

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289194

研究課題名(和文) 想定外事象に対するネットワーク異常検知システムの軍艦島における実証的研究

研究課題名(英文) Field Research on Anomaly Detection Sensor Network System in Preparation for Unforeseeable Events in Gunkanjima

研究代表者

濱本 卓司 (Hamamoto, Takuji)

東京都市大学・工学部・名誉教授

研究者番号：10228546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：都市における想定外事象の発生に備え、事前対策として原因分析や予知・予測に必要な基礎データを提供し、事後対策として避難誘導、安否確認、救助・救援活動を支援する建築群のネットワーク異常検知システム構築に関する実証的研究を行った。厳しい環境の下で建築群が崩壊過程にある長崎県軍艦島を検証の場として選び、映像・音声・振動のセンサデータを総合的に利用して想定外事象の発生を検知し、建築群の非線形挙動を追跡して損傷から崩壊への進行を監視する視聴触統合センシングシステムを実装した。現地におけるシステム構築により得られた新たな発見と経験的知見に基づき、システム改善のための今後の課題を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of providing basic data required for disaster prediction and cause analysis as pre-measures and of supporting evacuation guidance, safety confirmation, relief and rescue activity as post-measures, a field research on network anomaly detection system of building structures has been conducted in preparation for the occurrence of unforeseeable disastrous events in urban areas. In an isolated island called Gunkanjima where a number of ruined buildings have been severely damaged and extremely deteriorated under a harsh environment, an image-sound-vibration integrated sensing system is implemented to detect the occurrence of unforeseeable events and to track the nonlinear behavior and damaged condition of building structures. Based on new discoveries and empirical knowledge learned from field research, future issues are identified for system improvement.

研究分野：建築構造

キーワード：軍艦島モニタリング 視聴触統合センシング ロバストセンサネットワーク 建築群維持管理システム  
想定外事象 エネルギーハーヴェスティング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ニューヨーク WTC への航空機衝突テロ (2001 年) や 東日本大震災における大津波襲来 (2011 年) など、想定外事象の発生により人的・物的両面で甚大な被害が多発している。この原因の一つとして、想定外事象の発生以前の備えも発生以後の対処も十分ではなかったことが挙げられる。とくに都市部では、地上・地下に鉛直展開した様々な建築群が広域に水平展開しており、想定外事象の現れ方は多様かつ複雑である。都市における想定外事象の発生に備え、事前対策として予知・予測に必要な基礎データを提供するために、また事後対策として避難誘導、安否確認、救助・救援支援のために、建築群のネットワーク異常検知システムを構築することが緊急の課題になっている。

(2) ユビキタス時代を迎えつつある現在、廉価な超小型センサを有線・無線のネットワークで繋いだ広域高密度モニタリングに関する研究は分野を問わず国内・国外で活発に行われている。センサ技術や通信技術の先端も日進月歩で進化している。建築分野でも、安全性や居住性を維持することを目的に、センサデータにシステム同定やデータマイニングなどを適用して損傷検出やヘルスマニタリングを行う基礎研究は成熟期を迎えており、実建物への適用を目指した動きが加速化している。しかし、従来のモニタリング技術は想定内事象における利用が前提であり、想定外事象への対応は考慮されていない。都市域建築群における想定外事象に対し、ビッグデータの伝送と処理を前提とした異常検知システムの研究・開発を進める必要がある。

## 2. 研究の目的

(1) 想定外事象における建築群の挙動と状態は時々刻々と変化し、予測することが極めて難しくなる。それだけに、想定外事象が発生しても、遠隔地で建築群の挙動と状態をリアルタイムで自動的に追跡できるモニタリングシステムを実装することの意義は大きい。想定外事象に対応できるモニタリングには、たとえ建物の崩壊により環境が変化したとしても、通信・電力インフラが断絶したとしても、建築群から伝送されるビッグデータを収集・分析し続けるロバスト性を付与する必要がある。通常時における連続的あるいは定期的モニタリング、崩壊過程における高精度モニタリング、崩壊後における崩壊通報やセンサの所在を通知するビーコン発信など多段階で機能を変化できるようにする。

(2) 映像・音声・振動のセンサデータを総合的に利用して、想定外事象の発生を検知した後、建築群の非線形挙動を追跡し、損傷から崩壊への進行を監視する。このために、建物内部の振動を高精度 MEMS 加速度センサネットワーク (触覚)、建物内外の異常音をマ

イクロフォンアレイ (聴覚)、建物外部の変化を監視カメラネットワーク (視覚) で長期間自動計測する視聴触統合センシングシステムを構築する。これまでの損傷検出やヘルスマニタリングでは、建築物が健全状態から徐々に劣化する弱非線形挙動を前提としてきたが、想定外事象においては強非線形挙動になる可能性が高い。このため、時空間に広がる視聴触ビッグデータから破壊や崩壊の予兆を抽出し可視化する。損傷や崩壊・崩落による外観変化や瓦礫の散乱状況 (画像計測)、ひび割れや破壊・衝突による異常音の発生 (音声計測)、損傷・破壊の進行に伴う力の流れや境界条件・支持条件の変化 (振動計測) などをモニタリングすることにより平時から有事への移行を自動的に検知できるようにする。さらに、鉛直力支持部材の一部の破壊が引き金となり、次々に破壊が連鎖して全体崩壊に至る進行性崩壊を事前に察知して警報を出せるようにする。

(3) ネットワーク異常検知システムの有効性を実際の建築群を対象として検証する。想定外事象における利活用を主眼としているため、過酷かつ不便な環境条件の下で、多様な損傷・破壊状態の建築群が存在している場所での検証が求められる。従来の損傷検出やヘルスマニタリングの研究は、シミュレーション解析や振動台実験により人為的に損傷・破壊状態を設定して検証が行われてきた。これに対し、本研究では、多くの建築物が崩壊過程にある長崎県軍艦島 (端島) という特殊な舞台で検証を行う。閉山後無人島となつて 40 年以上が経過し、最も古い鉄筋コンクリート造アパートは竣工後 100 年を超え、塩害の持続作用と台風や時化の繰り返し作用により建築群は極度に劣化が進行している。その様相は巨大地震・津波が発生した後に崩壊過程にある建築物が散在する状況に類似している。軍艦島で取得された映像・音声・振動データはデータ駆動型の建築構造解析という新たな学術領域を切り開く鍵となる。軍艦島は世界遺産に登録されており、歴史的建造物の保存という観点からも貢献できる。

## 3. 研究の方法

(1) 視聴触統合センシングシステムの中心に振動センサネットワークを据え、想定外事象における個々の建築物の内部変化 (変形・損傷・破壊・崩壊) を追跡・診断する。建築物の形状変化やきれつ進展などの外部変化を見守る監視カメラネットワークと建築物内部で発生する異常音を聞き分けるマイクロフォンアレイはその補完技術と位置付ける。このため、点情報を与える振動センサノードは個々の建築物の挙動が把握できるように比較的密な配置、広範囲の情報を提供するカメラノードは見晴らしの良い場所を選んで少数配置、異常音発生の時間・空間を特定するためのマイクノードは破壊・崩壊の可

能性が高い場所近傍での限定的配置を基本方針とした。さらに、崩壊過程にある建築群を対象とする上での安全性確保、無人島における電源の自給方法、通信施設のない島内でのデータ伝送方法、歴史的建造物としての配慮などを勘案し、軍艦島における視聴触統合センシングシステムの実装を進めた。

(2) 振動センサネットワークは島内居住区の5棟を対象として構築した。初年度は70号棟(小中学校)に5基の振動センサノードをパイロット的に設置し、センサの作動状況、屋上に設置した太陽光パネルの稼働状況、建物内有線とLTE無線(携帯電話網)を組み合わせ合わせたデータ転送方式の有効性を約1年間かけて確認した。2年度は島内最古の30号棟に9基、防潮棟として建てられた31号棟に6基の振動センサノードを設置してセンサネットワークを拡張した。31号棟屋上に両棟別々の太陽光パネルを設置し、各棟にハブステーションを設けてセンサノードと有線をつなぎ、31号棟屋上に設置したルーターからLTE無線に接続した。3年度は島内最大の65号棟に8基、5棟連結構造として建てられた日給社宅(16~20号棟)に16基の振動センサノードを設置し、当初予定した全センサノードの設置を完了した。各棟の屋上に太陽光パネルを設置し、65号棟は2ブロック、日給社宅は3ブロックに分け、各ブロックにハブステーションを設置し、有線とLTE無線を組み合わせデータ伝送を行った。

(3) 監視カメラネットワークは、初年度に居住区最高高度となる3号棟屋上に設置した首振り可能な3基の映像センサノードにより360度の俯瞰を常時提供できるようにした。屋上に太陽光パネルと指向性アンテナを設置し、4.5km離れた本土対岸の軍艦島資料館に無線で映像データを伝送し、インターネット回線に接続している。振動センサネットワークの対象になっている31号棟、日給社宅、65号棟、70号棟を直接監視することができる。唯一死角になって見えない30号棟に関しては、2年度に損傷の激しい南面と東面の映像を常時提供する自律型映像センサノードを設置した。さらに、3年度に台風襲来時の建築群への波浪作用状況を把握するために、中ノ島に定点カメラを設置した。映像データは伝送せずに撮り溜め方式とした。

(4) マイクロフォンアレイは、3年度に島内で最も崩壊過程が進行している30号棟内部に限定して設置した。設置場所は中庭廊下西側の2階と7階とし、各階に16個のマイクで構成されるマイクロフォンアレイを設置した。

#### 4. 研究成果

(1) 想定外事象が発生すると、通常時は安定的に供給される電源が断絶してモニタリングシステムを稼働させることができなくな

る。この対策として、周辺環境から必要なエネルギーを収穫して電力に変換するエネルギーハーベスティングの導入を検討した。太陽光パネルを建物の屋上に設置して発電し、夜間や雨天・曇天のときはバッテリーに蓄えた余剰電力を使用する方法を採用した。電力の安定供給のために、島外から発電量と稼働状況を監視できるようにして発電・蓄電の長期データを蓄積した。

(2) 想定外事象の下では計測機器の故障・破壊や通信網の切断が生じ、通常時は安定して伝送されていたセンサデータの時間的・空間的欠損が目立つようになる。この対策として、センサを極厚鋼のボックスで保護し、データ伝送経路のリダンダンシーを高め、大規模な障害が発生した場合は伝送せずにハブステーションに自動記録してデータを残すようにした。さらに、通常時の計測データを先見情報として欠損データを補完・推定する方法を検討した。

(3) 振動センサネットワークの各センサデータは設置位置における点情報であり、そのままでは架構全体の挙動を把握しにくい。そのため、GPSを利用してセンサノード間の時間同期を行ったうえで、3次元アニメーションで即時に映像化して架構の挙動を再現できるようにした。これにより、劣化・損傷が進行した建物では固有周期が明瞭には現れず、架構の挙動は荷重への依存性が大きくなり非線形挙動が卓越することが確認できた。

(4) 通常時における建物の状態変化は微々たるものであるが、想定外事象の下では状態変化が顕著になる。研究期間中(3年間)でも台風通過により70号棟7Fの鉄骨造増築部分が倒壊している。このため、通常時は振動ネットワークの計測を2時間間隔とし、台風通過時には島外から計測間隔を短縮して建築群の状態変化を細かく追跡できるように設定した。これにより、台風通過時の風向・風速および波浪の強さに対する建築群の揺れの変化を検討することができた。

(5) 有線とLTE無線の組み合わせによるデータ伝送において、ケーブルが長くなるとSN比が低下し、センサ間の伝達関係や相関関係を表す指標の精度が低下することがわかった。このようなときは、電圧低下量を最小化し、サンプリング周波数を大きくとることで精度を改善できることを確認した。

(6) 3号棟屋上に設置した3基のカメラは、台風接近から通過後までの長期間、防潮堤を越えて島内に流入する海水や強風下での建物の状態の映像を安定して伝送することができた。台風通過による建築群および周辺環境の変化をリアルタイムで遠隔俯瞰監視する上で有効であることを確認した。

(7) マイクロフォンアレイの計測データを用いて、音源からそれぞれのマイクに到達する音の時間差や音源からマイクまでの伝達特性を利用することにより音源位置を推定した。音の特徴量として音の大小度、音の高低度、音の継続度を抽出することにより発生音の原因究明に関する検討を行った。

(8) 軍艦島における視聴触統合センシングシステムの構築は完了し、伝送されたデータの分析結果を順次発表している。今後も継続して分析結果を学術論文としてまとめるとともに、取得データを整理して公開する準備を進めている。さらに、軍艦島のデータ送信・処理をさらに2年間継続し、ビッグデータのストリーミング処理を行って長期モニタリングの成果を報告する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計13件)

濱本卓司, 嶋原良典, 矢代晴実, 井上修作: 開口部と開放部を有する中低層建築物の津波水槽実験, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.82, No.733, pp.359-369, 2017

森田高市, 鹿嶋俊英, 濱本卓司: 東北地方太平洋沖地震前後のSRC造建築物の長期状態モニタリング, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.81, No.730, pp.2037-2044, 2016

濱本卓司, 藤田謙一: 形状可変浮体構造物の水槽実験, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.81, No.724, pp.1039-1049, 2016

倉田成人: 自律型時刻同期センシングシステムの基礎的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.62A, pp.185-192, 2016

黒木琴海, 小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 環境発電型センサシステムのためのデータ中心型タスクスケジューリング方式, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.57, No.11, pp.1-14, 2016

倉田成人: 建築構造物と社会インフラのモニタリング, 計測と制御, 査読無, Vol.55, No.3, pp.23-28, 2016

濱本卓司: 衝撃作用(衝突・爆発)の解析手法, 建築技術, 査読無, Vol.797, pp.136-137, 2016

濱本卓司: 対津波設計の確立を目指して, 建築雑誌, 査読無, Vol.132, No.1693, p.134, 2016

倉田成人: 構造ヘルスマニタリングのためのビッグデータの活用と課題, 建築雑誌, 査読無, Vol.131, No.1690, pp.16-17, 2016

濱本卓司: 建築物の構造ヘルスマニタリング, 基礎工, 査読無, No.797, pp.17-20, 2015

鈴木直子, 濱本卓司: 圧密沈下を生じるパイルド・ラフト基礎の長期沈下モニタリングと評価, 基礎工, 査読無, Vol.43, No.11, pp.74-77, 2015

鈴木直子, 濱本卓司: 長期沈下モニタリングによるパイルド・ラフト基礎の構造性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.79, No.706, pp.1835-1845, 2014

猿渡俊介, 森川博之: M2Mの情報流, 情報処理, 査読無, Vol.55, No.11, pp.23-28, 2014

[学会発表](計20件)

富岡昭弘, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト(その6)MEMS加速度センサネットワークの構成, 2017年度日本建築学会大会, 広島工業大学(広島), 2017.9.3

関根明日香, 鶴岡涌, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭弘: 軍艦島モニタリングプロジェクト(その7)30号棟の振動計測と劣化調査, 2017年度日本建築学会大会, 広島工業大学(広島), 2017.9.3

鶴岡涌, 関根明日香, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭弘: 軍艦島モニタリングプロジェクト(その8), 日給社宅と65号棟の振動計測と劣化調査, 2017年度日本建築学会大会, 広島工業大学(広島), 2017.9.3

濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭弘: 軍艦島モニタリングプロジェクト(その9)視覚センシングと聴覚センシングの融合, 2017年度日本建築学会大会, 広島工業大学(広島), 2017.9.3

Narito Kurata: Development of Sensor Module for Seismic and Structural Monitoring with a Chip-scale Atomic Clock, The 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Santiago (Chile), 2017.1.9

Narito Kurata: Vibration Measurement of the World Heritage, Cambodia-Japan Joint Workshop on Ambient Intelligence and Sensor Networks, Siem Peap (Cambodia), 2016.12.7

岡田隆三, 黒木琴海, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: Contiki OSを用いた複数シンク

対応型 RPL の実装, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 北海道大学 (北海道), 2016.9.20

黒木琴海, 富岡昭弘, 猿渡俊介, 倉田成人, 濱本卓司: 軍艦島モニタリングプロジェクト, 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 芝浦工業大学 (東京), 2016.8.24

富岡昭弘, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その2) 長期振動計測システム, 2016 年度日本建築学会大会, 福岡大学 (福岡), 2016.8.25

関根明日香, 富岡昭弘, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭弘: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その3) 長期モニタリングに基づく軍艦島 70 号棟の動的挙動, 2016 年度日本建築学会大会, 福岡大学 (福岡), 2016.8.25

倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介, 富岡昭弘: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その4) 日本最古の鉄筋コンクリート造集合住宅 30 号棟の画像モニタリング, 2016 年度日本建築学会大会, 福岡大学 (福岡), 2016.8.24

鶴岡涌, 崔井圭, 濱本卓司: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その5) ウェアラブルカメラとドローンを用いた軍艦島 30 号棟の劣化調査, 2016 年度日本建築学会大会, 福岡大学 (福岡), 2016.8.24

岡田隆三, 小寺志保, 富岡昭浩, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 軍艦島全域センサネットワーク構築に向けた検討, 第 78 回映像処理学会全国大会, 慶應義塾大学 (神奈川), 2016.3.11

守屋広汰, 小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングに向けた首振りカメラによる映像取得方式の検討, 第 78 回映像処理学会全国大会, 慶應義塾大学 (神奈川), 2016.3.11

Kotomi Kuroki, Shiho Kodera, Narito Kurata, Takuji Hamamoto, Shunsuke Saruwatari: Data-centric Task Scheduling for Battleship Island Monitoring, The 13<sup>th</sup> ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, Seoul (Korea), 2015.11.4

黒木琴海, 小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングにおけるタスクスケジューリングの課題, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東北大学 (宮城), 2015.9.8

小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 渡辺尚, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングに向けた映像処

理方式の提案, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東北大学 (宮城), 2015.9.8

濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭弘: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その1) 研究計画と予備計測 / 長期計測, 2015 年度日本建築学会大会, 東海大学 (神奈川), 2015.9.5

Hiroko Suzuki, Takuji Hamamoto: Structural Performance Evaluation of Pile-Raft Foundation Using Long-term Settlement Monitoring, International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures, Torino (Italy), 2015.7.1

黒木琴海, 佐藤匠, 小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングに向けたデータ中心型タスクスケジューリング方式, 第 77 回情報処理学会全国大会, 京都大学 (京都), 2015.3.18

[ 図書 ] (計 6 件)

濱本卓司 (分担) ほか: 東日本大震災合同調査報告 総集編, 日本建築学会, 全 484 頁, 2016

濱本卓司 (分担) ほか: 建築物荷重指針を活かす設計資料 1, 日本建築学会, 全 506 頁, 2016

濱本卓司 (分担) ほか: 東日本大震災合同調査報告 建築編 5 建築基礎構造 / 津波の特性と被害, 日本建築学会, 全 278 頁, 2015

濱本卓司 (分担) ほか: 海洋建築の計画・設計指針, 日本建築学会, 全 142 頁, 2015

濱本卓司 (分担) ほか: 建築物の耐衝撃設計の考え方, 日本建築学会, 全 226 頁, 2015

濱本卓司 (分担) ほか: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 全 657 頁, 2015

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

濱本 卓司 (HAMAMOTO, Takuji)  
東京都市大学・工学部・名誉教授  
研究者番号: 1 0 2 2 8 5 4 6

### (2) 研究分担者

倉田 成人 (KURATA, Shigeto)  
筑波技術大学・学内共同利用施設等・教授  
研究者番号: 0 0 4 1 6 8 6 9

猿渡 俊介 (SARUWATARI, Shunsuke)  
大阪大学・情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 5 0 5 0 7 8 1 1