

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22310103

研究課題名（和文） 小型ロボットによる建物構造性能評価と避難誘導

研究課題名（英文） Structural assessment and evacuation guidance using small robots

### 研究代表者

三田 彰 (MITA AKIRA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：60327674

研究成果の概要（和文）：高精度な加速度センサを搭載したセンサエージェントロボットを開発し、そのロボットを使った精度の高い建物構造性能評価手法を多数提案した。また、ロボットを使った効果的な避難誘導手法について評価して確認した。

研究成果の概要（英文）：Sensor agent robots with high-precision acceleration sensors were developed. Several methods for accurate assessment of structural performance using them were proposed. An effective evacuation method using robots was tested and validated.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：社会システム工学・安全システム

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 ・ 社会システム工学・安全システム

キーワード：センサ モニタリング ロボット 構造性能 避難

### 1. 研究開始当初の背景

センサに基づく建物構造性能評価手法は多数提案されているが、専用のセンサの設置はコストが高く、普及が進まない。一方、お掃除ロボットに代表されるロボットが家庭に導入されるようになってきており、こうしたロボットを活用することで、上記のような問題が解決できる可能性があった。

### 2. 研究の目的

本研究は建物の構造性能を評価し、その履歴データを管理するとともに、緊急時に避難誘導をすることにロボットを活用するシステムを提案する。構造ヘルスマニタリング技術は、実際の構造性能をセンサ情報から把握

できる優れた技術であるが、発生頻度の低い地震のためだけに多額の費用をかけるのは経済的でない。そこで、本研究では掃除などの他用途ロボットを活用することで、実社会に役立つ安全システムの構築を目指した。

### 3. 研究の方法

高率的な研究を推進するために、本研究においては4つの研究系列に分けて推進した。すなわち①ロボット基板製作、②センサ基板製作、③診断アルゴリズム、④診断結果表示と避難誘導、である。①と②はハードウェアを主体とした研究で③と④はソフトウェアを主体とした研究である。

#### 4. 研究成果

##### (1) 小型ロボットの開発

高性能な加速度センサを搭載し、人追従可能とすることを目指して、いくつかのプロトタイプロボットを製作した。加速度センサを小型ロボットに搭載して走行中に加速度を計測するのは困難で精度が下がるため、加速度計測の際に車体を降下させて加速度センサを床に密着させる仕組みについて検討し、図1に示すようなメカニズムを採用した。実際に製作したロボットと加速度センサ用の台車を図2に示す。この仕組みによって、高い精度で建物の応答を計測できることが確認できた。しかし、用いたロボットは横幅10cmの小型のため、人の通常の歩行には追いつけないものであった。

そこで、人追従のための多数のセンサを搭載した横幅30cmのロボット（センサエージェントロボット）を複数製作した。その概観を図3に示す。図2のロボットと図3のロボットをさらに改良して、高速に人追従が可能で、加速度センサを実装したセンサエージェントロボットも製作した（図4）。このロボットは十分に剛性が高いため、床に固定しなくても、適切な信号処理をすることによって精度の高い加速度応答を計測できる。そのため、実用性が格段に高いロボットとなった。

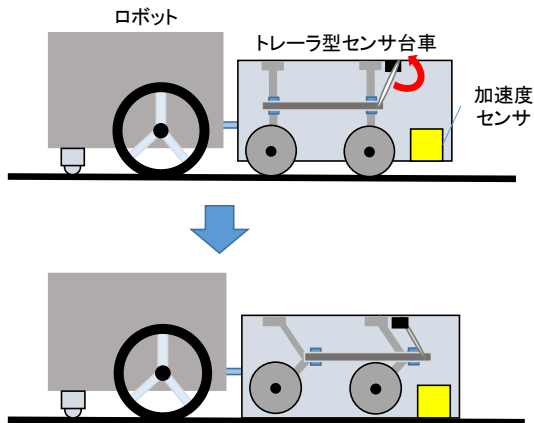


図1 リンク機構を使ったセンサ用台車固定機構



図2 小型ロボットと固定機構を実装した台車

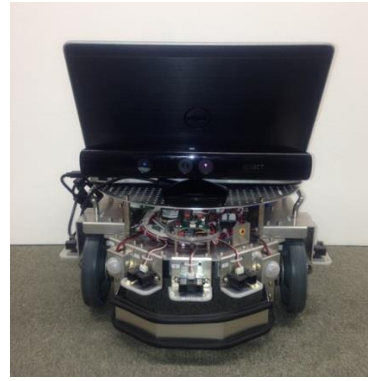


図3 KINECT 他多数のセンサを設置したセンサエージェントロボット



図4 高速での人追従が可能で加速度センサを実装したセンサエージェントロボット

##### (2) 1台のセンサを用いた損傷推定

ロボットに搭載された1台の加速度センサのみを用いて、建物の損傷度合いを推定するアルゴリズムを提案した。図5に示すのは通常の建物の応答を推定する手法を示すもので、モードごとの応答を1台のセンサで得られた応答に対してフィルタを通すことで実現している。この手法のポイントは剛体運動を表す0次モードを組み込んだこと、3次モード以降のモードは2次モードに含まれると割り切ること、にある。実大四層鉄骨建物の振動台実験に適用した例を図6に示す。この図から10%以下の誤差で応答推定ができることが確認できる。

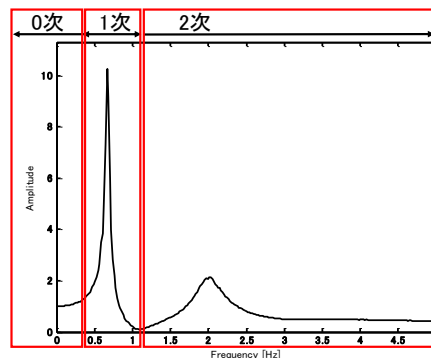


図5 周波数領域を区分した応答推定

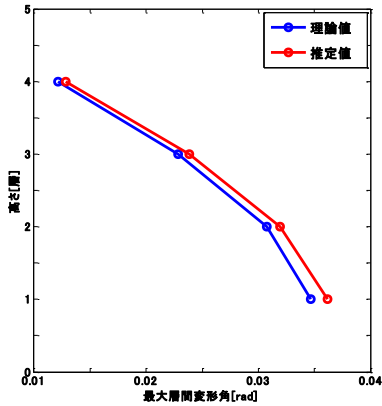


図 6 1 台のセンサのみを使った推定の精度

1 台のセンサのみを使った推定は免震構造にも適用可能であるが、免震の場合は、変形のほとんどが免震層に集中するため、1 質点の非線形振動モデルに近似することでより高い精度で推定する手法を提案した。一種の状態推定を行うことになるが、このことによって、上部構造のどこかに 1 つだけセンサがあれば免震構造の変形量が推定できる (図 7)。基礎の応答を計測する必要がないため、ロボットを使った損傷推定に最適な方法である。図 8 には実大免震構造物を使った振動台実験に適用した例を示す。破線が加速度センサを 2 回積分したものの、赤線がこの手法で推定した変形、青線が真値である。強い非線形応答を示しているが精度良く推定できていることがわかる。

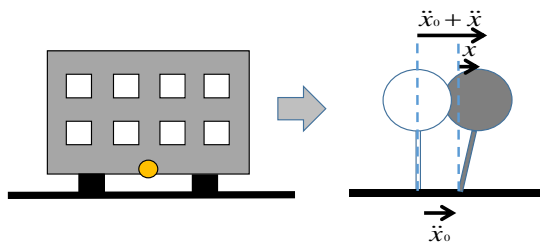


図 7 免震層の変形推定のためのモデル

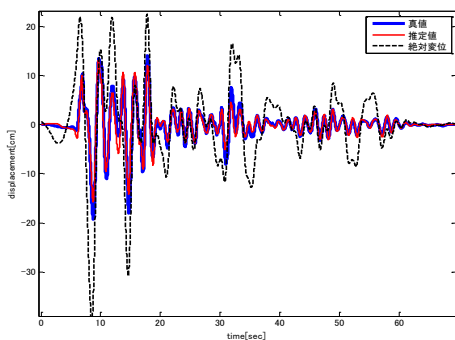


図 8 免震層の変形推定の精度

### (3) SHM システムとの連携

個別の建物の情報のみによって避難誘導を行うだけではなく、周辺の建物も含めた面的な被害状況を把握した上で、安全な建物・場所に誘導することを目指して、構造ヘルスマモニタリング (SHM) システムとの連携システムを構築し、ロボットとの通信を行うことにより安全情報の確認を行えるようにした。図 9 にその概念図を示す。この図ではすべてロボットによって応答を観測するイメージになっているが、建物に設置された固定型のセンサで観測されたデータに基づくものも統一的に扱うことができる。

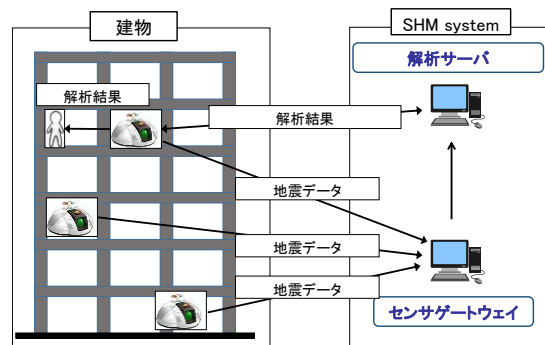


図 9 SHM システムと連携した避難誘導

### (4) ロボットによる避難誘導方法

慶應義塾大学の校舎を対象として避難誘導の実験を行った。実験に用いたロボットは図 3 に示したロボットに矢印表示装置を搭載したもので、図 10 に示すような概観である。図 11 に対象となった建物の平面図およびシミュレーションに用いたノード・リンクモデルを示す。

実験から、①避難誘導ロボットが移動しながら誘導し、ロボットが矢印表示によって避難方向を示すことが効果的。②被験者実験の結果からシミュレーション用避難エージェントモデルが構築可能。③ロボットには効果的な避難誘導位置がある。といった結論が導かれた。

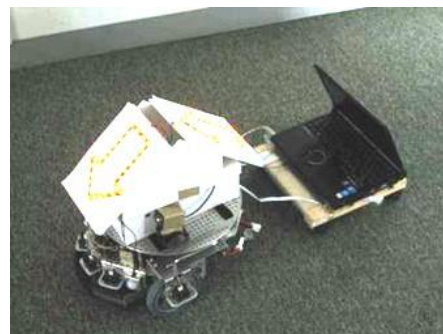


図 10 避難誘導実験に用いたロボット

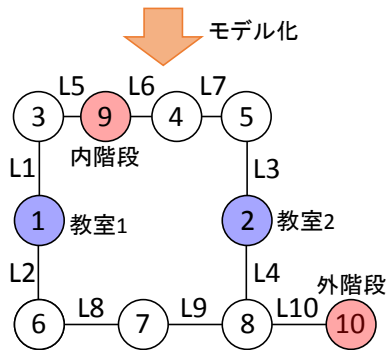
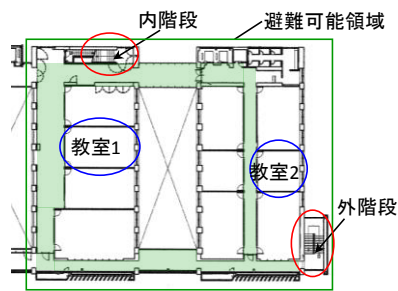


図 11 ロボットを用いた避難誘導実験

(5) 高度な損傷推定手法の提案

複数のロボットによる応答データが獲得された場合に詳細な損傷評価をするための手法を開発した。大きく3つのグループに分けられる。①サブストラクチャ法に基づく損傷評価、②時刻歴記号解析と知的アルゴリズムを用いた損傷評価、③サポートベクタマシンを用いた損傷評価、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 15 件)

- ① 品川祐志、三田彰「1台の加速度センサのみを用いた免震層の応答評価」日本建築学会技術報告集、査読有、(掲載予定)
- ② Hien HoThu and Akira Mita, "Damage Detection Method Using Support Vector Machine and First Three Natural Frequencies for Shear Structures," Open Journal of Civil Engineering, 査読有, Vol. 3, No.2 (in press)
- ③ Kazuhiko Kasai, Akira Mita, Haruyuki Kitamura, Kazuhiro Matsuda, Troy A. Morgan, and Andrew W. Taylor, "Performance of Seismic Protection Technologies During the 2011 East Japan Earthquake," Earthquake Spectra (in press)
- ④ 品川祐志、三田彰「一台の加速度センサのみを用いた建築構造物の振動応答推定手法」日本建築学会技術報告集、査読

有、第 42 号 (掲載予定)

- ⑤ 秋葉達也、三田彰「Kinect および人追従ロボットを用いた LED 照明制御」日本建築学会技術報告集、査読有、第 42 号 (掲載予定)
- ⑥ Tatsuya Akiba and Akira Mita, "Homeostasis Lighting Control System Using a Sensor Agent Robot," Intelligent Control and Automation, 査読有, Vol. 4 No. 2, pp. 138-153, Pub. Date: May 24, 2013, DOI: 10.4236/ica.2013.42019
- ⑦ Rongshuai Li, Akira Mita and Jin Zhou, "Abnormal State Detection of Building Structures Based on Symbolic Time Series Analysis and Negative Selection," Journal of Structural Control and Health Monitoring, 査読有, Published online: 20 FEB 2013, DOI: 10.1002/stc.1555
- ⑧ Rongshuai Li, Akira Mita and Jin Zhou, "A Hybrid Methodology for Structural Health Monitoring based on Immune Algorithms and Symbolic Time Series Analysis," Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 査読有, DOI:10.4236/jilsa.2013.51006, Vol. 5, No. 1, PP. 48-56 (2013)
- ⑨ Rongshuai Li, Akira Mita and Jin Zhou, "Symbolization-Based Differential Evolution Strategy for Identification of Structural Parameters," Journal of Structural Control and Health Monitoring, 査読有, DOI: 10.1002/stc.1530, published online: 4 Nov 2012
- ⑩ Rongshuai Li, Akira Mita and Jin Zhou, "Feasibility Study of Parameter Identification Method based on Symbolic Time Series Analysis and Adaptive Immune Clonal Selection Algorithm," Open Journal of Civil Engineering, 査読有, DOI: 10.4236/ojce.2012.24026, 2012, Vol. 2, No. 4, 198-205
- ⑪ 秋葉達也、三田彰「生命化建築のためのセンサエージェントロボットを用いた人追従」日本建築学会技術報告集、査読有、第 18 巻、第 39 号、775-780 (2012)
- ⑫ Zhenhua Xing and Akira Mita, "A substructure approach to local damage detection of shear structure," Journal of Structural Control and Health Monitoring, 査読有, Volume 19, Issue 2, Pages: 309-318, (2012)
- ⑬ 松柴由直、西宏章「構造ヘルスマモニタリングのためのデータバックアップ機構」

日本建築学会環境系論文集、査読有、第662号、439-448、(2011)

- ⑭ Zhenhua Xing and Akira Mita, "Locating the damaged storey of a building using distance measures of low-order AR models," International Journal of Smart Structures and Systems, 査読有, Vol. 6, No. 9, pp. 991-1005 (2010)
- ⑮ Akira Mita, Hiroshi Sato and Hiroki Kameda, "Platform for structural health monitoring of buildings utilizing smart sensors and advanced diagnosis tools," Journal of Structural Control and Health Monitoring, 査読有, Vol. 17, No. 7, pp. 795-807, (2010)

[学会発表] (計 40 件)

- ① Mei Liu and Akira Mita, "Substructure damage detection method for shear structure using sub-time series and ARMAX," Structural Health Monitoring: Research and Applications, Trans Tech Publications Ltd, Peer reviewed papers from the 4th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, December 5-7, 2012, Melbourne, Australia, pp.149-159 (2012)
- ② Yushi Shinagawa and Akira Mita, "Verification of structural health assessment methods using full-scale collapse test data of four-story steel building," Research and Applications, Trans Tech Publications Ltd, Peer reviewed papers from the 4th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, December 5-7, 2012, Melbourne, Australia, pp.174-183 (2012)
- ③ Tatsuya Akiba, Nobuyuki Lee and Akira Mita, "Sensor agent robot with servo-accelerometer for structural health monitoring," Research and Applications, Trans Tech Publications Ltd, Peer reviewed papers from the 4th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, December 5-7, 2012, Melbourne, Australia, pp.289-296 (2012)
- ④ Akira Mita and Daiki Ise, "Active evacuation guidance and structural health monitoring system for buildings using sensor agent robots,"

Research and Applications, Trans Tech Publications Ltd, Peer reviewed papers from the 4th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, December 5-7, 2012, Melbourne, Australia, pp.281-288 (2012)

- ⑤ 金子みなみ、小檜山雅之「ロの字型廊下の被験者実験によるロボットを用いた避難誘導の効果の検討」第9回日本地震工学会大会、東京、(2012)
- ⑥ Akira Mita, "Performance of Seismic Isolation Buildings during the 2011 Great Tohoku Earthquake" 7th Int. Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Bangalore, India (2012)
- ⑦ Akira Mita, "Biofied Building with Sensor Agent Robots" 5th European Conference on Structural Control, Genoa, Italy, (2012)
- ⑧ 三田彰「生命化建築のコンセプトとセンサエージェントロボット」電子情報学会クラウドネットワークロボット研究会、慶應義塾大学日吉キャンパス、(2012)

他 32 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他] (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三田 彰 (MITA AKIRA)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号：60327674

### (2) 研究分担者

西 宏章 (NISHI HIROAKI)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号：00365470  
小檜山 雅之 (KOHIYAMA MASAYUKI)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号：10333577  
中澤 和夫 (NAKAZAWA KAZUO)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号：80217695