

氏名	SHRESTHA ASHISH		
博士の専攻分野の名称	博士（学術）		
学位記号番号	博理工甲第 1133 号		
学位授与年月日	平成 31 年 3 月 20 日		
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	Smart Device based Systems for Autonomous and Low-Cost Structural Measurement and Monitoring (スマートデバイスを用いた構造物の自動計測およびモニタリングシステム)		
論文審査委員	委員長	教授	奥井 義昭
	委員	教授	松本 泰尚
	委員	教授	齊藤 正人
	委員	教授	牧 剛史

## 論文の内容の要旨

In this study, a structural seismic monitoring system based on smart devices was proposed and the effectiveness of this was verified through shaking table tests and practical use to seismic response and real bridge tests. The development of a low cost yet computationally capable system using smartphones' build-in sensors is the goal of this research work. By allowing smart devices to participate in vibration sensing and monitoring, the proposed system can provide dense array of strong ground motion monitoring. The recorded data of this system can facilitate studies which lead to improved understanding of a mechanism of damage in structures, during a large earthquake.

Measurement application programs for acceleration and displacement were developed for iOS devices. The viability and accuracy of built-in MEMS accelerometer sensors on the smart devices was confirmed by a series of shaking-table tests involving sinusoidal excitations and scaled ground-motion excitations, and the implementation feasibility of long-term bridge health monitoring was verified with on-site measurement at the Takamatsu Bridge located in Miyazaki, Japan. The test results showed that smart device-based monitoring is feasible for long term monitoring. The feasibility of the system can be concluded based on the following major key points:

- a) Pink-noise is observed in smart devices recorded accelerometer data. It results in overestimation of the amplitude at low frequency. However, the difference from a high-precision measuring device was small, and the predominant frequency could be identified clearly in the frequency range 0.5-10 Hz. The pink-noise will not affect the practical use very much especially for monitoring seismic events, which has been proved through earthquake-input shaking-table tests.
- b) The possible sampling rate is under 100 Hz. Though the sampling rate is unstable, the data array can be resampled by linear interpolation from raw data.
- c) The trigger function to a designated acceleration level is easy to practice. This means that the trigger command can be sent to other devices simultaneously once a device is triggered. This fundamental function makes the sensors acting

as a group through a wireless network.

- d) The data acquisition to a cloud server has been realized to be stable. There was no data loss happened during the long-term continuous measurement for more than a year.
- e) Dynamic properties extracted from data recorded by smart-devices were compared with those from a high-accuracy sensor. The usability of the smart-device based system was verified with a reasonable level of accuracy.

The task of measuring real time displacement response was conducted by developing measuring application for three different methods of image processing: motion detection, corner tracking and QR code tracking. In order to fully utilize the GPU capabilities of smart devices, the GPUImage library was used in developing the iOS applications for motion detection and corner tracking method. Onboard calibration of the image pixel size to a given-dimension target was implemented in the developed iOS applications. All the functions required for measuring the displacements of the target could successfully be operated in real time. Comprehensive experiments, including shaking table tests and a bridge field tests, were conducted to evaluate its performance. The following conclusions can be made:

- a) The test results showed that motion detection method is highly sensitive to background noise. The corner tracking method though being robust, is very easy to be influenced by background corner features. Nevertheless, the QR code tracking method is highly robust to background noise, and consequently has more practical applications than motion detection and corner tracking methods. Therefore, detailed laboratory shaking table tests and field tests were conducted only for the QR code tracking method.
- b) From the shaking table tests, it was also confirmed that the QR code tracking method used in the current study could be applied effectively for long-period displacement measurement (frequency under 1.0 Hz). However, for displacement measurement with high frequency components, an improved version of the QR code tracking method was implemented and verified.
- c) In realistic field environments, the performance of the proposed method is confirmed through long-term field tests of a road bridge subjected to temperature change and traffic loading. No data loss occurred during the measurement and the long-term displacement characteristics computed with smart-device based system showed a reasonable level of accuracy as compared to the high precision reference system.
- d) The practical considerations and limitations of the proposed system including inconsistent sampling rate, and changing on-site illumination conditions was discussed. The improved method, although being robust in terms of dynamic displacement measurement, was seen to be computationally expensive. Processing larger resolution images to yield higher accuracy resulted in low output sampling rate. Nevertheless, a dynamic crop filter was added to the improved method, which resulted in significant improvement in the sampling frequency performance without compromising the accuracy of measurement. Experimental verification showed that this method is robust in dynamic displacement measurement.
- e) Future work should include improving the accuracy and stability of the system, particularly in natural light environment and adopting more computationally efficient methods to track moving objects.

## 論文の審査結果の要旨

兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震などの大地震における橋梁などの構造物の損傷に関する知見に基づき、日本の耐震設計は今まで大きく発展した。しかし、構造物の破壊原因の究明やこれまでの耐震設計法の検証には、実橋梁で実地震被害時の記録データが不可欠である。橋梁等の構造物に加速度計や地震計などのヘルスマニタリングシステムを配置し、常時の振動や地震動などを観測するシステムは過去にも数多く開発されている。これらのシステムでは、センサー、データロガー、PCなどで構成されているものが一般的であり、安定した外部電源、通信回線およびその設置工事が必須であり、初期費用、維持費用ともに高く、長期間かつ幅広く応用することが難しい。長期的な視点から、橋梁等の地震応答を観測し、多くの貴重な地震応答データを取得するためには、安価で維持しやすい観測デバイスが不可欠である。

2007年から急速な普及を果たしたスマートデバイスには、加速度計やGPSなどの小型電子計測用装置(MEMS)が搭載されており、従来は高価であったMEMSが安くなるとともに、高性能製品の開発と汎用化が急速に進展している。本学位論文では、橋梁の地震観測を安価に実現できる手法の検討を目的として、スマートデバイスに内蔵したMEMSセンサーや高性能カメラを用いた構造物の地震時の加速度計測、動的変位計測手法を開発し、小型振動台実験や実橋計測により開発した手法の検証を行っている。

本学位論文では、第1章の序論、第2章のスマートデバイスアプリケーションによる観測システムの構築、第3章の加速度計測手法の開発およびその検証実験、第4章の画像変位計測システムの開発、第5章の深層学習を用いた橋梁振動状態の自動認識手法の検討、ならびに第6章の結論と考察で構成されている。

第1章は、近年の地震被害の教訓から高密度地震観測の重要性や、スマートデバイスを用いた簡易な地震観測手法に関する国内外の研究動向を考察している。スマートデバイスを用いた既往の振動計測に関する研究では、ノイズレベルやサンプリング可能な周波数などに関する定量的評価が少ない。このような背景から、本研究の工学的意義や研究の目的を説明している。

第2章では、モニタリングシステムを構築するために、スマートデバイスを用いた振動計測や画像計測アプリの開発について概説している。開発したアプリにおいては、スマートデバイスに内蔵したセンサーから、データの取得や保存などの基本機能を実現した上で、クラウドサーバーを利用したデータ同期機能も備えている。

第3章では、スマートデバイスの内蔵加速度センサーを用い、構造地震モニタリング手法を検討する。振動を連続的に記録するモニタリング機能やトリガーされる場合のみ記録する強震計機能を実装した計測アプリを説明している。スマートデバイスで構築されたモニタリングシステムの有効性を検証するため、振動台実験を実施し、加速度ノイズレベル、構造物の周波数同定における誤差を定量的に評価している。次に、2016年熊本地震直後に宮崎県にある橋にスマートフォン地震計を設置し、1年半に渡って行った橋梁の地震時観測およびその結果を説明している。

第4章では、免震ゴム支承などの地震時変位をモニタリングするために、スマートフォンのデジタルカメラを利用した画像計測手法を検討している。開発された画像計測アプリの性能を評価するため、振動台実験および実橋における24時間観測を行っている。さらに、追跡目標の周辺領域のみを走査するクロプフィルター手法や、クロプ領域を動的に更新する手法の適用によって変位計測の動的性能向上を検討している。

第5章では、計測された加速度波形から、橋の振動状態を自動的に認識する手法を検討している。本学位論文では、画像認識分野で高い精度を実現した畳み込みニューラルネットワーク(CNN)、すなわち深層学習を適用している。スマートフォンにも実装できる小型のCNNモデルで、橋の交通振動や地震による振動

などを90%以上の精度で認識することができることが明らかにしている。

最後に、第6章において各章の要約と本研究で得られた知見を結論としてまとめるとともに、今後の課題について言及している。

なお、本研究の成果は、審査制度のある国際的な学術雑誌 (Structural Control and Health Monitoring) に1編掲載済み、同じく国際学術雑誌 (Journal of Structural Engineering ASCE, Structural Control and Health Monitoring) に2編査読中、査読付き国際会議 (Proc. of the 7th World Conference on Structural Control and Monitoring) に1編掲載済み、概要査読の会議 (Proc. of International Summer Symposium, JSCE など) に10編発表済み、そのうち3編が優秀発表者賞を受賞していることを付記する。

以上のように、本論文ではスマートデバイスを用いた振動計測や変位計測手法を橋梁の地震観測に実装し、振動台実験や実橋梁の検証実験を行い、橋梁の高密度地震観測を実現するための有益な知見を見いだしている。よって、本学位論文審査委員会は、本論文を博士 (学術) の学位論文として価値あるものと認め、合格と判定した。