjunction with ordinary least-squares estimation to preserve the connectivity of the FEM during the update procedure. The method produces estimates of the damage extent in the form of element-level stiffness parameter perturbations. The procedure is conducted in two steps: First, the damaged global stiffness matrix perturbation is estimated using the MRPT algorithm. Next, a set of parameters representing the loss of stiffness in each element is estimated by minimizing the error between the MRPT matrix perturbation and the global stiffness matrix perturbation computed using the elemental stiffness matrices and the stiffness reduction parameters. The unique estimation of the parameters requires that the number of measurement be greater than or equal to the number of parameters being estimated.

Dos Santos と Zimmerman (1996b)は、更新手順を通して、FEMの接続性を維持するため、一般的な最小二乗推定と共にMRPTを用いる損傷同定法を提案した。その方法では、要素レベルの剛性パラメータの摂動の形式で、損傷の大きさの推定値を概算する。その手順は、2つのステップで処理される。1つめのステップは、損傷を受けた全体剛性行列の摂動が、MRPTアルゴリズムを用いて概算される。次に、各要素の剛性低下を示すパラメータのセットが、MRPT行列の摂動と、要素剛性行列と剛性低下パラメータを用いて計算された全体剛性行列の摂動との間の誤差を最小化することによって概算される。そのパラメータの一意性を判断するためには、計測数よりも多い、または、等しい数の推測点が必要とする。

Gafka and Zimmerman (1996) evaluate the performance of a mode shape expansion algorithm known as Least-Squares Dynamic Residual Force Minimization with Quadratic Measurement Error Inequality Constraint (LSQIC). The method is used to estimate the component of the measured mode shapes at the unmeasured FEM DOF. The method minimizes the error in the residual modal force vector that results from substituting the expanded measured mode shape into the FEM eigenequation. The magnitude of the difference between the expanded and measured mode shape at the measurement DOF is constrained to be less than a certain fraction of the magnitude of the measured mode shape. The method is compared to two standard techniques — Guyan (or static) expansion and dynamic expansion — for application to both FEM model correlation and damage identification. The results demonstrate that the expansion method allows for accurate FEM correlation in the general case where the errors are distributed somewhat evenly in the structure. However, in the case of damage identification, where the discrepancies between the test data and the model are isolated at a few DOF, a smearing effect resulting from the use of a singular value decomposition in the solution procedure can impede accurate identification of the damage.

Gafka と Zimmerman (1996)は、「二次計測誤差の不等式制約付き最小二乗法の動的な残留力の最小化 (LSQIC)」として知られるモードシェイプ拡張アルゴリズムのパフォーマンスを調査した。その方法

は、計測不可能なFEMの自由度で、計測されたモードシェイプを概算するために用いられる。その方法は、FEM固有方程式の中で増大した計測モードシェイプの代わりに生じた、残留モーダルフォースベクトルの誤差を最小化する。拡張モードシェイプと計測された自由度における計測モードシェイプとの違いの大きさは、計測モードシェイプの大きさの一定の割合よりも小さくなるように制約される。その方法は、FEMモデルの相関性と損傷同定に応用するため、一般的な2手法—Guyanの静縮小と動的法—で比較される。その結果は、「拡張メソッドは、構造内に一様に適度に誤差が拡散させられるような一般的なケースでは、FEMの相関性を正確に示す」ということを証明している。しかしながら、損傷同定のケースでは、試験データとモデルの差異がわずかな自由度で分離されている場合、解決手順の中で特異値分解を用いることによって生じたスミアリング効果により、正確な損傷同定が阻害される。

Yao and Natke (1994) present a model-based approach for damage detection and structural reliability evaluation based on parameter changes of the verified mathematical model. Hjelmstad and Shin (1997) present another damage detection technique based on FEM updating. This procedure uses an adaptive parameter-grouping scheme to localize the damage under the realistic conditions of spatially sparse measurement data. A technique is proposed to determine a threshold above which damage can be discriminated from background noise.

Yao と Natke (1994)は、損傷検出のためのモデルベースのアプローチと検証済の数学モデルのパラメータの変化に基づく構造信頼性評価を示した。Hjelmstad と Shin (1997)は、FEMアップデートングに基づくもう一つの損傷同定のテクニックを示した。この手順は、空間的にまばらな計測データの実際の条件下で損傷を制限するために、適用可能なパラメータを分類するために用いられる。このテクニックは、損傷とバックグラウンドノイズとが区別された上で、閾値決定のために示される。

Doebbling, et al. (1997) examine the effects of mode selection on the accuracy of the damage location and extent identified using a FEM refinement scheme. A method is proposed to select modes for the update based on modal strain energy content. James and Zimmerman (1997) present a study of the model order reduction and measured data expansion processes. The magnitude of errors introduced by the processes and the preservation of the original load paths are some of the topics addressed in this paper.

Doebbling等(1997)は、FEMの改良方法を用いて同定された損傷位置と大きさの精度で、モード選択の効果を調査した。その方法は、モーダル歪エネルギーの含有量に基づいた更新を目的としたモードを選択するために提示された。James と Zimmerman (1997)は、モデル次数の低減と計測データの拡張プロセスに関する研究を示した。オリジナルの荷重経路の手順と保持することによって決まる誤差の大きさは、この論文にいくつかのトピックとして取り上げられている。

# CRITICAL ISSUES FOR FUTURE RESEARCH IN DAMAGE IDENTIFICATION AND HEALTH MONITORING

## 損傷同定とヘルスマニタリングにおける将来研究のための重要課題

### 【抄訳】

本章は、振動を利用した構造損傷同定法とヘルスマニタリング法における重要課題についてまとめている。

- 多くのアルゴリズムが、初期の解析モデルおよび試験データへの依存度が高い。誤ったデータへの依存を最小にするための技術（モデルアップデート）が必要である。
- 現在の損傷同定法の多くが線形モデルを仮定しており、疲労亀裂の開閉など非線形応答を考慮するための技術が必要である。非線形応答を検出する技術は、初期モデルを不要にできるという利点がある。
- 実用性の高い損傷同定法とするためには、損傷発生位置に関する知識なしで、少ない測点数で最適な位置を決める方法が必要である。
- 多くの研究者が抱える重要な課題は、構造上の小さい損傷がモーダルパラメータに与える感度の問題であり、モーダルパラメータの変化が損傷によるものなのか物理的な検証を十分に行う必要である。
- 損傷によるモード特性の変化と測定条件の変化によって生じるモード特性の変化を区別する方法も必要である。モード特性の環境変化による変動など統計的に評価する研究がDoebblingらによって始められている。
- 橋や造船などの長期ヘルスマニタリングを行う上で、加振力への依存度を小さくすることも必要であり、常時微動の有効利用が求められる。
- 一部の研究で異なる損傷同定法の客観的な比較検証がなされているものの、そのような研究が不十分である（有用なデータの研究的活用）。
- 理論的アルゴリズムと実験上の制約との統合が、損傷同定法の確立のために必要である。
- 総括すると、各損傷同定法の検証の蓄積が必要であり、産官学の協力を得て、室内実験より供用環境下での実フィールドテストに注力すべきである。

This section contains a summary of the critical issues, as perceived by the authors, in the field of vibration-based structural damage identification and health monitoring. The purpose behind this section is to focus on the issues that must be addressed by future research to make the identification of damage using vibration measurements a viable, practical, and commonly implemented technology.

本章は、振動を利用した構造損傷同定とヘルスマニタリングの分野において、著者が考える重要課題についてまとめている。本章の目的は、実行可能で、実用的で、普遍的な技術として振動測定を利用した損傷同定法を確立するために、将来研究として扱わなければならない問題をフォーカスすることである。

One issue of primary importance is the dependence on prior analytical models and/or prior test data for the detection and location of damage. Many algorithms presume access to a detailed FEM of the structure, while others presume that a data set from the undamaged structure is available. Often, the lack of availability of this type of data can make a method impractical for certain applications. While it is doubtful that all dependence on prior models and data can be eliminated, certainly steps can and should be taken to minimize the dependence on such information.

最も重要な課題は、損傷同定および位置同定のための初期の解析モデルおよび（もしくは）試験データに依存されると言うことである。多くのアルゴリズムが構造の詳細なFEMへのアクセスを仮定しま

す。他のものは、損傷のない構造からのデータセットが利用可能であると推定しますが。しばしば、このタイプに関する有効なデータの不足により、あるアプリケーションは非実用的になる場合があります。初期モデルとデータへのすべての依存を除くことができるかが疑わしいため、そのような情報への依存を最小にするための確かな技術進歩が必要とされている。

Almost all of the damage-identification methods reviewed in this report rely on linear structural models. Further development of methods that have the ability to account for the effects of nonlinear structural response has the potential to enhance this technology significantly. An example of such a response would be the opening and closing of a fatigue crack during cyclic loading, in either an operational situation or in the case of a forced-vibration test. Many methods are inherently limited to linear model forms and, therefore, cannot account for the nonlinear effects of such a damage scenario. Another advantage of methods that detect nonlinear structural response is that they can often be implemented without detailed prior models. It is of interest to note that the one application where this technology is accepted and commonly used in practice, the monitoring of rotating machinery, relies almost exclusively on the detection of nonlinear response.

このレポートでレビューした損傷同定方法の多くが線形の構造モデルに頼ります。非線形の構造応答の効果の原因になる能力を持っている方法のさらなる展開には、この技術をかなり高める可能性があります。そのような応答の例は、供用状況か強制振動試験の場合における繰り返し荷重の間の疲労亀裂の開閉でしょう。多くの方法は、本来線形モデルフォームに制限されて、したがって、そのような損傷シナリオの非線形効果を考慮することができません。非線形の構造応答を検出する方法の別の利点は、詳細な初期モデルなしでそれらをしばしば実行できるということです。この技術が受け入れられて、実際には一般的に使用される1つのアプリケーション、回転する機械のモニターが非線形応答の検出に専ら依存することに注意するのは、興味があります。

The number and location of measurement sensors is another important issue. Many techniques that appear to work well in example cases actually perform poorly when subjected to the measurement constraints imposed by actual testing. Techniques that are to be seriously considered for implementation in the field should demonstrate that they can perform well under the limitations of a small number of measurement locations, and under the constraint that these locations be selected *a priori* without knowledge of the damage location.

計測センサの数と位置の決定は別の重要な課題です。実際のテストでは何らかの測定制限が課せられ、ある場合でうまくいくように見える多くのテクニックが、実際には不十分となる場合があります。その分野での実現のために真剣に考えられることになっているテクニックは、少ない数の測定位置の制限、およびこれらの位置が損傷位置に関する知識なしで先験的に選択されるという規制でよく振る舞うことができるのを示すべきです。

An issue that is a point of controversy among many researchers is the general level of sensitivity that modal parameters have to small flaws in a structure. Much of the evidence on both sides of this disagreement is anecdotal because it is only demonstrated for specific structures or systems and not proven in a fundamental sense. This issue is important for the development of health monitoring techniques because the user of such methods needs to have confidence that the damage will be recognized while the structure still has sufficient integrity to allow repair.

多くの研究者の中の論点となっている課題は、構造上の小さい損傷がモーダルパラメータに与える感度の問題です。それが特異的構造かシステムのために示されるだけであり、物理的に検証されていないので、この証拠がないと方法論が説得力を欠きます。そのような方法のユーザが構造には修理を許すことができるくらいの保全がまだある間損害が認識されるという信用を必要とするので、ヘルスマニタリングのテクニックの開発に、この問題は重要です。

An issue that has received almost no attention in the technical literature is the ability to discriminate between changes in the modal properties resulting from damage and those changes resulting from variations in the measurements. These variations result from changing environmental and/or test conditions and from the repeatability of the tests. A high level of variation in the measurements will prevent the accurate detection of small levels of damage. Mazurek (1997) presents a technique to address the variability issue in the context of vibration based damage identification. Very few vibration-based damage detection studies report statistical variations associated with the measured modal parameters used in the damage identification process. Even fewer studies report the results of false-positive studies (cases where techniques indicate damage even though the data is from an undamaged structure). Two recent studies (Doebing, et al., 1997a, and Farrar and Jauregui, 1996) have started to examine these issues.

技術文献においてほとんど注目されていない問題は、損傷によるモード特性の変化と測定条件の変化によって生じるモード特性の変化を区別することです。これらの変化は環境である、そして/または、テスト状態を変えて、テストの再現可能性から結果として生じます。測定値の、高いレベルの変化は小さいレベルの損傷の正確な検出の妨げとなるでしょう。Mazurek(1997)は、振動ベースの損傷同定の可変性問題を記述するためにテクニックを提示します。研究が、測定モードパラメータに関連している統計的変動が損傷同定の過程で使用したと報告するほんのわずかな振動ベースの損傷検出。さらに少ない研究が無病誤診研究(データが無傷の構造から来ていますが、テクニックが損害を示すケース)の結果を報告します。2つの最近の研究(Doebingと他と1997aとFarrarとJauregui, 1996)がこれらの問題を調べ始めました。

With regard to long-term health monitoring of large structures such as bridges and offshore platforms, the need to reduce the dependence upon measurable excitation forces is noted by many researchers. The ability to use vibrations induced by ambient environmental or operating loads for the assessment of structural integrity is an area that merits further investigation.

橋や海上作業台船などの大きい構造の長期ヘルスマニタリングに関して、測定できる加振力への依存を減少させる必要性は多くの研究者によって注意されます。構造完全評価のために周囲環境または供用負荷によって引き起こされた振動を使用する能力(常時微動)は、詳細調査に値する領域です。

The literature also has scarce instances of studies where different health-monitoring procedures are compared directly by application to a common data set. Some data sets, such as the NASA 8-Bay truss data set and the I-40 Bridge data set, have been analyzed by many different authors using different methods. However, the relative merits of these methods and their success in locating the damage have not been directly compared in a sufficiently objective manner. The study of the I-40 Bridge presented in (Farrar and Jauregui, 1996) compares five vibration-based damage identification methods applied to the same data sets. また、異なったヘルスマニタリング手順が一般的なデータセットへのアプリケーションで比較される研究が不十分という問題もあります。NASA8湾のトラスデータセットやI-40 Bridgeデータセットなどのいくつかのデータセットが、異なった方法を使用することで多くの異なった研究者によって分析されました。しかしながら、これらの方法と損傷同定結果の優劣は十分客観的な方法で直接比較されていません。I-40 Bridgeの研究は(FarrarとJauregui, 1996)、同じデータセットに適用された5つの振動ベースの損傷同定法を比較します。

A final note on future research in the field of vibration-based damage identification: There is a significant need in this field for research on the integration of theoretical algorithms with application-specific knowledge bases and practical experimental constraints. For example, most vibration-based damage identification theories are applied similarly to both an

airframe and a highway bridge. However, real-life vibration monitoring of airframes and highway bridges are radically different in terms of both equipment and techniques. Likewise, design margins and periodic maintenance requirements are different for an airframe and a highway bridge. Most (if not all) damage identification techniques proposed in the literature do not take into account these differences.

振動ベースの損傷同定の分野での将来研究に関する最後の課題：アプリケーション特有の知識ベースに基づいた理論的アルゴリズムと実用的な実験上の制約との統合が、この分野のために特に必要です。例えば、ほとんどの振動ベースの損傷同定理論が同様に機体と道路橋の両方に適用されます。しかしながら、機体の現実の振動モニタリングと道路橋は機材とテクニックの両方において根本的に異なっています。同様に、機体と道路橋において、設計余裕と周期的な保守要求は異なっています。文献によって提案されたほとんどの損傷同定法は、これらの違いを考慮に入れません。

Overall, it is the opinion of the authors that sufficient evidence exists to promote the use of measured vibration data for the detection of damage in structures, using both forced-response testing and long-term monitoring of ambient signals. It is clear, though, that the literature in general needs to be more focused on the specific applications and industries that would benefit from this technology, such as health monitoring of bridges, offshore oil platforms, airframes, and other structures with long design life, life-safety implications and high capital expenditures. Additionally, research should be focused more on testing of real structures in their operating environment, rather than laboratory tests of representative structures. Because of the magnitude of such projects, more cooperation will be required between academia, industry, and government organizations. If specific techniques can be developed to quantify and extend the life of structures, the investment made in this technology will clearly be worthwhile.

全体的に見て、測定振動データの構造損傷同定の使用を促進するために、強制応答テストと周囲の信号の長期のモニタリングの両方を使用して、十分に検証することが必要と考えられます。もっとも、一般に、長い設計寿命、供用期間の安全性、および高い資本支出で橋、海上石油プラットフォーム、機体、および非重要構造のヘルスマニタリングなどに、この技術の利益を得る特定応用と産業により集中する必要があるのは明確です。さらに、研究は代表している構造の室内実験よりむしろそれら構造物の供用環境で本当の構造をテストすることにフォーカスすべきです。そのようなプロジェクトの大きさのため、より多くの協力が産官学の間で必要でしょう。構造寿命の定量化や延命化のための特定技術を見いだすことができるなら、この技術開発に使われた投資は、非常に価値があります。

参考文献：

1) S. W. Doebling, C. R. Farrar and M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods", *Shock and Vibration Digest*, vol. 30, no. 2, pp. 91-105, 1998.