画像相関法とフラクタル次元解析を用いた **Baseline-free** 損傷検出法

Baseline-free damage detection method using Digital image correlation methods and Fractal dimension analysis

野村泰稔*・古田均**・日下貴之***・吉田和世****・石橋健*****

Yasutoshi Nomura, Hitoshi Furuta Takayuki Kusaka, Kazuyo Yoshida and Ken Ishibashi

*博士(情報学) 立命館大学助教 理工学部機械工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

** 工博 関西大学教授 総合情報学部総合情報学科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

***工博 立命館大学教授 理工学部機械工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

**** 関西大学大学院生 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

***** 関西大学大学院生 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1)

Recently, assessing the integrity of the civil or mechanical structures has been extremely important in order to ensure safety. In general, damage localization is performed through comparisons of some feature which robustly quantifies damage-induced changes, which implies that some baseline data needs to be possessed under the intact condition of the structure in advance. However, there are many existing structures which have no such baseline data. In this study, an attempt is made to develop a baseline-free damage detection system using digital image correlation method and fractal dimension analysis. The numerical and experimental results demonstrate that the proposed system can make it possible to detect damage location without using any baseline data by evaluating breakpoints of fundamental vibration mode.

Key Words: *Damage detection, Fractal dimension analysis, Digital image correlation*

1. はじめに

近年、日本では高度経済成長期に作られた大型高層ビルや橋梁、道路等、数多くの構造物が老朽化し、耐用寿命を迎えている。これらの構造物を改築、改修するためには膨大なコストが必要であり、現状の構造物を維持することが重要である¹⁾。そのため、定期的な点検や補修が必要になるが、補修の際に構造物全体を対象とした破壊検査や非破壊検査を行うことは多くのコストがかかるため、何らかの事前調査を行うことが現実的である。このような背景により、詳細検査が必要な損傷箇所を事前に特定することを目指す、振動応答計測に基づく構造ヘルスマニタリング手法についての研究²⁾³⁾⁴⁾が行われている。構造物に損傷が発生すると、健全時と比較して振動特性に変化が現れることが知られており、一般的に損傷に起因する構造特性の変化は、周波数特性、モード形状、減衰特性などを観察することで把握されるが、これらは損傷に対する感度が低く、損傷箇所の特定はそれほど容易ではない。また、これまでに有用性が確認されている先駆的な手法として、構造物の応答から損傷の指標となる剛健性を逆解析により直接同定する方法⁵⁾⁶⁾、自己回帰モデルを用いた方法⁷⁾⁸⁾、Wavelet解析を用いた方法⁹⁾¹⁰⁾、あるいはカオス理論を適用した方法¹¹⁾¹²⁾

など、多岐に渡る手法が提案されている。ただし、これまでに提案されている方法の多くは損傷箇所を把握する際、健全時の損傷指標となる基準データ (Baseline-Data) が必要であり、古い既設構造物のように完成時の状態が不明の場合は適用できない。今後の診断対象の増加と熟練診断者の減少を勘案すると、健全時の基準データを必要とせず、社会基盤施設の即時診断が可能で、更なる詳細検査が必要な箇所を特定する技術の開発は効率化の観点からも極めて重要な課題であり、その実現可能性を調査することは重要である。

近年、デジタルカメラの高性能化、特に画素分解能の向上によって、構造物のひずみや応力といった力学情報を計測する研究¹³⁾が実施されている。これらは比較的広範囲を非接触で簡便にかつ効率的に評価でき、既設構造物への適用性も高いと考えられる。可視光画像を用いる手法は赤外線等を用いた手法に比べて、より簡便で安価なシステムの構築が可能であることから有望視されている。

本研究では、健全時の情報を必要とすることなく、既設構造物の即時診断を簡易に実施できるシステムの開発を目的として、可視光動画の画像相関法を用いた **Baseline-free** 型の異常診断法を開発することを目指す。デジタル動画をもとに画像相関法を用いて、振動応答を空間的高密度に計測し、フーリエ振幅値で簡易的に推定され

る基本モード形状の連続性の変化を検出することを試みる。損傷が発生するとモード形状の曲線構造に局所的な連続性の変化が現れると考え、それをフラクタル次元解析により評価することを試みる。なお、本研究では剛性が均一状態の一樣断面を有する構造物を診断対象として、その構造特性に局所的に欠陥が生じる状態を損傷と考える。

以下では、フラクタル次元解析を用いたモード形状の連続性の評価について説明し、数値実験を通じてその有用性を検証する。次に画像相関法を説明し、対象の変位応答の取得方法について述べる。最後に橋梁模型を用いて、車両走行実験を行い、桁上の切欠きを損傷と見なし、振動応答から構造形状の変化点を抽出できるか確認し、獲得されるフラクタル次元と損傷領域の関係性について調査する。

2. フラクタル次元による連続性の評価

フラクタル¹⁴⁾とは、B. Mandelbrotが導入した幾何学の概念であり、フラクタルを端的に言うと、複雑な図形の細部を拡大すると、元の図形と同じ形をしている性質「自己相似性」を持つ図形である。フラクタル図形を定量化したものがフラクタル次元となる。直線の次元は1、正方形の次元は2、立方体の次元は3であるが、フラクタル次元は非整数値の次元を定義することができる。また、幾何形状だけでなく、各種様々な時系列データに対する時間軸上の自己相似性を評価する方法としても利用されている。本研究では、診断対象の基本モード形状を曲線と考え、損傷発生により、モード形状の曲線構造の連続性に变化が生じると考え、M.J.Katzにより提案されたフラクタル次元解析^{15),16)}を用いて構造形状の変化を評価できるかどうか検討した。図-1の曲線を例にして、Katzのフラクタル次元の計算方法について簡単に説明する。図-1中、 x_{i-1} , x_i , x_{i+1} はセンサなどの計測点の位置情報であり、 $x=(x_i, y_i)$ のように水平・垂直方向に値を持つものとする。 $d(x_i)$ は x_{i-1} から x_{i+1} までの直線距離である。また、 l_1 , l_2 は曲線を各計測点間の距離で近似した値であり、 L はその合計である。曲線Aは曲線Bと比較して、曲がりくねっており、より複雑である。この時、フラクタル次元は式(1), (2)で計算される。

$$FD_n(x_i) = \frac{\log_{10}(n)}{\log_{10} \frac{d(x_i)}{L(x_i)} + \log_{10}(n)} \quad (1)$$

$$d(x_i) = \max[dist(x_{i-\frac{n}{2}}, x_{i-\frac{n}{2}+k})] \quad (2)$$

($k = 1, 2, \dots, n$)

ここで、 n はフラクタル次元を計算する際に使用する左右に位置する計測点の数であり、本研究では空間サンプリングと呼ぶ。図-1の場合、空間サンプリング $n=2$ となる。つまり、 x_i を中心に左側は x_{i-1} 、右側は x_{i+1} の左右、計2つのセ

図-1 曲線の複雑性評価の概念図

図-2 フラクタル次元の計算

図-3 1次モード形状の比較

表-1 損傷パターン

Damage pattern No.1	20% damage at 2.0m - 2.5m
Damage pattern No.2	30% damage at 2.0m - 2.5m
Damage pattern No.3	30% damage at 3.5m - 4.0m
Damage pattern No.4	20% damage at 2.0m - 2.5m & 30% damage at 5.0m - 5.5m

ンサ間の複雑性を測ることとなる。また、式(2)中の $dist$ は2点間の直線距離を計算するものである。

図-1を例にフラクタル次元値を計算すると、曲線Aの $d(x_i)/L(x_i)$ は曲線Bよりも小さく、結果として、計測点 x_i において計算されるフラクタル次元は曲線Aの方が大きい値

を出力することとなる。本研究では、図-2に示すように各計測点間で重複を許し、1次モード形状の曲線構造をフラクタル次元により評価することで、損傷位置同定を試みる。

2.1 数値実験

Baseline-free型損傷検出手法の基礎的検討として、本研究では一様断面を有する10mの片持ち梁を対象としてモード形状のフラクタル次元解析を実施する。片持ち梁に与える損傷は曲げ剛性の低下を考え、表-1に示す単一の損傷および複数の損傷が発生する状況を数値実験により検討した。なお、0.5m間隔で節点を設けている。ただし、ここでのモード形状は固有値解析で得られたものではなく、1次モードが励起するように片持ち梁の自由端に調和振動を与え、各節点の変位応答を取得し、それらのフーリエ振幅値からモード形状を見積もったものである。

図-3に損傷前後の1次のモード形状の比較結果を示す。この際の損傷は損傷パターンNo.4を与えている。図-3から明らかなように、対象に複数の損傷を与えているにも関わらず、モード形状の変化は自由端付近に僅かに認められるものの、どこに損傷が発生しているのか判断することは容易ではないことが分かる。

2.2 フラクタル次元解析結果

各損傷パターンの条件下で得られた1次モード形状に対して、フラクタル次元解析を実施した結果を図-4から図-6に示す。ここでは、式(1)、(2)の空間サンプリング $n=2$ とし、各節点の座標設定として、固定端から自由端までの距離を0~1で正規化し、振動方向には各節点で得られたmm単位のフーリエ振幅値を与えた。なお、参考のためにすべての結果に健全時のフラクタル次元を図示している。これらの図の縦軸はフラクタル次元であり、横軸は固定端からの距離であり、各節点の本来の位置である。

図-4は2.0m-2.5m間に曲げ剛性低下(20%および30%)を与えた際のフラクタル次元を示している。健全時は固定端から自由端に向かって滑らかに1.0に近づいていく様子が確認できる。この理由は、図-3から明らかなように健全時は固定端から自由端に向かってモード形状の曲線構造が滑らかに直線に近づいていくためである。一方、損傷時は与えた剛性低下領域において、フラクタル次元の連続性に変化が生じていることが分かる。これらの連続性の変化領域と与えた剛性低下領域が一致していることから損傷位置の同定に成功していることが分かる。さらに損傷の大きさに従い、フラクタル次元の連続性の変化の度合いが大きくなることが分かる。

損傷パターンNo.3についても、損傷を与えた領域(3.5m-4.0m)において、フラクタル次元の連続性に変化が生じており、損傷位置の同定に成功していることが分かる(図-5)。また、複数の損傷を与えた状況においても図-6から明らかなように、損傷を与えた領域(2.0m-2.5mおよび5.0m-5.5m)とフラクタル次元の連続性に変化が生じる領域が一致しており、損傷領域を的確に同定することに成功していることがわかる。これらの理由はのちに示す模型橋梁

図-4 健全時と損傷パターンNo.1とNo.2のFD値

図-5 健全時と損傷パターンNo.3のFD値

図-6 健全時と損傷パターンNo.4のFD値

車両走行実験結果を考察する際に述べる。また、モード形状に対してフラクタル次元を評価する際、座標設定($\mathbf{x}=[x_i, y_i]$)が重要となる。各座標に対象構造物の本来の長さおよびメートル単位のフーリエ振幅値を与えた場合の結果を図-7に示す。ここでは損傷パターンNo.1、No.2と健全時の結果を示している。損傷を与えた領域(2.0m-2.5m)とフラクタル次元の連続性に変化が生じる領域が一致しており、座標設定時に本来の値を設定した場合でも損傷領域を的確に同定していることが分かる。ただし、フラクタル次元は限りなく1.0に近い値を示し、モード形状はほとんど直線と見なされ(直線のフラクタル次元: 1.0)、計算機環境によってはこのような連続性の変化を捉えられない状況が発生すると考えられる。ここで、図-7の各節点で得られたフラクタル次元を平均: 0, 分散: 1に正規化することを考える。図-8にその結果を示す。損傷を同定する場合、フラク

図-7 本来の座標を設定した場合のフラクタル次元

図-8 正規されたフラクタル次元

タル次元の値そのものの大きさを評価するのではなく、フラクタル次元の連続性の変化を捉えることが重要である。図-8から明らかなように、これまでの結果と同様に、損傷を与えた領域と正規化されたフラクタル次元の連続性が変化する領域が一致しており、さらに、損傷の大きさに従い、正規化データの連続性の変化の度合いが大きくなっていることが分かる。

以上のことから、フラクタル次元あるいは正規化されたフラクタル次元の連続性の変化を評価することで、複数の損傷およびそれらの領域を同定することが可能であると言える。

3. デジタル画像相関法による振動計測

本システムは対象物の変位応答の取得にあたり、まず、動画の初期画像を参照画像とし、それ以降の画像を評価画像として、2枚のデジタル画像から画像相関法と呼ばれるパターン認識の一種の手法を用いている。デジタル画像相関法とは、2枚のデジタル画像から対象物の表面の濃淡情報を追跡し、対象物の変位ベクトル $\{u\}$ を同定する手法である。

図-9に画像相関法の概念図を示す。まず、参照画像上に節点を配置し、その節点を中心として、参照画像上において節点ごとにサブセットと呼ばれる小領域を作成する。こ

(a) 参照画像上のサブセット作成

(b) 評価画像上での探索

(c) 変位ベクトルの取得

図-9 画像相関法の概念図

の節点の位置座標を $\{x_0\}=(a_0, b_0)$ とする。また、切り出した $M_s \times N_s$ 画素のサブセット画像 $g(i,j)$ をテンプレートとする。この $M_s \times N_s$ 画素のサブセット画像 $g(i,j)$ を評価画像 $f(i,j)$ の中を適当な走査範囲上で動かす。そして、サブセット画像 $g(i,j)$ が評価画像上に対応する位置 $f(i,j)$ を探索する。このとき、この位置における中心の節点の座標を $\{x_1\}=(a_1, b_1)$ とする。参照画像上のサブセット画像 $g(i,j)$ が評価画像に対応している位置を推定する手法として、テンプレートマッチングと呼ばれる手法を用いる。これは参照画像上のサブセット画像と評価画像を照らし合わせ、一致度を評価し、両者が最も類似する位置を探す手法である。その際に用いる一致度評価値の手法として、画像の明るさの変動に強いという利点から、ZNCC (Zero-mean Normalized Cross Correlation : 正規化相互相関)を採用する。

この手法でサブセット画像 $g(i,j)$ と評価画像のある部分領域 $f(i,j)$ との一致度を評価するに当たり、相関係数 cc を算出する。ZNCCによる相関係数 cc は式(3)のように表される。

$$cc(a, b) = \frac{\sum_{i=0}^{M_s-1} \sum_{j=1}^{N_s-1} \{f(i,j) - \bar{f}\} \{g(i,j) - \bar{g}\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M_s-1} \sum_{j=1}^{N_s-1} \{f(i,j) - \bar{f}\}^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{M_s-1} \sum_{j=1}^{N_s-1} \{g(i,j) - \bar{g}\}^2}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{f} = \frac{1}{M_s N_s} \sum_{i=0}^{M_s-1} \sum_{j=1}^{N_s-1} f(i,j) \\ \bar{g} = \frac{1}{M_s N_s} \sum_{i=0}^{M_s-1} \sum_{j=1}^{N_s-1} g(i,j) \end{cases} \quad (4)$$

$\bar{f}$ および $\bar{g}$ はそれぞれ評価画像の部分画像とサブセット画像の輝度の平均値を示している。相関係数 cc の値が 1 に近づくほど正の相関が強く、マッチングが良好であるといえる。走査範囲上で相関係数 cc が最も 1 に近い位置をサブセット画像 $f(i,j)$ が評価画像上に対応する節点位置 $\{x_1\} = (a_1, b_1)$ とし、マッチングが成立したものとみなす。

なお $\bar{f}$ および $\bar{g}$ により相関係数は、濃淡階調の線形変換の下で不変であるため、撮影環境の違いなどが原因となってコントラストや明度が大きく異なる画像の位置合わせにも用いることができる。しかし、参照画像と評価画像の間に大きな幾何学的変形や変化が起こっている場合には相関係数は著しく小さくなり、マッチングが困難となる問題もある。評価画像から相関係数 cc が最も高くなる位置 $\{x_1\} = (a_1, b_1)$ を探し出すことで変位ベクトル $\{u\}$ を同定する。変位ベクトル $\{u\}$ は以下の式で求められる。

$$\{u\} = \{x_1\} - \{x_0\} \quad (5)$$

これらの処理を全ての節点について繰り返す事によって、測定対象領域の変位場が計測される。ただし、これらの変位はピクセル単位であり、実構造物の変形計測においては、より高い精度が要求される。本研究では変位応答の精度をピクセル単位以下にするサブピクセル推定を行った。

上記で得られた相関性の最も高いピクセル単位の照合位置 (a_1, b_1) を基準として、 x, y 方向の ± 1 画像ずつをそれぞれ加えた計 3×3 点における輝度相関値を用いて、次式により示される曲面 $cc(x, y)$ を最小二乗法により求める。

$$cc(x, y) = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + f \quad (6)$$

ただし、 $a \sim f$ は最小二乗法により得られる係数である。この曲面 $cc(x, y)$ はピクセル単位で得られた相関係数関数を近似したものとなり、 $cc(x, y)$ が最大値をとるときの座標がサブピクセル単位での照合位置となる。以上の処理を動画の初期画像を起点として、最終画像まで繰り返すことによって、各節点の変位応答が取得できる。

4. 損傷同定アルゴリズム

提案手法では、まず空間的高密度に計測される対象表面の変位場時刻歴を取得し、それらからモード形状を算出する。そして、モード形状にフラクタル次元解析を適用し、フラクタル次元の連続性を評価することで、損傷領域の同定を試みる。表-2 に提案手法の計算手順をまとめる。まず、Step1 から Step3 において、振動中の対象構造物を動画計測し、取得した動画画像の内、初期画像に計測ポイントを配置する。そして、画像相関法を用いて、計測ポイントの移動量をピクセル単位で算出し、その都度、算出された相関係数の関数を曲面近似し、得られた曲面の最大値を与える座標からサブピクセル変位を求め、変位場時刻歴を求める。

表-2 損傷同定アルゴリズムの計算手順

Step 1	構造物の振動状況を撮影
Step 2	初期画像への計測ポイントの配置
Step 3	画像相関法による計測ポイントの変位応答をサブピクセル推定
Step 4	各節点の振動応答から 1 次モードに相当するフーリエ振幅値を計算
Step 5	フラクタル次元解析により 1 次モード形状の曲線構造を評価することにより、損傷を同定

各計測ポイントで得られた変位応答から 1 次モードのフーリエ振幅値を算出し、簡易的にモード形状を算定する。得られたモード形状に対して、2 章で示した Katz のフラクタル次元解析を実施し、フラクタル次元の連続性を評価し、対象構造物の構造変化点および損傷領域を同定する。

5. 実証実験

橋梁模型車両走行実験装置を用いて、車両走行実験を行い、橋梁模型の構造特性の変化がフラクタル次元により評価できるかどうか確認するとともに、フラクタル次元解析結果と損傷領域の関係について調査した。本研究では模型桁の健全な領域と損傷を有する領域を一度に計測できる状態で動画計測を行った。なお、動画計測には市販のデジタルビデオカメラを使用した。

5.1 実験概要

実験に使用する模型桁は、図-10 に示すような支間長 5.4m の I 型断面鋼桁であり、その構造諸元を表-3 に示す。損傷については、コンクリート橋において、支間中央部は曲げモーメントが極大となる部分があり、曲げひび割れが発生しやすいことから、これを模擬するため、3L/8-L/2 間のフランジ下を深さ 15mm の範囲で削り取り、その領域を損傷と見なした。なお、動画の計測は、図-10 中の Shooting area と示された領域を撮影した。また、車両走行のためのガイドレールには路面凹凸が再現されている。この路面凹凸は、梅田入路橋の実測データを 1/10 スケールとしたものの、橋梁をより振動させるために、さらに凹凸を加えたものを利用する。本研究では車両の走行速度を変えた 3 ケース (1.35m/s, 1.0m/s, 0.9m/s) の実験を行った。車両走行速度 1.35m/s の結果を case 1, 走行速度 1.0m/s の結果を case 2, 走行速度 0.9m/s の結果を case 3 とする。

実際の動画計測領域を図-11 に示す。これは図-10 の Shooting area を橋軸直角方向から縦横 1080×1920pixel で撮影したものであり、図中の黒プロット (計 11 点) は計測ポイントである。ただし、この計測ポイントのプロットは動画計測時に橋梁にマークしたものではない。変位応答の取得は動画撮影後にプロットの領域下の画素の輝度値を画像相関法により追跡し、変位応答をサンプリング 30Hz で取得している。

図-10 車両走行橋梁振動実験装置

表-3 構造物の諸元

Span length	540 cm
Young's modulus	$2.1 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$
Unit weight	$7.8 \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$
Area of section	65.43 cm^2
Moment of inertia of Area	57.48 cm^4

図-11 撮影領域と計測ポイント

5.2 振動計測結果

図-12 に車両走行時の振動検出結果の内、計測ポイント P1 の変位応答と周波数応答を示す。すべてのケースにおいて卓越周波数は 2.22Hz と 2.51Hz が確認された。別途行われた自由振動実験の結果から 2.51Hz が 1 次モードであることが分かっており、画像相関法により計測された振動波形およびその周波数応答は妥当であると考えられる。本研究では 2.51Hz のフーリエ振幅値を各計測ポイントで算出し、1 次モード形状を簡易的に見積もることとした。図-13 に各計測ポイントで得られた 1 次モードと推定される 2.51Hz のフーリエ振幅値を示す。縦軸はサブピクセル単位の振幅値であり、横軸は計測ポイントを示している。これらのフーリエ振幅値を確認すると、計測点 P1 から P3 が桁の支間中央に近いことから、それらのフーリエ振幅値が他の計測ポイントのそれと比較して大きいことがわかる。そして、切欠き終了点の P3 から P4 にかけて若干ではあるが、フーリエ振幅値に低下が認められる。そして、P4 以降は、概ね緩やかにフーリエ振幅値が減少していく傾向が認められる。本研究で検討した損傷が大きく、1 次モード相当のフーリエ振幅値からも P3 と P4 の間で何らかの構造特性

の変化が起こっていると推測できる可能性がある。ただし、どのような分布で損傷が発生しているのか判断できない。

5.3 フラクタル次元解析結果

本研究では、フーリエ振幅値に対してフラクタル次元解析を実施し、モード形状の曲線構造の変化を抽出するだけでなく、切欠き領域とフラクタル次元の関係性を調査し、損傷と見なした切欠き領域を同定できるかどうか検討した。なお、フラクタル次元を計算する際、式(1)の空間サンプリングを $n=4$ とし、フラクタル次元を計算する際の P1 から P11 までの座標設定として、P1 から P11 までの橋軸方向の距離を 0~1 で正規化し、振動方向には各計測ポイントで得られた 1 次モード相当のフーリエ振幅値を与えた。空間サンプリング $n=4$ とした場合、計 11 点の計測ポイントから得られるフラクタル次元は 7 点、計算されることになる。図-14 にフラクタル次元解析結果を示す。図-14(a) は case 1 (車両が速度 1.35m/s で桁上を移動した場合) の結果、図-14(b) は case 2 (車両が 1.0m/s で桁上を移動した場合) の結果、図-14(c) は case 3 (車両が 0.9m/s で車両が桁上を移動した場合) の結果である。各図の縦軸はフラク

図-12 計測ポイントP1の振動検出結果

図-13 1次モード相当のフーリエ振幅値

タル次元を示し、横軸はフラクタル次元を計算する際の中心位置となる計測点を示している。

まずcase 1(車両が速度1.35m/sで桁上を移動した場合)の結果を考察する。図-14(a)から明らかなように、P3, P4, P5で計算されるフラクタル次元が、他の計測点と比較して大きい値を示していることが分かる。空間サンプリングを $n=4$ とした場合、P3で計算されるフラクタル次元は自身を中心として、左側の2点(P1とP2)、右側の2点(P4とP5)のフーリエ振幅値を参照することで求められる。フラクタル次元を求める式(1)、(2)から明らかなように、変形時の各計測点間の距離の合計で表される $L(\mathbf{x}_i)$ と計算開始点であるP1から各計測点まで(この場合、P5まで)の間で最も長い直線距離 $d(\mathbf{x}_i)$ が一致すればフラクタル次元は1.0を出力し、 $L(\mathbf{x}_i)$ が $d(\mathbf{x}_i)$ より大きければ、フラクタル次元は1.0より大きくなる。また、 $L(\mathbf{x}_i)$ が $d(\mathbf{x}_i)$ より小さくなることはないに等しい。これらの計算手順を踏まえると、図-13で示したフーリエ振幅値から明らかなように、P3を中心として、切欠き部にあるP1からP3

までのフーリエ振幅値の減少傾向とP3から健全領域にあるP5までの減少傾向と異なり、P1からP5までの最長の直線距離 $d(\mathbf{x}_i)$ より $L(\mathbf{x}_i)$ の方が大きくなることから、P3のフラクタル次元が他と比べて大きな値を示すことが理解できる。P4についても同様に、自身を中心として、切欠き部にあるP2からP4までのフーリエ振幅値の減少傾向と健全領域にあるP4からP6までの減少傾向に違いがあることから、結果としてフラクタル次元は他と比較して大きな値を示したと考えられる。P5についても同様である。一方、健全領域にあるP6からP9のフラクタル次元に関しては、フラクタル次元の計算過程で参照される計測点P4からP8)ことから、フーリエ振幅値の減少傾向が概ね一定となり、結果として、フラクタル次元がP3, P4, P5と比べてより小さな値を示し1.0に近い値を示している。

次にcase 2(車両が速度1.0m/sで桁上を移動した場合)の結果を考察する。図-14(b)から明らかなようにフラクタル次元の値そのものはcase 1の結果と異なるものの、同様の傾向が得られていることが分かる。P3, P4, P5で計算されるフラクタル次元が、他の計測点と比較して大きい値を示し、健全領域にあるP6からP9のフラクタル次元に関しては、フラクタル次元の計算過程で参照される計測点P4からP9)ことから、フーリエ振幅値の減少傾向が概ね一定となり、結果として、フラクタル次元がP3, P4, P5と比べて小さな値を示している。

図-14(c)に示される車両が速度0.9m/sで桁上を移動した場合の結果を考察する。フラクタル次元の連続性に関して、他の結果と異なり、P3からP5にかけて若干減少傾向を示しているものの、P6からP9で得られるフラクタル次元より大きな値を示している。一方、健全領域にあるP6からP9のフラクタル次元は、フーリエ振幅値の減少傾向が概

ね一定となり、結果として、P3, P4, P5 で得られるフラクタル次元と比べて小さな値を示し、1.0 に近い値を示している。なお、これらの3 ケースの車両走行実験結果から得られたフラクタル次元の値そのものは3 ケースで多少のばらつきが生じている。このことは、車両速度の違いに加え、ムービーファイルを30Hzでフレーム処理する際に生じる量子化誤差や、画像相関法を適用した際の相関係数の曲面近似の際の誤差などが1次モード形状の推定結果に現れたことが理由として考えられる。ただし、前述のとおり、フラクタル次元の値から損傷を検知する際に重要な評価項目は、各計測ポイントで得られたフラクタル次元の値そのものではなく、フラクタル次元の連続性の変化である。各計測ポイントで得られたフラクタル次元を平均0, 分散1に正規化した場合の結果を図-15に示す。図から明らかなように、正規化されたデータはcase 1 および case 2 はほぼ一致し、case 3 についても2つのケースと概ね一致することから、フラクタル次元の連続性は3 ケースで違いはないと考えられる。

以上の3 ケースの結果全てにおいて、各計測ポイントで得られたフラクタル次元の連続性はP5からP6にかけて大きく変化している。このことから、1次モード相当のフーリエ振幅値をフラクタル次元解析により評価することで、直接、フラクタル次元が計算されないP1, P2, P10, P11を含め、これらの計測ポイントP1からP11の間で何らかの構造特性の変化が生じていることを予測できる。

5.4 フラクタル次元による損傷領域の推定

次に、損傷領域とフラクタル次元について考察する。本研究では、車両の速度を変えた3種類の走行実験を行ったが、すべてのケースでP3, P4, P5のフラクタル次元が他の計測ポイントで算出されるフラクタル次元と比較して大きな値を示し、P6以降のフラクタル次元が先の3つの計測ポイントのものと比較して相対的に低下していることが分かった。特に、P6のフラクタル次元を計算する際に参照される計測ポイントはP4からP8であり、P5のフラクタル次元を計算する際に参照される計測ポイントはP3からP7までである。結果から明らかなように、P5からP6にかけて、相対的にフラクタル次元の低下が生じるが、これらの違いは参照される計測ポイントがP3からP4に移動する際に起こっていることから、計測ポイントP3とP4の領域間で何らかの構造特性の変化が発生していると推測できる。実際に橋梁模型の構造は計測ポイントP3からP4において変化する。また、計測ポイントP3およびP4のフラクタル次元がP5のフラクタル次元と同程度の値を示すことから、これらを計算する際に参照される計測ポイントP1およびP2の領域もP3と同様の構造になっていると考えることができる。実際に、橋梁模型の構造も計測ポイントP1およびP2の領域は切欠き部となっている。

以上のことから、各計測ポイントで計算されるフラクタル次元の相対評価だけでなく、フラクタル次元を計算する際に参照される計測ポイントを考慮すると、構造特性の変化を検出し、さらには大まかな損傷領域を特定することが

図-14 フラクタル次元解析結果

図-15 正規化されたフラクタル次元

可能となると考えられる。なお、空間サンプリング $n=2,6$ で行った場合も同様の考察が可能であることを確認している。

6. 結論

本研究では、健全時の情報を必要とすることなく既設構造物の即時診断を簡易に行えるシステムの開発を目的として、可視光動画の画像相関法を用いたBaseline-free型の異常診断法を構築することを試みた。デジタル動画をもとに画像相関法を用いて、振動応答を空間的高密度に計測し、フーリエ振幅値で簡易的に推定される基本モード形状の連続性の変化が構造物の損傷に関連すると考え、それをフラクタル次元解析により評価した。画像相関法により振動応答が適切に検出できることを明らかにし、数値実験および橋梁模型を用いた車両走行振動実験を通じて提案手法の有用性が確認され、Baseline-free型の異常診断法が構築できた。

以下に、本研究を通じて得られた知見を整理し、今後の課題を追記する。

- 数値実験を通じて、1次モード形状の連続性をフラクタル次元解析により評価することが可能であること、また、得られたフラクタル次元の連続性の変化を与える位置は仮定する損傷領域と一致することが明らかとなった。
- 橋梁模型を用いた車両走行振動実験では、橋梁模型の振動状況を撮影し、動画に画像相関法を適用した結果、卓越周波数は別途行われた自由振動実験の結果と一致し、画像相関法により振動応答が正確に検出できることが明らかとなった。
- 橋梁模型を用いた車両走行実験結果から、1次モード相当のフーリエ振幅値をフラクタル次元解析により評価することで、構造特性の変化を同定することが可能であることが分かった。
- 各計測ポイントで計算されるフラクタル次元の相対評価だけでなく、フラクタル次元を計算する際に参照される計測ポイントを考慮すると、構造特性の変化だけでなく、大まかな損傷領域の特定が可能となることが分かった。

画像相関法の解析条件について、対象構造物とカメラとの距離が振動検出に影響することから、1ピクセル単位の絶対値長さを変更させながら、振動検出の精度を明らかにするとともに、サブピクセル精度をさらに向上させることが今後の課題である。また、画像相関法を適用する際のサブセットのサイズと次ステップの画像での探索範囲のサイズが振動計測にどのように影響するか明らかにする必要がある。そして、損傷検出に関連するものとして、計測ポイントの間隔の設定が重要な課題として挙げられる。間隔が大きすぎると、損傷を見落とす恐れが生じてしまう。

一方、間隔が小さすぎると、計測ポイント数が増大することから、結果的に振動および損傷検出に多大な時間を要し、診断対象の規模によっては非効率となる恐れがある。今後、動画の計測領域の広さと検出対象とする損傷の種類や程度から、計測ポイントの間隔を決定できるか検証する予定である。また、提案システムはフラクタル次元の連続性の変化を視覚的に評価することで損傷領域を同定している。損傷を見落とすことなく適切に検出するためには、フラクタル次元を視覚的に評価するだけでなく、物理的意味を有する閾値との比較を通じて損傷診断が行われるべきである。今後、フラクタル次元と損傷の関係を数値実験により調査し、閾値処理により定量的に診断が行えるかどうか検証するとともに、損傷に対する検出感度をさらに向上させる新たな特徴量を検討する必要がある。

本研究では、構造物の損傷として、構造変化が視認可能な状況と考えたが、損傷が構造物の剛性低下に与える影響を考えた場合、構造内部の損傷に対しても、提案手法は適用可能であると考えられる。上記の課題に加え、今後の取り組みとして、そのような状況下で実験を行い、提案手法の有用性を調査する予定である。

参考文献

- 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明: Bridge Management System(BMS) を利用した既設橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B.: A summary review of vibrationbased identification methods, *The Shock and Vibration Digest*, Vol.30, No.2, pp.91-105, 1998.
- Farrar, C.R., Duffey, T.A., Doebling, S.W. and Nix, D.A.: A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring, *Structural Health Monitoring* 2000, pp.764-773, 2000.
- Verboven, P., Parloo, E., Guillaume, P. and Van, O.M.: Autonomous structural health monitoring: part I, modal parameter estimation and tracking, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.16(4), pp.637-657, 2002.
- Mita, A.: Distributed health monitoring system for a tall building, *Proc. of 2nd International Workshop on Structural Control*, pp.333-340, 1996.
- 吉元怜毅, 三田彰, 森田高市: 振動モードとセンサ特性を考慮した構造物の並列処理型損傷同定, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.48B, pp.487-492, 2002.
- Sohn, H., Farrar, C.R., Hunter, N.F. and Worden, K.: Structural health monitoring using statistical pattern recognition techniques, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.123, pp.706-711, 2001.
- Bodeux, J.B. and Golinval, J.C.: Modal identification and damage detection using the data-driven stochastic subspace and arma methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.17(1), pp.83-89, 2003.
- Okafor, A.C. and Dutta, A.: Structural damage detection in

- beams by wavelet transforms, *Smart Materials and Structures*, Vol.9(6), pp.906-917, 2000.
- 10) Hou, Z., Noori, M. and Amand, R.St.: Wavelet-based approach for structural damage detection, *Journal of Engineering Mechanics* (ASCE), Vol.126(7), pp.677-683, 2000.
 - 11) Nichols, J.M., Todd, M.D., Seaver, M. and Virgin, L.N.: Use of chaotic excitation and attractor property analysis in structural health monitoring, *Physical Review E*, Vol.67, 016209, pp.1-8, 2003.
 - 12) Nichols, J.M., Trickey, S.T. Todd, M.D. and Virgin, L.N.: Structural Health Monitoring through Chaotic Interrogation, *Meccanica*, Vol.38, pp.239-250, 2003.
 - 13) Sutton, M.A., Orteu, J.J. and Schreier, H.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
 - 14) Mandelbrot, B.B.: The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Company, 1993.
 - 15) Katz, M.J.: Fractals and the analysis of waveforms, *Computers in Biology and Medicine*, Vol.18(3), pp.145-156, 1998.
 - 16) Hadjileontiadis, L.J., Douka, E. and Trochidis, A.: Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.19, pp.659-674, 2005.

(2013 年 3 月 18 日 受付)