

GPS 時刻同期型 MEMS センサの橋梁モニタリングへの適用

Application of GPS synchronizing MEMS sensor for bridge health monitoring

毛利 宏輔

Kosuke MORI

(指導教員 山本 亨輔)

Abstract - There are many aging bridges in Japan. Although inspections are actually carried out, it is still difficult to check all bridges at low cost. Thus, we focus on the bridge vibration, and examined the low cost inspection. GPS synchronizing MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sensor is one of the solutions. The time synchronizing performance of GPS is confirmed to be enough, by using a function of 1PPS (Pulse Per Second). The measured vibration data of an actual bridge are used to examine the vibration-based bridge evaluation. It is found that there are different responses between a light car and a heavy one. To analyze the characteristics of bridge responses, SVD (Singular Value Decomposition) is applied to estimate the mode shapes and basis coordinates. As the results, it is shown that the system characteristics such as the bending stiffness of the bridge change depending on the characteristics of loadings. It indicates non-linearity of the bridge system, and the developed MEMS sensors are able to be used to detect it.

1 はじめに

現在、日本には長さ 2m 以上の橋梁が約 70 万基存在する。そのうち 50 年が経過した橋梁は、全体の 18% であり、10 年後には約 43% に達する。経年劣化する橋梁の維持管理は喫緊の課題である。平成 24 年、道路構造物の定期点検の法定化が進み、橋梁は 5 年に一度の近接目視点検が義務付けられた¹⁾。しかし、中小スパン橋梁を多数抱える地方公共団体では、橋梁点検のために使える予算および技術者が不足している。そのため、全ての橋梁を一律に点検することは大きな負担であり、将来的には困難が予想される。

主な点検手法は目視点検である。目視点検の精度は、点検技術者の錬度に依存している。しかし、今後、老朽化橋梁の数が増加する中で、熟練技術者の確保はますます困難が予想される。したがって、点検技術者の錬度に依存しない客観的な点検手法との併用が求められる。その一つに、橋梁振動分析が挙げられる²⁾。

橋梁振動は、常時微動と交通振動に分類できる。常時微動とは、恒常的に存在する振幅の小さい振動である。常時微動を生じる外乱は、多くの場合白色性を仮定できる。したがって、計測データのパワースペクトルにおいて、卓越振動数を固有振動数の推定値とすることができる。ただし、計測時には高感度の加速度計などを用いる必要がある。一方、交通振動とは、橋梁

上を車両が通過する際に発生する振動である。交通振動はさらに、強制振動と自由振動に分類される。強制振動は常時微動に比べ振幅が大きく、損傷付近で変化を示す特徴がある³⁾。また、交通振動のパワースペクトルは主に路面凹凸に励起される車両振動の影響を強く受ける。したがって、その卓越振動数は必ずしも橋梁の固有振動数に一致しない。また、車両移動による影響で、振動数シフト⁴⁾が生じ、ピークが本来の位置から広い範囲に分かれることがある。車両通過後は自由減衰振動が生じる。多くの橋梁振動計測では、この車両通過直後の自由振動を対象とした信号分析が行われる。

橋梁振動から橋梁の健全性を評価する指標として、固有振動数のほか、モード形状が考えられる。モード形状とは、各次モードの空間的な振幅比を表したものである。クラックのような局所的に剛性低下を生じる橋梁損傷の場合、剛性の空間的分布に差が生じる。したがって、損傷付近でモード形状は変化を生じやすいと考えられる。より詳細なモード形状を推定するためには、密なセンサ配置が有効であるといえる。しかし、密なセンサ配置は高コスト化という問題を生じる。その主な要因は、センサの追加購入費に加えて、設置の労力が増すことに起因する。橋梁振動の精度改善には、多点計測が有効だが、課題として省力化が挙げられる。

そこで、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : マイクロマシン) センサの導入が考えられる。MEMS

は半導体製造技術やレーザー加工技術等、各種の微細加工技術を応用し、微小な電気要素を一つの基板上に組み込んだシステムである。MEMS 技術の活用によりセンサの小型化および低コスト化が期待できる。本研究では、GPS (Global Positioning System : 全世界測位システム) 時刻同期を用いた MEMS センサの開発に取り込んだ。GPS とは GPS 衛星から送られるデータを利用した測位システムである。GPS 衛星からは、原子時計による非常に正確な時刻データが含まれる。この時刻データに着目し、有線ケーブルを必要としない省力化された MEMS センサの開発を行う。

橋梁構造全体の健全性評価は、構造同定により実現される。加速度振動データに基づく場合の健全性評価指標として、固有振動数やモード形状、減衰などの振動モード指標、平均や分散、歪度、尖度などの統計的指標、反共振周波数、周波数応答関数、ウェーブレット係数などの利用が考えられる^[5-8]。固有振動数の推定は比較的容易であるが、損傷位置や程度などの損傷評価には向いていない。一方、モード形状は空間的な特性を把握しやすく、構造全体の状態把握に向いている^[9]。本研究ではこのモード形状に着目することとする。

対象橋梁として、中小スパン橋を考える。これは、長大橋に対して特に厳しい維持管理が行われており、安全性は高いためである。また、橋梁全体の約 80% を占めるのが中小スパン橋^[10]であるためである。中小スパン橋梁の多点計測において、従来型の有線センサを用いることは、設置費用やセンサ費用の面で経済性が低く、実用化に不利である。また、より詳細なモード形状推定のためには密なセンサ配置が望ましいという点からもそぐわない。そこで、安価な MEMS センサを使用し、現場への適用性を確保する。ただし、MEMS センサは有線式サーボ型加速度センサを用いた計測システムに比べ、精度や処理能力といった面で劣る。そのため自由振動や常時微動を計測した場合、環境外乱の影響が大きく、分析が困難になると考えられる。一方、中小スパン橋梁において、トラックやバスなどの重量車両により励起される交通振動の振幅は、環境外乱に比べ大きい。

そこで、ここでは交通振動、特に強制振動を対象とする分析手法の検討を行う。ただし、強制振動は過渡応答のため、分析時には実稼働モードに対応した手法を採用する必要がある。また、車両が橋梁に及ぼす動的外力を測定することが困難なことから、分析手法は入力未知システムに適用可能な同定手法である SVD (Singular Value Decomposition : 特異値分解) 法を採用する。

2 信号分析の理論

2.1 特異値分解について

ここでは、橋梁の多点計測により得られた振動応答のデータを特異値分解することにより、モード形状の推定を行う。

任意の $n \times m$ 行列 \mathbf{D} は、

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1)$$

の形に分解される。ここで $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ および $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ は直行行列である。また、 $\mathbf{\Sigma} \in \mathbf{R}^{n \times m}$ は次式のような、一般化された対角行列である。

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \Sigma_n & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} = [\mathbf{\Sigma}_R \quad \mathbf{0}] \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{\Sigma} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ は行列 $\mathbf{\Sigma}$ の第 n 列までを取り出した対角行列である。また、対角要素 $\Sigma_1, \dots, \Sigma_n$ は特異値で大きいものから順に並んでいるものとする^[11]。

2.2 橋梁システムのモード解析と SVD 法

多点計測で得られた振動応答データを

$$\mathbf{Y} = [y(t_0) \ y(t_1) \ \cdots \ y(t_N)] \quad (4)$$

と行列化する。SVD 法を適用すると、式(5)のようにモード形状 \mathbf{A} と基準座標データ \mathbf{Q} の推定値が得られる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \mathbf{A}\mathbf{Q} \quad (5)$$

SVD 法では、基準座標である $\mathbf{Q} (= \mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T)$ の無相関性が成り立つとき、正確にモード分解が可能である。

3 MEMS センサの開発

3.1 MEMS センサの満たすべき性能

中小スパン橋は交通振動の影響を強く受ける。降雨通信同は 1~2t 程度の乗用車から 10t 以上のトラック、バスなどの大型車まで様々である。したがって、対象とするレンジも広範囲をカバーする必要がある。大きな振動を対象にしつつ、分解能を引き下げると小さな振動が正確に捉えきれない可能性がある。よって、高い分解能を持つ AD コンバータを実装することが有効である。

中小スパン橋とは、スパン長が 100m 以下の橋梁を指す。今、多数のセンサを橋梁上に設置することを考えると、有線式の場合、センサ数だけ数十 m 長のケー

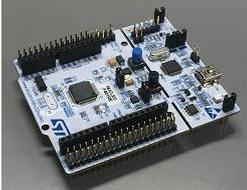
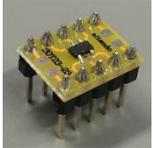
ブルを用いる必要がある。ケーブル設置の労力が大きく、無線での通信が望ましい。しかし、無線通信は、通行する車両などが障害物となり、データ欠損が避けられない。そこで、データ転送はリアルタイムで行わず、計測終了後にデータを記録した SD カードを回収する方法を取る。それぞれのデータは GPS による時刻情報を基準に同期を行う。このように構成を必要最小限にすることで、誰でも容易かつ低コストに製作可能となる。

3.2 MEMS センサのシステム構成

MEMS センサによる橋梁振動計測の普及を促す目的から、全ての部品は規格化された市販品を用いる。

使用した部品は表 1 の通りである。また開発した MEMS センサを図 1 に示す。これらを実装した省力化された MEMS センサは、時刻同期のため GPS モジュールを搭載している。無線による時刻同期およびデータ転送は、データ欠損の可能性を考慮し、採用していない。MEMS センサ全体を制御するマイコンとして Nucleo-F401RE を用いた。本製品は規定クロック値 16MHz の CPU を搭載している。USB ケーブルを用いて PC と接続することで電源供給を受けつつ、PC とのシリアル通信を可能にした。最終的に、PC と独立した動作性能を確保する予定である。また、本来の目的を達成するため、SD カードへの書き込みも行っているが、今回の検討において、安定性に関する課題が確認

表 1 使用した MEMS センサ部品一覧

商品名	外観	基本性能	説明
STM32 Nucleo Board F401RE		ST マイクロ社製マイコンボード。ARM 社製 32bit Cortex-M484MHz 搭載。多数の入出力ピン、USB コネクタを持つ。初期設定での動作クロック数は 16MHz。	mbed との互換性があり、オンライン上の開発環境が利用できる。PC から電源供給を受け、SPI 通信を行う。AD コンバータとはシリアル通信を行う。
KXR94-2050		Kinonix 社製 3 軸加速度センサをピン変換基盤に実装。計測レンジは±2G。アナログ出力のため、別途、AD コンバータを必要とする。	3 軸方向での測定が可能であるが、本研究では z 軸鉛直方向のみを使用。
ADS1220		TEXAS INSTRUMENTS 社製 AD コンバータをピン変換基盤に実装。分解能 24bit。	電源電圧により分解幅が変わるため、安定した電源が必要。
ADP150		Mouser Electronics 社製、LDO リニアレギュレータ。入力電圧 2.2V~5.5V で動作し、出力電流は最大 150mA。	PC の出力電圧 5V を、AD コンバータの電源電圧となる 3.3V へと変換する際に使用する。
Adafruit Ultimate GPS Breakout		感度-165dBm、更新レート最大 10Hz。パルス数/毎秒の出力。	1 秒ごとに送信されるパルス波を用いて時刻同期を行う。
マイクロ SD カードスロット DIP 化キット		microSD カードスロットを 2.54mm ピッチに変換。	メモリーカードを搭載するためのカードスロット。
HIDISC microSD		磁気研究所製、microSD。容量 2GB。通信速度 speedy。	MEMS センサにより取得したデータを記録する。

された。詳細については 3.3 で述べる。

加速度センサには KXR94-2050 を採用した。測定レンジは $\pm 2G$ 、電源電圧 3.3V のとき測定振幅 660mV/G である。この加速度センサは 3 軸方向の測定が可能であるが、本検討では z 軸鉛直方向のみを利用している。AD コンバータには ADS1220 を採用した。分解能は 24bit である。3.1 で述べたように、大きな振動を対象にしつつ、小さな振動をとらえるためには、この分解能が必要である。Nucleo の標準 AD コンバータは分解能が 12bit であることから用いることができない。変換速度は 330SPS(Sample Per Second)に設定した。

加速度センサは電源電圧により出力振幅とオフセット電圧が変化する。また、AD コンバータも電源電圧を基準として分解幅が決まる。そのため、精度の高い測定にはノイズの少ない安定した電源が必要である。そこでリニアレギュレータ ADP150 を用いて安定電源を確保した。

複数の独立した MEMS センサの時刻同期を行うため、GPS を利用した。GPS モジュール GMS6-CR6 と Adafruit Ultimate GPS Breakout の二種類を用意し、3.3 で述べる検証を行った後、後者を採用した。

3.3 GPS による時刻同期方法とその検証

有線ケーブル設置の労力を削減するために、GPS 情報を用いた時刻同期を行う。GPS による時刻同期性能を確認するために以下の検証を行った。

(検証 1 加速度センサ共有・GPS 時刻同期)

GPS モジュール内で計算処理され、出力された時刻

情報を基準に、2つの MEMS センサの時刻同期を行った。結果を図 2 に示す。この検証において、加速度センサは MEMS センサ 2 つに共有されている (図 3)。これは、加速度センサを、同一波形を出力するデバイスとみなしているためである。サンプリング周波数は 300Hz とした。

図 2 (b) からふたつの波形が一致せず、800ms 程度のズレが生じていることが分かる。一方で、同測定内でのズレは常に等しいことが確認された。したがってハードウェア的問題ではないことが確認される。

(検証 2 時刻処理計算によるズレ)

次に、GPS モジュールが出力する時刻を計測した。これを図 4 に示す。図から正確に 1 秒毎に出力されていないことがわかる。これは GPS モジュール内で計算処理を行う際に発生する誤差が原因となっている。したがって、より正確に時刻同期を行うために、GPS モ

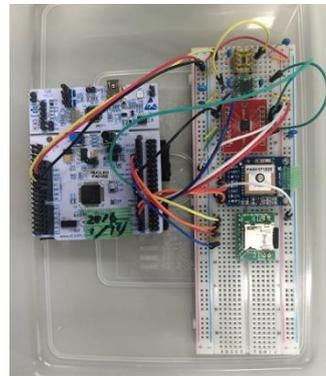


図 1 MEMS センサ

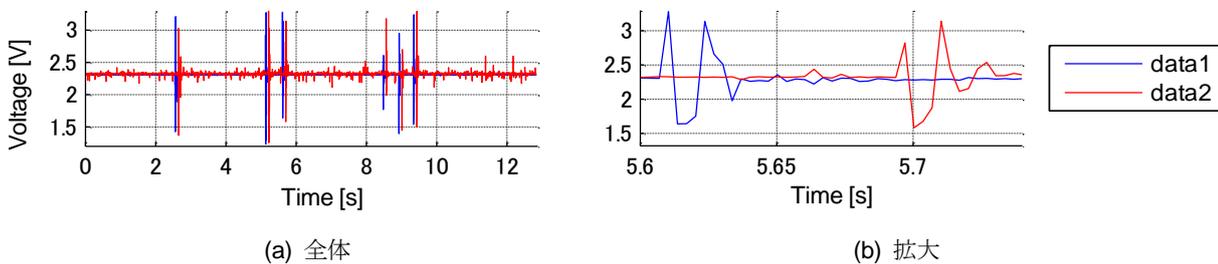


図 2 GPS 時刻同期

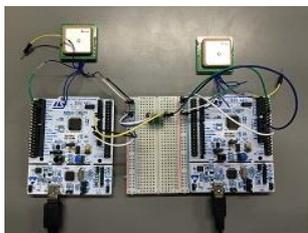


図 3 MEMS センサ

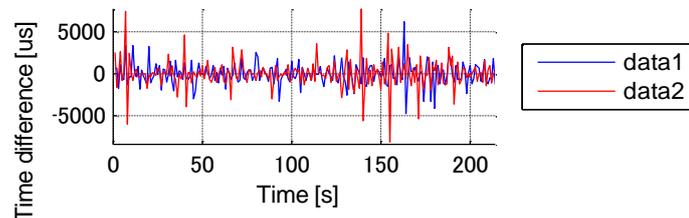


図 4 GPS 時刻出力誤差

ジュール内で計算処理を行う前段階で信号を取得する手法が考えられる。異なる GPS モジュール Adafruit Ultimate GPS Breakout には計算処理を行う以前にパルスを 1 秒毎に出力する機能 (1Pulse Per Second) が存在する。以下ではその機能によって時刻同期を行うこととする。

(検証 3 加速度センサ共有・GPS パルス時刻同期)

新たに採用した GPS モジュール Adafruit Ultimate GPS Breakout の持つ PPS 機能を用いて、同期性能の検証を行った。検証 1 と同様に加速度センサを、同波形を出力するデバイスとみなし、4 つの MEMS センサの時刻同期を行う。サンプリング周波数は 300Hz とした。GPS パルスで時刻同期をはかるが、GPS パルスのみでは時刻情報が得られないため、GPS モジュールの出力する時刻情報を参照する。また、計測を開始するタイミングが異なるため、加速度を取得するタイミングが

異なっている。そこで、スプライン補間を用いて内挿によるプロット補正を行った。結果を図 5 に示す。結果より、十分な時刻同期性能が得られたことが確認できる。

(検証 4 加速度センサ非共有・GPS パルス時刻同期)

次に加速度センサを共有せず、独立した MEMS センサで検証を行う。ボード上に、下端から各加速度センサまでの長さが等しくなるよう設置した。その様子を図 6 に示す。図 7 に示した方法で、すべての加速度センサが鉛直方向に同様の加速度が加わるよう加振した。結果を図 8 に示す。

検証 2 と同様に、十分な時刻同期性能が得られたことが確認できた。したがって、独立した MEMS センサの時刻同期が可能になったといえる。また、振幅がほぼ同じであることから、校正係数 (mV/G) もほぼ同じであると考えることとする。

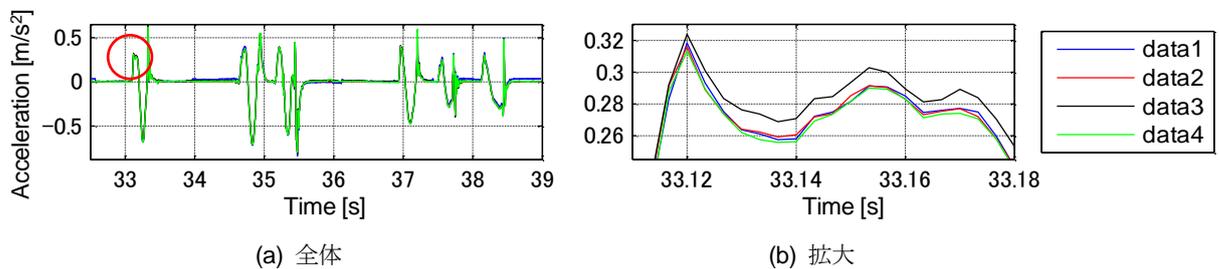


図 5 加速度センサ共有・GPS 時刻同期



図 6 MEMS センサ設置の様子



図 7 加振の様子

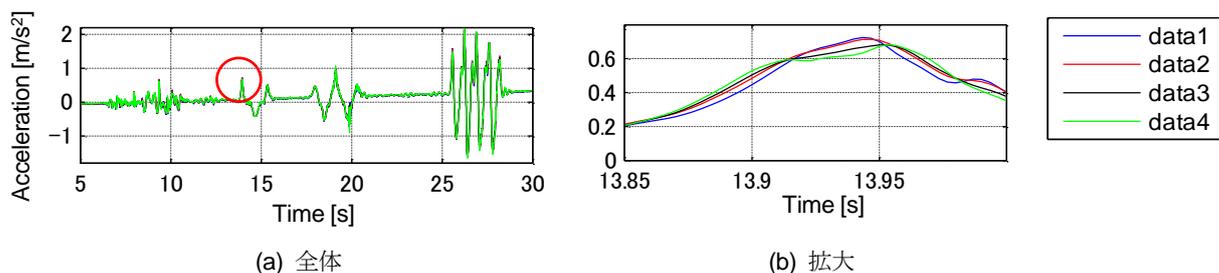


図 8 加速度センサ非共有・GPS 時刻同期

3.4 安定動作

この MEMS センサでは、

- ① 加速度の取得
- ② GPS パルスの取得
- ③ 取得データの SD カードへの書き込み

の処理を行う。これらを安定して動作させるために、以下を検証した。

加速度は、マイコンがある処理を行っていても、サンプリング周波数ごとに加速度を取得する必要がある。そのため繰り返しタイマー割り込みを用いた。

GPS パルスは極めて正確に 1 秒毎に出力される。しかし、パルス信号は立ち上がりから立下りまで一定の時間幅を持っている。そのためピン変化割り込みを用いて割り込みをかけ、パルスが立ち上がった瞬間のマイコン時間を読み込んだ。

SD カード内のフラッシュメモリは書き込みを繰り返すことで劣化する。したがって書き込み頻度の低減が求められる。そこで、加速度、起動からのマイコン時間、GPS パルス取得時間を構造体として一つにまとめる。そして構造体にすべてデータが格納された後に書き込みを行うという処理方法を用いた。一方で、SD カードへの書き込みを行っている間も、データを取得する必要がある。そこで、構造体を複数用意し、データを書き込んでいる間に、別の構造体にデータを格納することとした。

周波数 300Hz で MEMS センサを動作させると、SD カードへの書き込み処理中にエラーが発生し、プログラムが停止した。また、このエラーが発生する時間、

エラー発生位置は試験ごとに変化した。この原因解明のために以下の検証を行った。結果を表 2 に示す。

(検証 5 SD カードとスロットの変更)

三種類の SD カードと二種類の SD カードスロットを用意した。これらを変更し、発生するエラーを確認する。microSD を使用した場合、書き込み速度、容量ともに大きなものに変更しても同様のエラーが発生した。したがって microSD の性能によるエラーではないことが分かる。次に SD カードスロットを変更し、同様の検証を行った。すると、プログラムが停止することなく指定時間で終了した。しかし、保存されたデータは書き込み中に文字化けを起こした。その後数データ分のみを記録し、それ以降のデータは欠落していた。つまり、エラーの発生要因はカードスロットによるものであると分かる。

(検証 6 データ取得周波数と成功数ヒストグラム)

この MEMS センサはデータの取得、通信、保存をひとつの CPU で行っている。そのため SD カードへの書き込み処理能力が低下し、エラーが発生した可能性がある。そこで、次にサンプリング周波数を下げることによって、CPU の負荷低下を試み、安定性を検証した。図 9 に示すヒストグラムは、サンプリング周波数 300Hz、200Hz、115Hz、100Hz で行い、プログラム停止時間の頻度をとったものである。周波数を下げていくとヒストグラムは右方向に推移した。そして 100Hz 時にはプログラムが停止することなく正常に書き込まれた。このことからサンプリング周波数が高い場合、マイコンにかかる負荷が大きく、処理が停止したことがわかる。

表 2 SD カードとスロットの組み合わせによるエラー検証

カードスロット	SD カード・メディア (転送速度/容量)		
	KINGMAX 製 SDHC Class6/16GB	磁気研究所製 SD カード speedy/2GB	SanDisk 社製 SD カード Class10/16GB
			
microSD カード用		書き込み停止	書き込み停止
			
SD カード用	文字化け	文字化け	文字化け

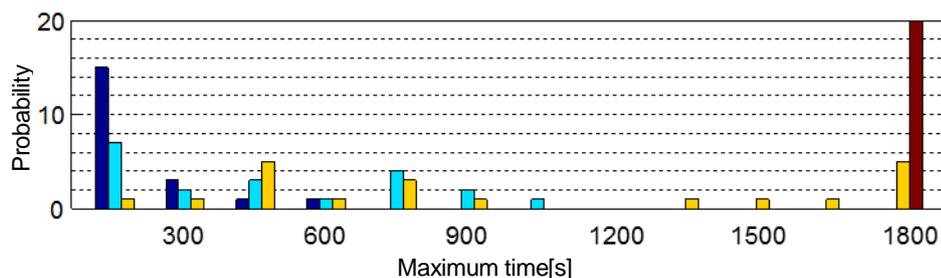


図9 SDカード書き込み成功時間とその頻度



図10 松見橋



図11 設置の様子

4 適用検証

4.1 実験概要

実橋梁計測は、茨城県道 24 号線に架かる、筑波大学学内道路かえで通り内の陸橋である松見橋（図 10）にて行った。設置の様子を図 11 に示す。松見橋は全長 31m の箱桁橋である。平面図と縦断図を図 12 に示す。加速度センサのノイズの原因として風があげられるため、MEMS センサをボックス内に入れ、風を防いだ。図 12 中に示された赤点の位置に、両面テープを用いて固定した。計測した橋梁振動は、一般車両の通行による交通振動である。

4.2 結果

得られた橋梁振動を図 13 に示す。また、加速度のフーリエスペクトルを図 14 に示す。そして、加速度波形から、軽い車両が通過した際の波形、重い車両が通過した際の波形を一つずつ抽出する。そしてそれぞれに分析手法を適用した図を以下に示す。

図 15 に軽い車両が通過した際の加速データ、図 16 にそのフーリエスペクトルを示す。図 16 から、1 次

卓越振動数が約 5Hz に現れていることがわかり、さらに、2 次の卓越振動数が約 15Hz 付近に発生していることがわかる。図 17 に SVD 法により推定したモード形状を、図 18 に推定した基準座標に対してフーリエ変換を行ったものを示す。図 17 では、推定モード形状が卓越した順に、たわみ 1 次モード、たわみ 2 次モード、ねじり 2 次モード、ねじり 1 次モードであることが確認される。また、図 18 では、元のスペクトルから、卓越する周波数がやや変化した。

次に、重い車両が通過した際の加速度データを図 19 に、そのフーリエスペクトルを図 20 に示す。センサ 1、センサ 2 では 10Hz で非常に強いピークが現れた。一方、センサ 3、センサ 4 では強いピークが現れていない。図 21 に SVD 法により推定したモード形状を、図 22 に推定した基準座標に対してフーリエ変換を行ったものを示す。1 次卓越モード、2 次卓越モードでは、振幅が非常に小さい点が現れている。基準座標スペクトルは 1 次卓越、2 次卓越の基準座標スペクトルは元のスペクトルに比べ、変化があまり無いものの、3 次卓越、4 次卓越の基準座標スペクトルは大きく広がりを見せた。

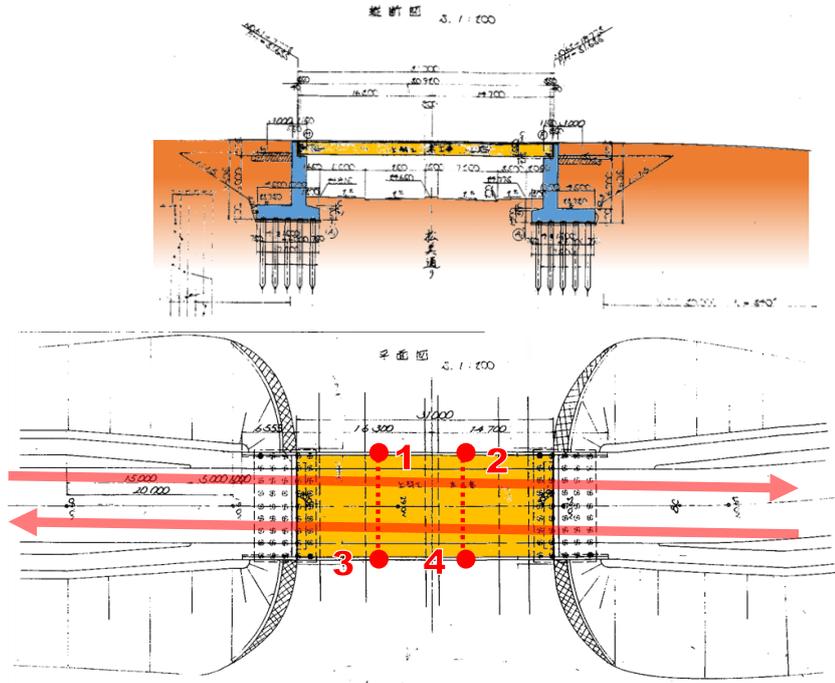


図 12 松見橋平面図・断面図

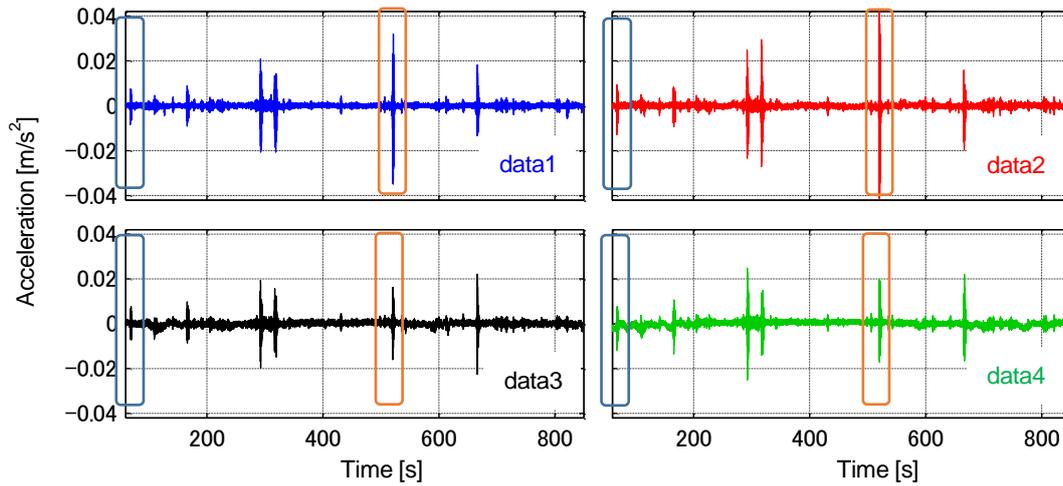


図 13 橋梁振動加速度データ

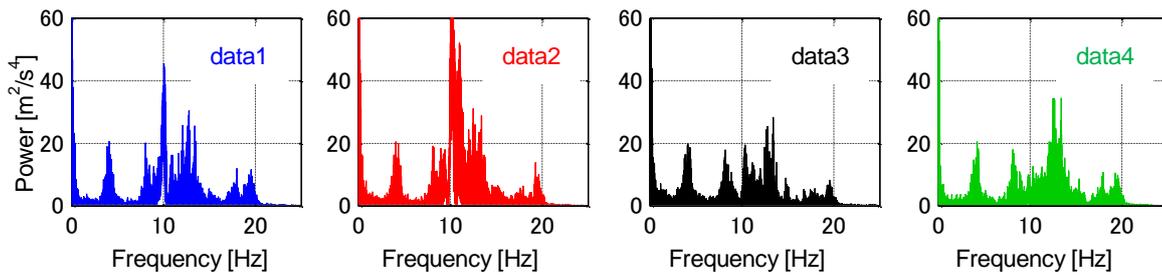


図 14 加速度波形全体のフーリエスペクトル

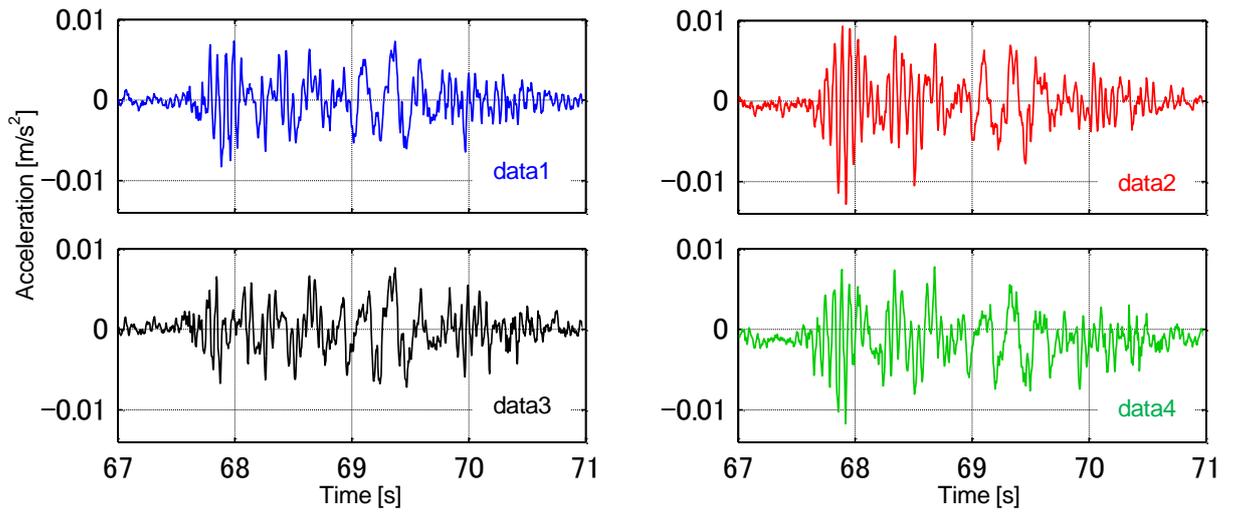


図 15 軽い車両通行時の加速度データ

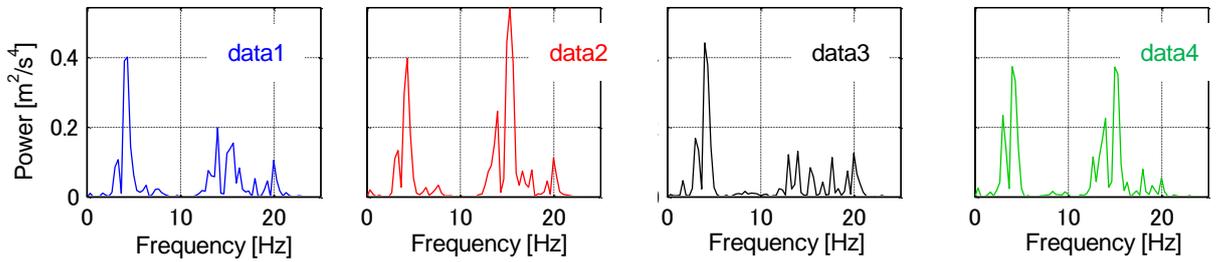


図 16 軽い車両通行時の推定モード形状

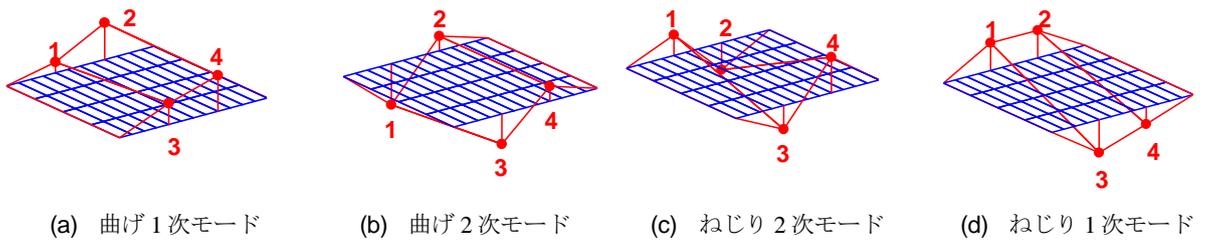


図 17 軽い車両通行時の推定モード形状

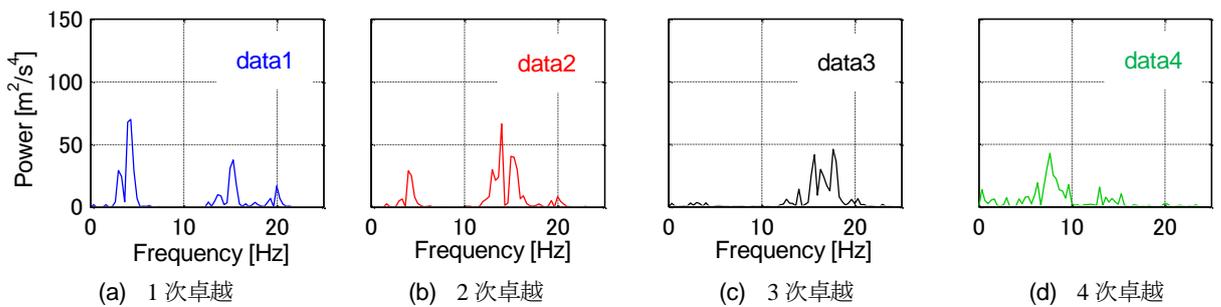


図 18 軽い車両通行時の基準座標スペクトル

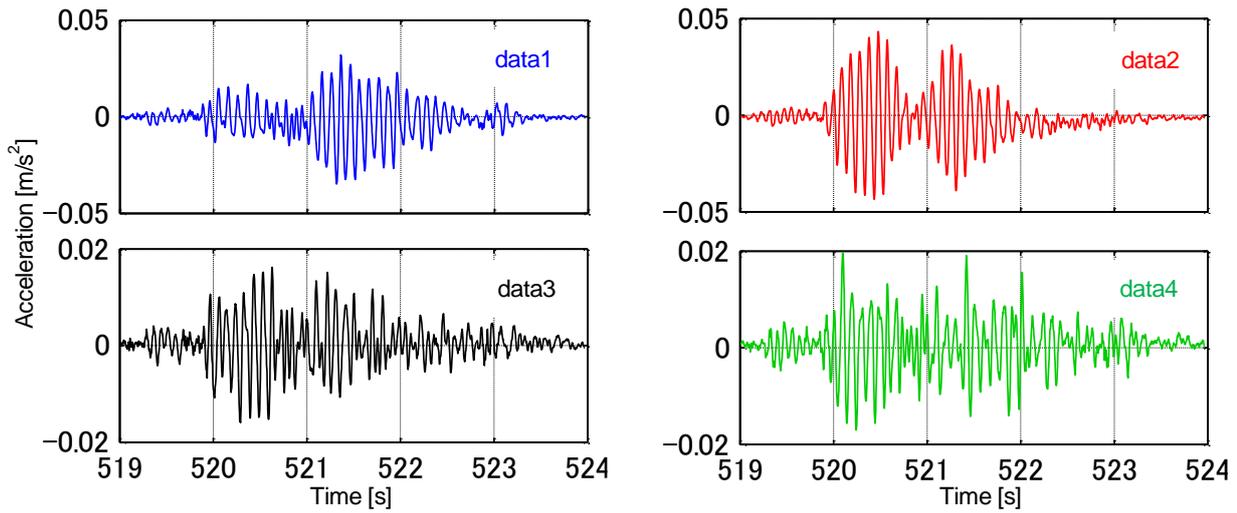


図 19 重い車両通行時の加速度データ

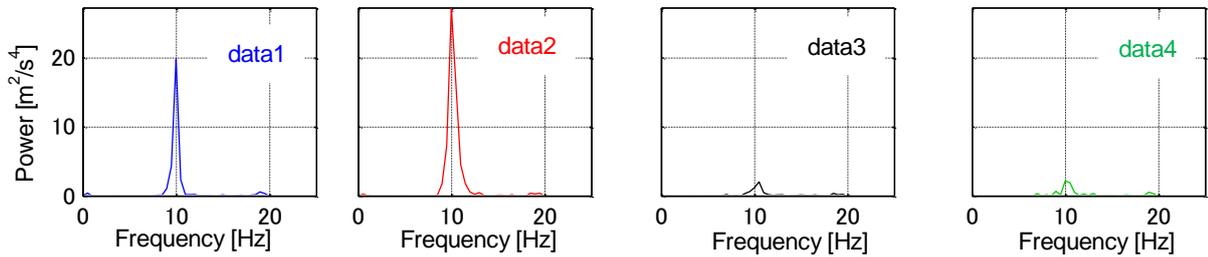
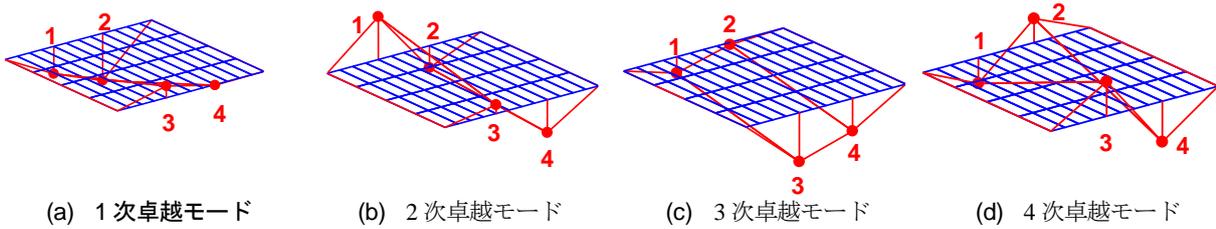


図 20 重い車両通行時のフーリエスペクトル



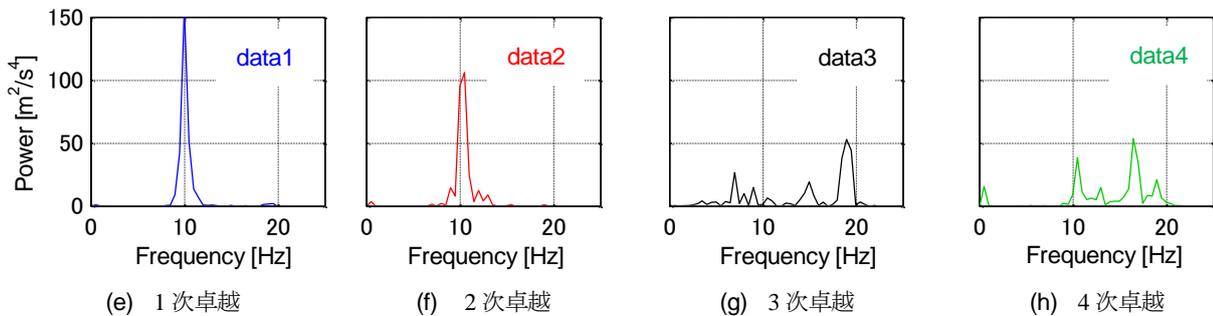
(a) 1次卓越モード

(b) 2次卓越モード

(c) 3次卓越モード

(d) 4次卓越モード

図 21 重い車両通行時の推定モード形状



(e) 1次卓越

(f) 2次卓越

(g) 3次卓越

(h) 4次卓越

図 22 重い車両通行時の基準座標スペクトル

4.3 考察

図 16 で現れた 4Hz 付近の卓越振動数は、橋梁の 1 次固有振動数と一致している。そのため、軽い車両通行時には、橋梁の影響が強く現れると考える。また、各スペクトルで見られるピークに分かれている現象には、以下の二つが理由として挙げられる。ひとつは、モード形状が近接し、お互いの振動数が作用したこと。もうひとつは、橋梁上を走行する車両による振動数シフトだと考えられる。

一方、重い車両の通過時には 10Hz で振動数が卓越し、軽い車両で現れたような橋梁の固有振動数の影響がなかった。これは、荷重が大きいために、車両振動が橋梁振動を決定したと考えられる。この車両振動は路面凹凸により励起されるもので、橋梁の出入口に存在するジョイント部分によるものと推察する。

通過する車両によって、つまり、橋梁にかかる荷重が変化することによって現れる振動が、外力と剛性の関係式から導かれるものとは異なった。また、荷重が大きい場合、推定されたモード形状は橋梁損傷が存在する場合のものに類似する。これらのことから、橋梁の剛性低下が発生している可能性が考えられる。しかし、断定するためには更なる検証が必要である。

5 まとめ

本研究では MEMS センサの開発を行った。また、実橋梁計測により得られた加速度データに SVD 法を適用し、モード形状、基準座標の推定を行った。以下に本研究の結論をまとめる。

- (1) 加速度の取得から SD カードへの書き込みまで、MEMS センサの安定動作を得るために各条件での検証を行い、安定性能を確認した。
- (2) GPS モジュールから出力されるパルス信号を用いて、独立した MEMS センサの時刻同期を可能とした。
- (3) 実橋梁計測により得られた加速度データのフーリエスペクトルを求めたところ、軽い車両に励起される振動は、橋梁システムの影響を強く受けることが分かった。一方、重い車両の振動に励起される振動は、車両の振動数の影響を強く受けることが分かった。
- (4) 外力の変化によって、卓越する振動数が大きく変

化した。また、推定モード形状も橋梁損傷時に現れるモード形状に類似した。しかし、損傷と断定することは難しく、更なる検証を必要とする。

MEMS センサの開発によって、大きい振幅から小さい振幅まで、多様な交通振動を安価に計測することを可能にした。また振動分析への適用性もあり、今後の可能性が大きく広がったといえる。MEMS センサは SD カードへの書き込み、基盤への実装など解決できる点も多く、より一層の性能向上を目指したい。また、4 点以上での多点計測を行い、より詳細な分析を予定している。

参考文献

- [1] 国土交通省：道路の老朽化対策の取り組み
- [2] 山本亨輔,伊勢本遼,大島義信,杉浦邦征：鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響 構造工学論文集 A,Vol.58A,pp180-193,2012
- [3] 山本亨輔,大島義信,金哲佑,杉浦邦征：車両応答の時間周波数解析に基づく橋梁の損傷検知法 土木工学論文集 A,Vol.57A,pp637-645
- [4] Y.B. Yang, K.C. Chang: Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique, Journal of Sound and Vibration, Vol.322, pp.718-739, 2009.
- [5] 加藤雅史,島田静雄：橋梁実測振動特性の統計解析,土木学会論文報告集第 311 号,pp49-58,1981
- [6] 西村昭,藤井学,宮本文穂,加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性,土木学会論文集,第 380 号,I-7,pp355-364,1987
- [7] 渡辺拓郎,西尾真由子,勝地弘,山田均,風応答データの非線形性抽出による長大橋モニタリング,
- [8] 岡林隆敏,奥松俊博,中宮義貴：常時微動に基づく AR モデルによる構造物振動数の高精度自動推定,土木学会論文集,No.759/I-67,pp271-282,2004
- [9] 浅川一樹：MEMS 利用による交通振動計測の可能性検証,筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文,2015
- [10] 国土交通省,道路統計年報 2015 橋梁の現況,表 63,橋長階級区分別,都道府県別橋梁の現況,合計,2015
- [11] 山本亨輔,大島義信,杉浦邦征,河野広隆：車両応答に基づく橋梁のモード形状推定法 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学),Vol.67,No.2,pp246,2011

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導をいただきました山本亨輔先生と松島亘志先生に深謝いたします。また、MEMS センサ開発に多くのアドバイスをいただいた株式会社 BeeBeans Technologies の浅井康裕様、和田正樹様、石綿将邦様、綿谷透様に深くお礼申し上げます。日々の生活から研究までお世話になったフロンティア工学研究グループの方々、そしていつも支えてくれた家族に心より感謝いたします。