

橋梁の無線高密度モニタリングのための データ分散処理と高速マルチホップ通信

Distributed data processing and fast multihop data transfer for dense wireless monitoring of bridges

長山智則*, 牛田満士**, 藤野陽三***
Tomonori Nagayama, Mitsushi Ushita, Fujino Yozo

*Ph.D., 東京大学大学院講師, 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒133-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1)

**住友商事株式会社 (〒104-8610 東京都中央区晴海 1-8-11 晴海トリトンスクエア)

***Ph.D., 東京大学大学院教授, 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒133-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1)

Smart sensors equipped with wireless communication and computational capabilities are expected to allow dense monitoring of infrastructure. However, dense vibration monitoring of structures is challenging due to the need to transfer a large amount of measurement data from a large number of sensor nodes. In this paper, two approaches to resolve this issue are proposed. First, a vibration data analysis algorithm is proposed so that measurement data can be analyzed in a distributed manner and only the analysis results need to be transferred. Secondly, a fast multihop data transfer is proposed to increase the communication speed. Smart sensor nodes equipped with the fast communication are installed on a suspension bridge and its acceleration vibration is densely monitored.

Key Words: smart sensor, vibration measurement, multihop communication, distributed processing

キーワード: スマートセンサ, 振動計測, マルチホップ通信, 分散処理

1. はじめに

社会基盤構造物の中には、維持管理により良好な状態に保たれているものから、劣化が進む構造物まで様々な状態物のものが存在する。設計や施工に問題を抱え事故に至る例も報告されている。構造物の状態を適切に判断・評価することは、社会基盤を良好な状態に維持するために極めて重要である。振動計測を利用した構造ヘルスマモニタリングは、膨大な量のインフラ構造物の状態を効率的に評価可能にすると期待されている。このためには動特性の詳細な把握が肝心であるが、計測機器、配線、設置などに多額の費用がかかることから¹⁾²⁾³⁾、計測は限られている。構造健全性評価のため、数々の研究がなされてきているものの⁴⁾⁵⁾限られた数の計測点の情報から、多数の部材からなる複雑な構造物の健全性を評価することは極めて難しい。

センサ導入コストを劇的に低減し、構造物の多点計測により、動特性の詳細な把握を実現する可能性を持っているのが、安価な MEMS 型センサと無線通信機能を組

み合わせた無線センサである。無線センサの多くは CPU を搭載しており、その計算能力を利用すれば、健全性評価に関するデータ処理、推定、判断を自動的、自律的に行えると考えられる。このような自律性や自己判断能力に着目して無線センサはスマートセンサとも呼ばれる。

ところが、スマートセンサの計測、通信、計算に関する能力は限られていることから、既往のモニタリング手法をそのままスマートセンサ上に実現することは難しい。そこで長山ら⁶⁾は構造振動計測に必要な同期計測、欠損補償通信、効率的なデータ集約の3機能をミドルウェアとして提案し、実装している。これらのミドルウェア機能を利用し、橋梁振動を計測する試みも幾つか見られる。しかしノード数、データ数が増加するにつれ、データ収集に必要な時間は膨大になる。ゴールデンゲート橋を 64 ノードを利用して振動計測した例ではデータ収集に 12 時間がかかったとの報告もある。構造物を多点で密に振動計測するためには多数ノードを利用することになるが、データ集約に必要な時間は極めて大きい。

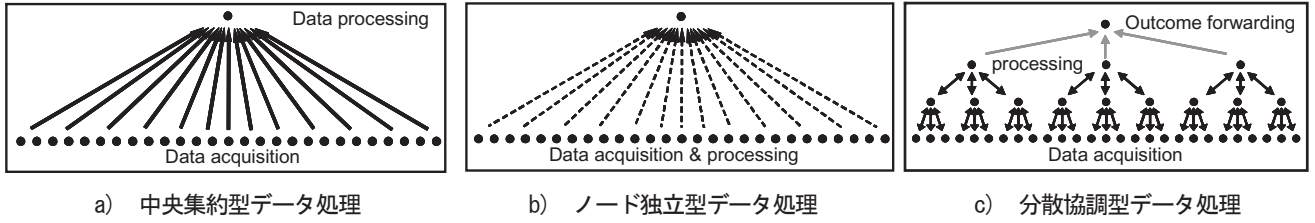


図- 1 ネットワーク内データ処理方法

そこで、多数ノードを利用した高密度構造モニタリングを効率的に行うための二つの方法を提案する。

一つは、長山ら⁶⁾が提案する分散協調型データ処理に合致する、振動計測に基づく損傷同定のためのアルゴリズムである。図 1a)に示す中央集約型データ処理はノード数の増加と共にデータ収集時間が膨大になる。図 1b)のように各ノードが独立してデータ処理を行う場合は、近隣ノードの振動計測データを活用できないことから、計測データを有効に活用できるとは言いがたい。そこで、図 1c)に示すように、近隣のノードがクラスタを作りデータを共有・処理し、処理結果をクラスタ間でさらに共有する分散協調型データ処理が有効であると考えられる。そこで、このようなクラスタ毎の分散処理に適した、振動データ分析アルゴリズムを提案する。

他方は、高速にデータを集約するためのマルチホップデータ転送プロトコルである。データの分散処理により多量データを集約する必要性は低下するものの、一括して分析したり、複数の分析手法を適用したりするために、計測データをそのまま集約するニーズは依然として存在する。また、各クラスタ内でのデータ収集にかかる時間も無視できない。データを高速に集約する上で特に問題となるのが、マルチホップ通信における通信速度の低下である。多数のノードが同時に通信を試みると近隣ノードの間でパケット衝突が生じ、通信速度が低下する。十分な待ち時間を確保する必要がある、マルチホップ通信での通信速度の低下をもたらす。そこで、複数の通信チャンネルを利用することでマルチホップ通信下でも通信速度の低下を招かない方法を提案する。

2. 分散データ処理

2.1. アルゴリズム

ここでは、Gaoによって提案されたDistributed Computing Strategy (DCS)⁷⁾を利用して振動計測に基づいた損傷同定アルゴリズムの分散実装を提案する。DCSはNE x T⁸⁾とERA⁹⁾によるモード解析、DLV法¹⁰⁾による損傷同定からなる。このアルゴリズムはクラスタ毎の分散モニタリングを可能にするという利点を持つ。しかしながら、DLV法はモード形の正規化が必要で、入力外力を計測する、あるいは、既知質量付加の前後で計測することで正規化する方法が提案されているものの、土木構造物モ

ニタリングへの適用には、困難が予想される。ここでは外力の計測や、既知質量の付加を必要としないSDLV法¹¹⁾を用いてDCSを拡張する。

まず、Bernalが示したDLV法¹⁰⁾について簡単に説明する。Bernalは損傷前後の構造物に同じ変形をもたらす外力下では損傷部材に応力が生じないことを示し、この外力ベクトルをDLVとした。損傷によりその部材の剛性が変化したにも関わらず、同じ入力外力に対し、同じ変形を与えるためには、この部材の応力は0である必要がある。つまり、DLV作用時に応力の生じない部材を探すことで損傷の可能性のある部材を検出できる。

損傷前後の柔性行列を $\mathbf{F}_b$ 、 $\mathbf{F}_d$ としたときに、損傷前後で変位が等しくなるような次のような外力 $\mathbf{L}$ を考える。

$$\mathbf{F}_d \mathbf{L} = \mathbf{F}_b \mathbf{L} \text{ or } \mathbf{F}_\Delta = (\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_b) \mathbf{L} = 0 \quad (1)$$

$\mathbf{F}_\Delta$ は柔性行列の変化である。このベクトル $\mathbf{L}$ がDLVである。ベクトル $\mathbf{L}$ を求めるためには次のように特異値分解を利用する。

$$\mathbf{F}_\Delta = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_0^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

ベクトルの直交性を考慮すると次式を得られる。

$$[\mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_1 \quad \mathbf{F}_\Delta \mathbf{V}_0] = [\mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \quad 0] \quad (3)$$

よって、 $\mathbf{V}_0$ が求めるベクトル $\mathbf{L}$ である。

柔性行列 $\mathbf{F}_b$ 、 $\mathbf{F}_d$ はモード解析から得られたモード形、固有振動数から推定することができる。しかし、これにはモード形を正規化する必要があり、Gao⁷⁾は、入力外力を計測する方法と、既知付加質量を与えて計測する方法を提案している。しかし、これらを土木構造物で実現することはいずれも容易でない。そこで、モード形の正規化を行わずにベクトル $\mathbf{L}$ を求める方法としてSDLV法¹¹⁾を採用する。

Bernal¹¹⁾は $\mathbf{Q}$ を

$$\mathbf{Q} = -\mathbf{C} \mathbf{A}^{-(p+1)} \mathbf{H}_p^+ \mathbf{L}_s \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \mathbf{A}^{1-p} \\ \mathbf{C} \mathbf{A}^{-p} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

と定義し、柔性行列変化の零空間は、 $\Delta \mathbf{Q}^T$ の零空間に含まれることを示した。ここで、 $\Delta \mathbf{Q}^T$ は $\mathbf{Q}$ の変化量 $\Delta \mathbf{Q}$ の転置行列である。 $\mathbf{I}$ は単位行列を、 $\mathbf{0}$ は零行列を表す。 p は、計測量が変位、

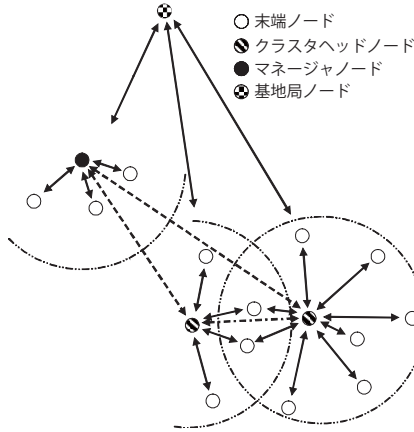


図-2 ネットワークアーキテクチャ

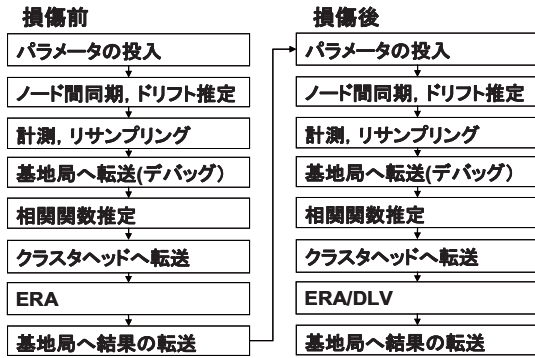


図-3 Imote2へ実装されたタスク

速度、加速度の場合にそれぞれ0, 1, 2の値をとる。システム行列 $\mathbf{A}$ 、観測行列 $\mathbf{C}$ はERAなどを用いたモード解析により求められる。 $\Delta \mathbf{Q}^T$ の零空間のベクトルとしてDLVが求められる。

Bernal¹¹⁾は複数のDLVが得られた場合に、損傷部位を特定するための指標を提案している。 q 個のDLVがある場合、 j 個目のDLVに対応する正規化応力インデックス (nsi_j) を定義する。

$$nsi_j = \frac{|\sigma_j|}{|\sigma_j|_{\max}} \quad (7)$$

重み γ_j を用いて応力インデックス (WSI) は次式のようにになる。

$$WSI = \sum_{j=1}^q \gamma_j nsi_j \quad (8)$$

損傷の可能性のある部材 (PD) は

$$PD = \{elements | WSI \leq tol\} \quad (9)$$

と求められる。 $\gamma_j=1$, $tol=0.1(WSI)_{\max}$ としている。 q は

$$q = 0.5 \left\{ \# of \gamma \text{ values } \leq 0.1 \left| \gamma = \sqrt{\frac{s_i}{(s_j)_{\max}}} \right| \right\} \quad (10)$$

である。ここで、 s_i は $\Delta \mathbf{Q}$ の特異値である。Bernal¹¹⁾はWSIにより、トラス数値モデルの損傷同定ができることを示している。

$\mathbf{Q}$ が観測行列 $\mathbf{C}$ を利用して求められることから分かるように、DLVを推定するためには、全自由度や対象構造物全体にわたっ

て計測する必要はない。ただし、DLVを計測点に外力として作用させた場合の応力変化から損傷検知を行うため、応力場を自由度高く変化させるために十分に密な外力作用点、つまり計測点が必要と言える。損傷を検知しようと着目する領域やその周辺に密な計測点が必要となる。近隣ノードがデータ共有し対象領域に関して $\mathbf{Q}$ を推定することで分散損傷評価が可能である。

2.2. スマートセンサノードへの実装と実験

スマートセンサとしてMEMSIC Imote2¹²⁾を用いる。Imote2は、振動計測のように、多量のデータを扱うアプリケーションを想定して開発されたスマートセンサノードで、MicaZなど他のスマートセンサノードと比較して、大きなRAMそしてフラッシュメモリ、高速なCPUなど、より潤沢な計算資源を特徴とする。振動解析にしばしば利用されるフーリエ変換や行列演算も可能である。センサボードはSTMicroelectronics社の3軸デジタル加速度計を利用している。

Imote2上に、同期計測、NE x T, ERA, SDLV法などを実装し、DCSを実現した。初めにノードを機能の観点から、末端ノード、クラスタヘッド、マネージャノード、基地局ノードに分類する(図-2)。全ノードは末端ノードとして機能する。末端ノードは他ノードからコマンドを受け、センシング、データ処理、確認応答などのタスクを行う。近隣ノードはクラスタを形成し、そのひとつはクラスタヘッドとなる。クラスタヘッドはクラスタ内の通信やデータ処理を管理する。複数クラスタがある場合には、クラスタヘッドも複数存在する。そのひとつはマネージャノードとなり、クラスタヘッド間の通信を管理したり、近隣クラスタが同時に通信を行いパケット衝突を防いだりする。また、センシングのように、全ノードの関与するタスクの管理もマネージャノードが行う。また、マネージャノードとクラスタヘッドは、末端ノードと基地局ノード間の中継ノードともなっている。基地局ノードは、PCとセンサネットワークの間のゲートウェイである。PCは基地局ノードを通してコマンドを送受信する。以上のようにネットワークは機能上4種類のノードから構成される。これらのノードに実装されたタスクの概略を図-3に示す。

まず、クラスタヘッド、マネージャノード、末端ノードのノードIDや計測時間などのパラメータをPCから受け取り、センサネットワークを初期化する。全てのパラメータを受け取ると、ノード間の同期を行い、計測を始める。全ノードで計測が完了するとリサンプリングにより、同期計測データを得る。ついで、相関関数の推定を行い、各クラスタヘッドへ集約される。クラスタヘッドはこの相関関数にERAを適用しモード解析を行う。損傷後にも同様の計測、モード解析を行う。

損傷前後のモード特性が得られると損傷同定を行う。まず各クラスタヘッドがそれぞれSDLV法を適用し、損傷箇所を同定する。次いで、クラスタヘッド同士が損傷部位の情報を交換する。ここで、クラスタは重なりをもつように形成され、各部材は少なくとも2クラスタにより監視される。よって損傷同定の結

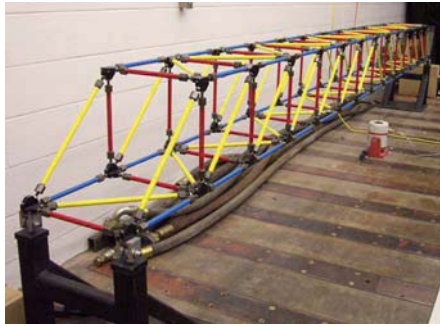


図-4 3次元トラス構造モデル

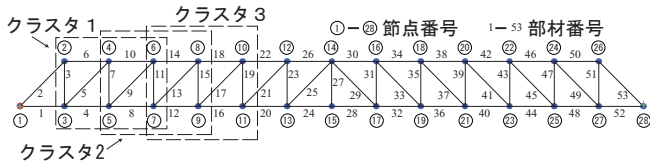


図-5 3次元トラスモデル側面図

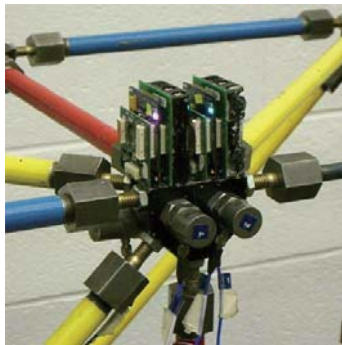


図-6 Imote2とレファレンス加速度計の設置

果を近隣のクラスタヘッド同士で交換することで、冗長性を持って損傷箇所を同定できる。隣接するクラスタヘッドが、ある部材について異なる損傷同定結果を与えた場合、互いに整合性のある結果が得られるまで、計測、モード解析、損傷同定を繰り返し行う。偽陽性、偽陰性の損傷同定結果を与えた場合も、冗長性をもたせることで損傷同定の信頼性を高めている。

(1) 実験模型

実験に用いた構造模型は、米国イリノイ大学アーバナシャンペーン校の3次元トラスモデル(図-4)である。全長5.6mで側面図は図-5のようになる。トラス部材は内径10.9mm、外径17.1mmの鋼性チューブである。このトラスにはLDS Test and Measurement Ltdの加振器V408¹²⁾を用いて鉛直外力を加えられる。なお、利用したImote2はレファレンス加速度計との比較、隣接して設置したノード同士の計測信号位相の比較を通して加速度計測精度、同期精度が明らかになっている(図-6)⁶⁾。

(2) 損傷同定実験

部材の1つを断面積が52.7%小さな部材と交換し、損傷を模擬する。加振器を節点17に設置し、5Hzから100Hzまでの帯域制限ホワイトノイズで、鉛直方向に加振する。部材置換の前後で振動計測を行い、前述のアルゴリズムによりImote2上で振動データを分散処理することで、損傷有無判定、箇所特定を行った。

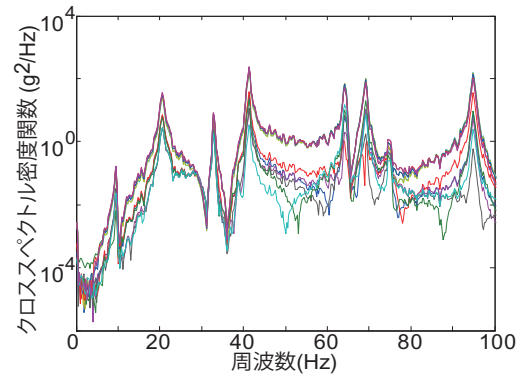


図-7 加速度応答クロススペクトルの推定

表-1 固有振動数と減衰比の同定

固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
20.7229	2.9321
32.8985	0.2127
41.2990	0.4846
64.3174	0.2422
69.1086	0.3718
94.9259	0.2810

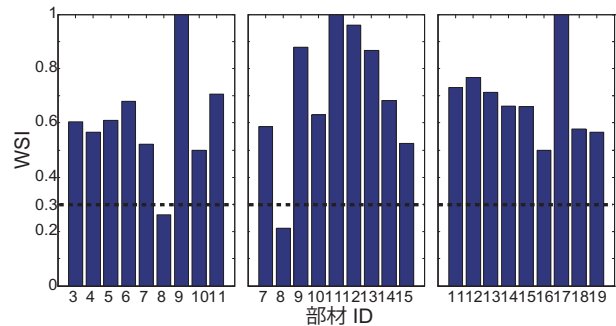


図-8 クラスタ1, 2, 3で推定されたWSI値

計測には10個のImote2を用いた。トラス前面の上下の節点にこれらのノードを設置し、6個のノードで1つのクラスタを形成、重なりを許して計3つのクラスタを形成している。利用可能なノード数の制約から、Imote2を全節点に設置することはできなかった。損傷を与える部材の位置によって、10個のノードを設置する接点を変更した。例えば、部材8の損傷同定を考える場合、節点2-11にノードを設置し、節点4, 6, 8に対応するノードがクラスタヘッドノードとなる。節点4のクラスタヘッドノードは節点2-7のノードから、節点6のノードは節点4-9のノードから、節点8のノードは節点6-11のノードから、それぞれクラスタを形成する。同様に、部材20の損傷同定を考える場合、節点6-15にノードを設置し、節点8, 10, 12のノードがクラスタヘッドノードとなる。トラス模型の前面の部材のみをモニターすることとし、橋軸方向、鉛直方向の加速度を用いる。

まず、計測データにNE x Tを適用し相互相関関数を算出した。Imote2上で相互相関関数を求めているが、計算結果を検証するため、基地局ノードを通じて、計測データおよび相関関数をPC上に集約している。Matlab上でも同じ計測データから相互相関

```

1
2 Node ID 67 RETAKE 0
3
4 ID 67 # of Damaged Element: 1
5
6 Damaged Element ID: 8
7
8
9 Node ID 81 RETAKE 0
10
11 ID 81 # of Damaged Element: 1
12
13 Damaged Element ID: 8
14
15
16 Node ID 73 RETAKE 0
17
18 ID 73 # of Damaged Element: 0

```

図-9 クラスタヘッドノードからの結果報告

関数を推定し、Imote2の計算結果と数値的に等しいことを確認している。図-7に相互相関関数に高速フーリエ変換を施して得たクロススペクトルを示す。1つのクラスタ内の6ノードの計測鉛直加速度から得られた6つのクロススペクトルである。トラスモデルの振動モードと考えられる明瞭なピークが確認できる。

次に、クラスタヘッドノードが相関関数にERAを適用した。表-1に示すように、図-7のピークに対応する固有振動数、減衰比が得られた。各クラスタヘッドノードではモード形、システム行列、観測行列、Modal Amplitude Coherenceなどのモードパラメータも同定しており、これら全ての同定量は、PCでの同定量と数値的に等しいことを確認している。

計測、相互相関関数の推定、モード特性推定をトラス部材の交換前後にそれぞれ行い、得られた固有振動数、減衰比、モード形情報を用いてSDLV法により損傷同定を行った。図-8図-9に部材8の損傷同定を行った場合のWSIを示す。クラスタ1, 2は部材8をモニタリングしており、この部材のWSIは閾値である0.3よりも小さい値となっている。この値は、Gao⁷⁾が有線センサを用いた実験やFEM解析にDLV法を適用し求めた閾値である。

最後に、各クラスタヘッドノードはクラスタ内の損傷同定結果を隣接クラスタヘッドノードと交換し、同定結果に互いに矛盾がないか確認する。図-9はクラスタヘッドノード同士が通信した後に基地局に送信した結果報告である。図中に現れるID67, 81, 73は各Imote2に固有の値で、クラスタ1, 2, 3の各クラスタヘッドノードに対応する。例えば6, 13, 18行目から、クラスタ1, 2は部材8に損傷を見つけて、クラスタ3はクラスタ内に損傷部材はないとを報告していることが分かる。この例では、隣接クラスタヘッドノードは互いに矛盾のない損傷同定結果を得ているが、矛盾のある場合には、計測、損傷同定を繰り返す。図-10図-11に示すクラスタヘッドノードからの結果報告では、1回目の計測、損傷同定でクラスタヘッドノードが互いに矛盾した結果を得て、2回目に互いに整合する同定結果を得ていることが分かる。ここでは、クラスタ3, 4, 5が部材21の損傷検出を試みている。なお、ノードID73, 135, 70はそれぞれクラスタ3, 4, 5のクラスタヘッドノードに対応する。1回目の計測、損傷同定ではクラスタ3が部材16にも損傷を報告しているが、クラスタ4は部材16は損傷していないと判断している。よって、計測、損傷同定が繰り返され、2回目には部材21にのみ損傷が同定されていることが分かる。

本システムを用いて、部材8,9,10,11,12,19,20,21,22(図-5参照)

```

1
2 Node ID 73 RETAKE 1
3 INCONSISTENT
4
5 Inconsistent Element ID: 16
6
7 ID 73 # of Damaged Element: 1
8
9 Damaged Element ID: 16
10
11
12 Node ID 135 RETAKE 1
13 INCONSISTENT
14
15 Inconsistent Element ID: 16
16
17 ID 135 # of Damaged Element: 1
18
19 Damaged Element ID: 21
20
21
22 Node ID 70 RETAKE 0
23
24 ID 70 # of Damaged Element: 1
25
26 Damaged Element ID: 21
27
28 ....
29
30 Node ID 73 RETAKE 0
31
32 ID 73 # of Damaged Element: 0
33
34
35 Node ID 135 RETAKE 0
36
37 ID 135 # of Damaged Element: 1
38
39 Damaged Element ID: 21
40
41
42 Node ID 70 RETAKE 0
43
44 ID 70 # of Damaged Element: 1
45
46 Damaged Element ID: 21
47

```

図-10 クラスタ間で損傷同定結果に不一致があった場合の結果報告

のそれぞれを断面積の小さな部材と取替え、損傷同定実験を行った。クラスタによっては擬陽性、偽陰性の同定結果が得られることもあったが、クラスタヘッドノード同士が同定結果を交換し、不一致がある場合には計測、データ処理を繰り返すことを行った結果、システムとしては擬陽性、偽陰性の損傷同定結果を与えることはなかった。

3. マルチホップ高速データ転送

3.1. アルゴリズム

データを分散処理することにより、多量データを頻繁に転送する必要は低下するものの、依然として全データを基地局に集約する、またはクラスタノードに集約することは必要である。また、構造物の物理的大きさを考慮すると基地局から全計測ノードへシングルホップで通信することは難しい。ここではマルチホップ通信により多量データを高速に集約する方法を提案する²⁾。高速化にはデータ転送プロトコルの高速化が重要でこれを提案するが、経路探索法もカスタマイズを行なっている¹³⁾。

まず、マルチホップ通信の経路選択には Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) 法をカスタマイズ利用した。AODV 法では一般に起点ノードから宛先ノード

までの1対1で経路選択することが行われる。多量データを基地局に集約するためには、全ノードが、基地局への経路を作成する必要がある。このような多対1の経路作成にAODV法は必ずしも効率的ではない。そこで、次のようなカスタマイズを行った。まず全ノードが一斉にTTL (Time To Live) が1のAODV経路要求パケット (RouteRequest) を送信する。これにより、基地局より1ホップ以内のノードは基地局からの返信 (RouteReply) を受け経路を構築する。待ち時間の後、経路未設定のノードが再びTTL-1の経路探索を開始する。既に経路探索が完了している、基地局から1ホップ以内のノードも、RouteReplyを返信する。これにより基地局から2ホップ目まで経路構築がなされる。これを繰り返すことにより1ホップ毎に順次経路が作成される。TTLを大きな値に設定する場合と比べて、RouteRequestパケットの転送回数を減少させることができる。

次に、マルチホップデータ転送に複数チャンネルを利用する。通常マルチホップ通信では、近隣のノードが同時に交信を行うと混信が生じ、交信に失敗する。欠損補償通信を行っている場合は、再送を繰り返すこととなり、通信速度が大幅に低下する。一般には混信を避けるため、近隣ノードが交信している間は送信を行わないプロトコルが用いられる。送信を行わない待ち時間のために、シングルホップ通信と比較した場合にマルチホップ通信速度は数分の1あるいはそれ以下に低下することが多い。

そこで、基地局ノードからのホップ数を基準に、各ノードに通信チャンネルを割り当て、異なる通信チャンネルを利用するもの同士は混信が生じないデータ転送を提案する。図-11のように基地局から1ホップ目にあるノードは、基地局への通信にCh0を、2ホップ目にあるノードとの通信にCh1を利用する。2ホップ目にあるノードは1ホップ目のノードとCh1を、3ホップ目のノードとCh2を利用して通信する。3ホップ目以降のノードについても同様にチャンネルを割り当てる。このようにすると、各ホップ数のノード群の内、少なくとも1つは混信なしに通信を行うことができる。なお、チャンネルの切り替え、通信相手ノードの探索に要する時間を考慮して、1パケット毎にチャンネル切り替えを行うのではなく、多量データを一括して送信するバルク転送方式を採用している。

上記のアプローチを利用する場合の通信速度は、各ホップ数に存在するノード数にも依存する。例えば、ホップ数1のノードが1つのみの場合、このノードがボトルネックとなる。ノードは送信と受信の双方を同時に行えないため、このようなネットワーク構造の場合は、シングルホップ内に全ノードが存在する場合と比較して、データ収集速度は最大でも1/2となる。しかし、ボトルネックが存在しない場合にはシングルホップのネットワークと同程度の通信速度が実現すると考えられる。

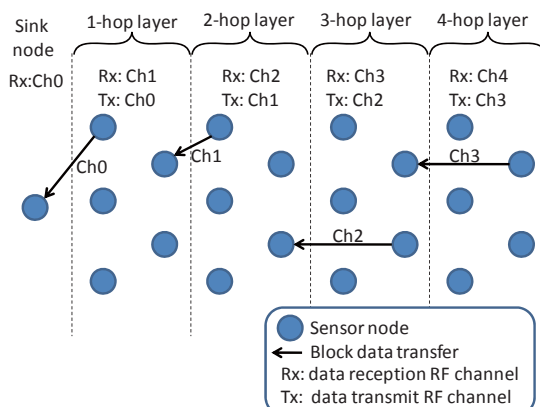


図-11 複数チャンネル割り当てを利用したマルチホップデータ転送

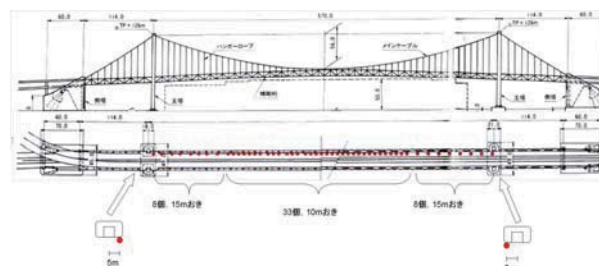


図-12 レインボーブリッジ振動計測センサ配置図

3.2. 実橋梁の計測

2010年1月に東京都のレインボーブリッジで、本システムを利用して橋桁の振動計測を行った¹⁴⁾。各ノードはImote2と3軸加速度計ボード、太陽電池、同軸ケーブル、アンテナからなり、これを49組設置した (図12)。基地局は全ノードの中間に位置するように主径間中央から15mほど西側に移動した位置に設置した。データ回収速度を向上する目的で、ここでは基地局を2つ用意し、それぞれの下に、24ノード、25ノードを配置するネットワークとしている。設置と撤去は3人で行ったがそれぞれ90分、45分で完了し無線計測の容易さを示すと言える。

ネットワーク同期の後、計測を行った。サンプリング周波数は50Hzで、6分間および24分間の計測である。各ノードは鉛直、橋軸、橋軸直角の3方向の加速度を計測している。

次いで、マルチホップ高速データ転送によりデータ回収を行った。1ノードはデータ回収に成功せず、計48ノードからそれぞれデータを回収した。24分間の計測時には各ノードから432kBのデータを回収しているが、これに要した時間は34分である。512kBのデータを64ノードから収集するのに12時間を要したゴールデンゲート橋の振動計測と比較して、10倍以上のデータ回収速度向上を実現できたと言える。

計測された加速度の一例として鉛直方向加速度パワースペクトル密度関数を図13に示す。複数の卓越する周

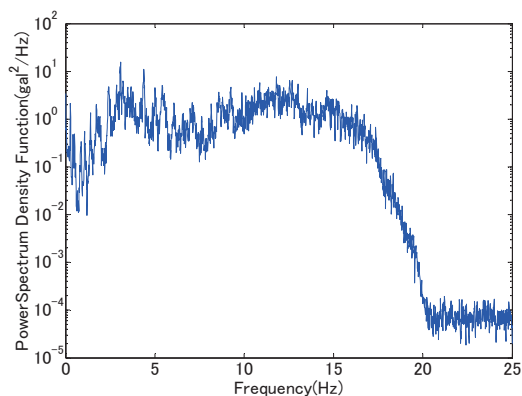


図-13 鉛直方向加速度パワースペクトル密度関数

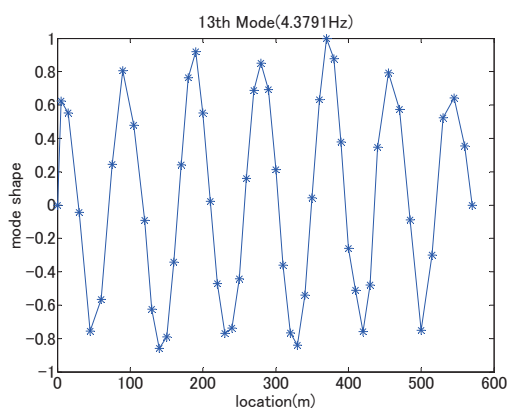


図-14 第13次鉛直たわみモード形

波数が確認できる．計測から得られた固有振動数を，供用前強制加振実験及び地震動観測のデータと比較すると，これらはよい一致を示す（表-2）．また高次モードの同定に成功しており，密な計測であるため，これらのモード系詳細も明らかになった．図-14に例として，第13次鉛直たわみモード形を示す．

4. まとめ

無線通信や MEMS などの要素技術の発展にともなって，スマートセンサを利用した構造振動計測・モニタリングの研究が盛んに行われつつあるが，無線であることのメリットを活かすためには，センサ数が多く密な計測を実現できることであると考え．多数ノードを利用した振動計測のための技術のボトルネックは，多量データの送信にかかる通信時間であり，これを解決する2つの方法を提案した．

まず，分散協調型データ処理が可能な，損傷同定のためのアルゴリズムを提案し，これをスマートセンサに実装の上，実験的に実証した．データを分散処理し，処理結果のみ基地局に送信することで，多量データ送信の必要性を低減するものである．提案したアルゴリズムは近隣のセンサノードが構成するクラスタ内のみで計測デ

表-2 本計測と過去の計測から求められた固有振動数

	本計測	供用前強制加振実験	地震動観測
1次曲げモード	0.27Hz	0.26Hz	0.26Hz
2次ねじれモード	0.71Hz	0.68Hz	0.70Hz
5次曲げモード	0.86Hz	0.84Hz	0.88Hz

ータ共有を仮定し，各クラスタが行った損傷同定結果をクラスタ間で比較することで，同定の信頼性向上を図っている．3次元トラス橋モデルを利用した実験では，部材の一部を断面積の小さなものと交換し，交換前後の振動特性をスマートセンサが計測・分析した．交換された部材位置が正しく同定され，基地局に報告されることを確認した．

次に，データ転送の速度向上のために，複数の無線チャンネルを利用したマルチホップ高速データ通信を提案し，Imote2に実装した．多数のノードが基地局に当たって同時にデータ送信を行う場合混信が生じ，通信速度が大幅に低下する．そこで，無線チャンネルが異なれば混信が生じないことを考慮して，基地局からのホップ数に応じて各ノードに無線チャンネルを割り当てることとした．無線チャンネルが異なるノードは同時に交信ができる．ネットワーク内のセンサ配置にも依存するが，基地局は少ない待ち時間で，全ノードからのデータを集約できる．本データ転送アルゴリズムをImote2に実装した上で，レインボーブリッジの主径間桁上に計49個のセンサを設置し，振動計測，データ回収を行った．データ収集は34分で完了し，既往の研究と比較して10倍以上の速度向上が確認された．また，計測されたデータからは固有振動数，モード形などの振動特性が明らかになった．特に密に計測したことにより，高次モードもそのモード形を詳細に推定することができた．

謝辞

本研究を実施するにあたり，東京都道路整備保全公社の高木千太郎様，東京都港湾局の落合和夫様に貴重なご意見を頂戴いたしました．ここに深く感謝いたします．

参考文献

- 1) Lynch, J. P. and Loh, K. : A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring, *Shock and Vibration Digest*, Vol. 38, No. 2, pp91-128, 2006.
- 2) Farrar, C. R. : Historical overview of structural health monitoring., *Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition*. Los Alamos Dynamics, NM., 2001.
- 3) Celebi, M. : Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings), Special GSA/USGS Project, an administrative report, United States Geological Survey, Menlo Park, CA. 2002.
- 4) Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., and Shevitz, D. W. : Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review, Los Alamos National Laboratory Report,

- LA-13070-MS, 1996.
- 5) Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., and Nadler B. R. : A review of structural health monitoring literature: 1996-2001” Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003.
 - 6) 長山智則, Spencer, Jr., B. F., 藤野陽三 : スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, 土木学会論文集, 65(2) pp.523-535, 2009.
 - 7) Gao, Y. and Spencer Jr, B.F. (2007). Structural health monitoring strategies for smart sensor networks, Newmark Structural Engineering Report Series, University of Illinois at Urbana-Champaign, No. 11, <http://hdl.handle.net/2142/8802>.
 - 8) Caicedo, J. M., Dyke, S. J., and Johnson, E. A. : Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 1, pp. 49-60, 2004.
 - 9) Juang, J.-N. and Pappa, R. S. : An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 8, No. 5, pp. :620-627, 1985.
 - 10) Bernal, D. : Load vectors for damage localization.” Journal of Engineering Mechanics, Vol. 128, No. 1, pp. 7-14, 2002.
 - 11) Bernal, D. : Flexibility-based damage localization from stochastic realization results, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 132, No. 6, pp. 651-658, 2006.
 - 12) LDS Test and Measurement Ltd.
<http://www.lds-group.com>
 - 13) Nagayama, T., Moinzadeh, P., Mechitov, K., Ushita, M., Makihata, N., Ieiri, M., Agha, G., Spencer, Jr., B. F., Fujino, Y., and Seo, J.-W.: Reliable multi-hop communication for structural health monitoring. Smart Structures and Systems, Int'l Journal Vol. 6 No. 5, 2010
 - 14) 牛田満士, 長山智則, 藤野陽三 : スマートセンサを用いた多点同期振動計測のためのマルチホップ通信システムの開発, 第 65 回土木学会年次学術講演会講演概要集, I -425, 2010.