

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282105

研究課題名(和文)無線センサネットワークによる社会基盤の安全・高効率化の基礎研究

研究課題名(英文)Basic research of the safety and efficiency of social infrastructure by wireless sensor networks

研究代表者

大貝 晴俊(Ogai, Harutoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80367169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：(1)無線センサを用いた橋梁健全度診断システムを研究開発した。小型の無線センサーモジュールとそのネットワークシステムを試作と通信テストを行った。クラウドシステムとして実現可能な、ARMAモデルベースおよびウェブベースの診断方法を開発・評価し良好な結果を得た。(2)大規模オフィスの照明制御システムを研究開発した。照明制御としてLPとPSO併用高速解法、その照明モデルの係数を学習方法、またオンラインで変化する外光に対する照明制御の方法開発と試験をおこない良好な結果を得た。(3)無線を利用して超小型電気自動車の隊列走行やドア・ツー・ドア走行制御について研究と試験走行を行い、良好な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：(1)Research and development of Bridge Health Monitoring System (BHMS) by using wireless sensor networks was done. The new small size of the wireless sensor module and the prototype of the wireless sensor network system were developed and made communication test. The ARMA model and wavelet based diagnostic methods was developed, implemented and tested. (2)A lighting control system for large-scale Office was researched and developed. The lighting control system consisted of a high-speed search algorithm by combination of LP and PSO, new learning method for coefficients of the illumination model by neural network with Lambertian neuron, a on-line illumination control method for external light change. These were tested and got good results. (3)By using wireless sensor networks and Wi-Fi, the research for the platoon and door-to-door travel control of the ultra-small electric vehicle were done. Many test run were done and good results were obtained

研究分野：自動車制御

 キーワード：無線センサネットワーク 橋梁診断 照明制御 モデルベース制御 ニューラルネットワーク 照明モ
 デル 自動車の隊列走行 ドア・ツー・ドア自動運転

1. 研究開始当初の背景

高度成長期に建設された多くの橋梁が老朽化し更新時期を迎えつつある今日、橋梁の健全度診断システムの構築が必要である。自動車の増加および高齢化社会を迎え、高齢者の交通事故は増えている。脱原発化の動きによる電力不足から日々の電力消費を削減する課題がある。これらの社会問題を解消するために、無線センサネットワーク技術の利用を考える。長期的に利用でき、安価で効率のよい無線センサネットワーク技術とその応用開発が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、無線センサネットワークを利用した社会システムの構築のための課題解決を目指す。これらの課題を解決するため、1) 超小型無線センサモジュール、2) 小型無線電力伝送システムを開発し、長期にわたり稼働できる無線センサネットワークについて研究する。また、3) クラウド技術による橋梁診断データの収集保存と診断技術について研究する。また、4) 大規模オフィスの照明制御方法について研究する。また、5) 高齢者の安全運転支援におけるセンサネット応用について研究する。

3. 研究の方法

- (1) 低消費電力小型無線センサモジュールの開発と長期にわたって利用可能なセンサネットワークシステムの開発
- (2) クラウド技術による橋梁診断データの収集と診断技術の研究
- (3) 照明と照度の関係を用いた最適調光率設定計算とオンライン制御
- (4) 無線を用いた車々間通信による隊列走行、無線通信によるドア・ツー・ドア自動運転

4. 研究成果

(1) 低消費電力小型無線センサモジュールと無線センサネットワークの開発
リアルタイムに、かつ同期をとってデータ収集をおこなうため、図 4.1 に示す 4 つのデ

バイスから構成されるデータ収集システムを設計した。

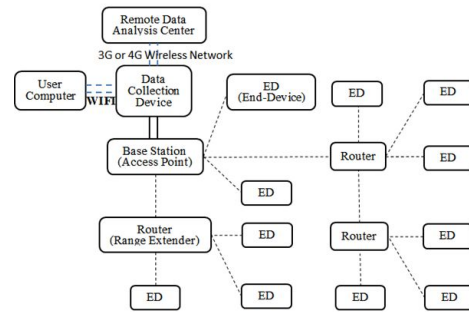


図 4.1 センサネットワークシステム

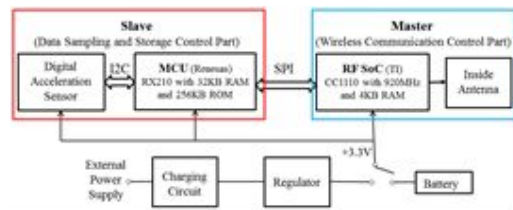


図 4.2 新無線センサモジュールの構成
低消費電力・低コストの新無線ノードボードを設計した。その構成を図 4.2、4.3 に示す。

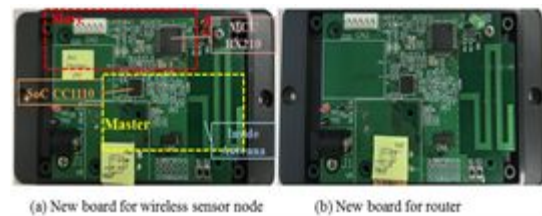


図 4.3 無線センサモジュールのハード

このモジュールのバッテリーを長期に維持するため、図 4.4 に示すソーラパネルで充電を行う。



図 4.4 ソーラ充電システム

(2) クラウド技術による橋梁診断データの収集と健全度診断技術の開発

WSN を用いてクラウド技術を用いて橋梁診断データ収集を行ない、健全度診断を行う。

- 1) ARMA モデルベースの健全度診断技術
橋梁の診断は、図 4.5 のように 2 段階で行う。第 1 段階では、ノイズ処理と全体診断を、非線形 ICA と FFT を用いた診断を行う。

全体的に損傷の有無を診断する。

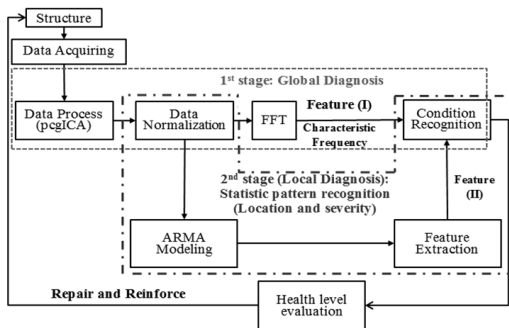


図 4.5 ARMA モデルベース健全度診断

第 2 段階では、ARMA モデルを用いて、損傷の局所箇所の特特定を行う。健全時と新規測定時の各振動データを各々、ARMA モデルで同定し、その AR 部分の係数から損傷感度特徴量 (DSFs) を求める。

両者から、損傷指標 (D_{index}) を求める。

$$D_{index} = \frac{DSF_U}{DSF_R} = \frac{DSF_{unk}}{DSF_{ref}}$$

損傷実験を行った旧神戸橋 (出雲市) の損傷箇所とセンサ配置を図 4.6 に示す。

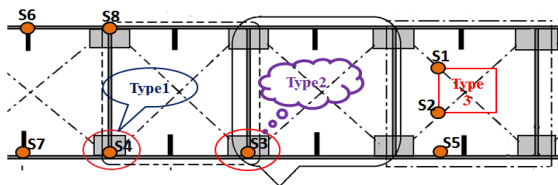


図 4.6 神戸橋の損傷箇所とセンサ配置

損傷レベルを 1 から 6 に変化させた時の各センサにおける損傷指標の評価結果を図 4.7 に示す。センサ 3 の近くで損傷が大きくなっていることが診断できる。

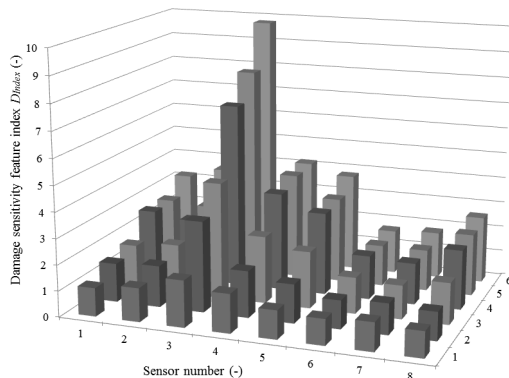


図 4.7 Type1 における損傷診断結果

2) ウェーブレット変換による損傷診断
振動データに対し、ウェーブレット変換を

用いて損傷の判別が可能な手法を開発した。

離散ウェーブレット変換・逆変換を用いた損傷特徴の検出

衝撃試験 Type3 (床板) の Case0~7 のデータに離散ウェーブレット変換・逆変換を行い、周波数レベル毎に分解した。

各 Case のレベル 7、8 番目で他 Case との多少の差異を見ることが出来た。そこで特徴的な波を持つ、レベル 7 と 8 を合成する。これは、帯域フィルタリング操作に相当する。それぞれに FFT を行う。

連続ウェーブレット変換による評価
上記の FFT 波形に、連続ウェーブレット変換を適用した結果を以下に示す。

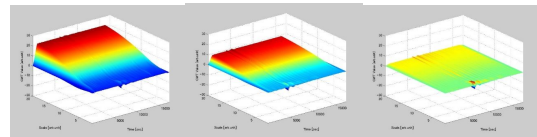


図 4.8 Case0~2 の CWT 結果

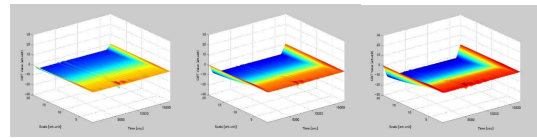


図 4.9 Case3~5 の CWT 結果

離散ウェーブレット変換・逆変換 + 連続ウェーブレット変換を適用した場合、損傷程度に比例した解析結果が観測された。

(3) 照明と照度の関係を用いた最適調光率設定計算とオンライン制御

照明制御システムは、照明装置 (ランプ) (蛍光灯、LED) の調光率を制御することにより、様々なユーザーニーズを満たす照明制御ソリューションを提供する。

本研究では、人工光と自然光のモデルに基づいたリアルタイム照明制御システムを提案している。線型計画法 粒子群最適化 (LPPSO) と照明制御アルゴリズム、ランバート-RBF ニューラルネットワーク (L-RBFNN) に基づく人工光モデリング方法、リアルタイム自然光モデリング (RTDM) 方法、これらを用いた照明制御方法を開発した。

1) LP 初期化 PSO に基づく非線形離散照

明制御

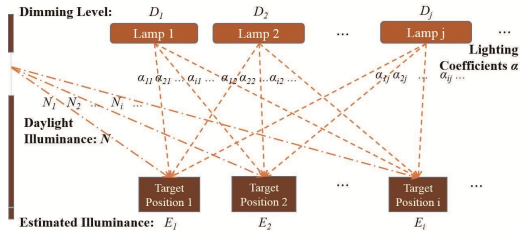


図 4.10 照明制御モデル

粒子群最適化 (PSO) を用いて、照明制御問題を非線形分散制御問題として定式化した。PSO の粒子群を初期化するために線形計画法 (LP) を使用する、LPPSO を開発した。中型のオフィスモデルと大型のオフィスモデルでのシミュレーションでは、LPPSO が目標照度を確保し、多数のエネルギーを節約することができた。

2)人工光のモデルベース制御のためのランバート-RBFNN

RBF ニューラルネットワーク (RBFNN) を用いて、位置と照度との関係をモデル化している。そして、モデリング精度を高くするための L-RBFNN を開発した。

L-RBFNN ではランバート関数 (LF) (LF は、ランプの照度パターンで広く使用) と等価な一つのランバートニューロンを用いている。このように、従来の RBFNN と比較して、提案された L-RBFNN は、精度がより高く、性能もより安定している。L-RBFNN はトレーニングセンサーの数を削減でき、トレーニングの後、制御時は、これらのセンサを必要としない。

3)自然光を統合するリアルタイムモデルベース照明制御

3つのセンサにより全オフィスの自然光のリアルタイムモデリングを実現するための方法 RTDM を開発した。自然光のモデルを少ないセンサで高精度に実現した。

RTDM、RBFNN と LPPSO を組み合わせることにより、リアルタイムモデルベース照明制御システムの試作をした。中型オフィスで1営業日 (変更の自然光と着席状況) のシミュレ

ーションの結果から、提案システムは、自然光と着席状況によって、ランプを適切に制御し、目標位置に十分な照明を提供し、多大のエネルギーを節約することができた。

(3) 無線通信による隊列走行、無線通信によるドア・ツー・ドア自動運転

図 4.11 に COMS を改造した自動運転システムのハードウェア構成を示す。

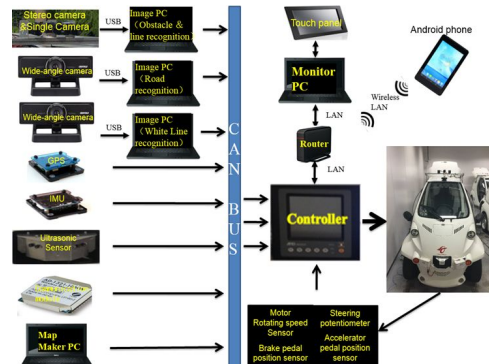


図 4.11 小型電気自動車の自動運転構成

隊列走行

隊列走行では、Zigbee や Deginesh のような無線センサネットワークを用いて車車間通信システムを構築した。隊列走行、隊列形成・分離の実験を行った。以下に例を示す。



図 4.12 隊列走行の実験



図 4.13 隊列分離の実験

ドア・ツー・ドア自動運転

システムは携帯端末 NEXUS7、ポケット WIFI、モニター PC、コントローラ、画像処理 PC と遠隔モニタリング PC で構成する。モニター PC は、IMU と GPS データ、経路生成を収集し、計算結果の出力を担当する。遠隔モニタリング PC がデータの確認と緊急処理を担当する。コントローラは、データを収集する制御モデル演算を実行してから送信する。WIFI は携帯端末、経路設計と通信車載 PC コントローラの接続を担当する。携帯端末は COMS とデータをお互いに伝送する。ルータは、モニター、PC、遠隔監視、PC とコントローラ間の通信を担当する。

・ ドア・ツー・ドア自動運転実験

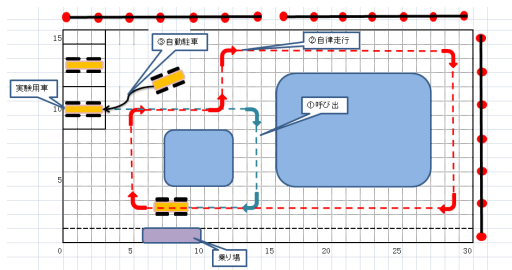


図 4.14 ドア・ツー・ドア自動運転実験

実験用自動運転車は、携帯端末の指示によって、自動呼び出し、自律走行、自動駐車一連の動作を行った。青色の経路は最初で行った呼び出し時の経路、赤色の経路は自律走行の経路、そして、最後は、自動駐車位置まで、経路で走行して、入庫を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 12 件)

Wa SI, Xun PAN, Harutoshi OGAI, Katsumi HIRAI, "LP guided PSO Algorithm for Office Lighting Control", IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 査読有, Vol.E99-D, pp.1-9, Jul. 2016.

Wa SI, Xun PAN, Harutoshi OGAI, Katsumi HIRAI, "A novel Lambertian-RBFNN for Office Light Modeling", IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems,

査読有, Vol.E99-D, No.7, pp.1-11, Jul.

2016

Xun PAN, Wa SI, Harutoshi OGAI, "Fast Vanishing Point Estimation Based on Particle Swarm Optimization" IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol.E99-D, pp505-513, No.2 February 2016.

清水 博幸、犬島 浩、「プロアクティブ手法をより効果的に進めるために—他分野技術との連携への期待」; 技術総合誌 OHM (オーム社)、査読なし、第 102 巻, 第 7 号, pp29-30, 2015.7

Haitao Xiao, Cheng Lou, Harutoshi Ogai, "A Novel Bridge Structure Damage Diagnosis algorithm based on Post-nonlinear ICA and Statistical Pattern Recognition", IEEJ Transaction on Electronics and Electronic Engineering, 査読有, Vol.10, No.3, pp.287-300, May, 2015

Haitao Xiao, Jianan Qin, Harutoshi Ogai, Xiuchen Jiang, "A New Standing Wave Testing System for Bridge Structure Non-destructive Damage Detection using Electromagnetic Wave", IEEJ Transaction on Electronics and Electronic Engineering, 査読有, Vol.10, No.2, pp.157-165, March, 2015

犬島 浩「電気設備の劣化診断技術の動向」; 電気計算 2015/2 (電気書院)、査読なし、第 83 巻第 2 号 pp.20-26, 2015.2

Wa Si, Harutoshi Ogai, "Illumination Modeling Method for Office Lighting Control by using RBFNN", IEICE, 査読有, Vol.E97-D, No.12, pp.3192-3200, Dec. 2014

犬島 浩「変電設備をはじめとした電気設備の劣化診断技術」; 電気評論 (電気評論

社)、査読なし、第 99 巻第 4 号、pp.18-23、2014.4

Wa Si, Harutoshi Ogai, Katsumi Hirai, Tansheng Li, "An Improved Control Algorithm for Lighting Systems by Using PSO", IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 査読有, Vol.133, No.8, pp.1501-1508, 2013.

Haitao Xiao, Xue Zhao, Harutoshi Ogai, "A New Clustering Routing Algorithm for WSN based on Brief Artificial Fish-School Optimization and Ant Colony Optimization", IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 査読有, Vol.133, No.7, pp.1339-1349, May, 2013.

Cheng LU, Yubing FENG, Haitao XIAO, Harutoshi Ogai, "Assesment and Optimization Simulator for Energy Saving Office Lighting System Based on PSO and WSN", RNIS: Research Notes in Information Science, 査読有, Volume 12, pp. 45 ~ 50, 2013

[学会発表](計 24 件)

呉楠,「短距離走行用小型電気自動車自律走行システムの開発」,自動車技術会 2015 年秋季大会,2015.10.14(福岡県北九州市)

谷末 昂浩,「ウェーブレット変換による橋梁劣化診断」,日本機械学会九州支部長崎講演会, 2015.9.24 (長崎県長崎市)

Siyang Zhao, "Vehicle to Vehicle Communication and Platooning for EV with Wireless Sensor Network", SICE 2015 (54th Annual Conference), 2015.7.28 (中国、杭州)

YAWEN ZHAO, "Small EV autonomous Driving control using wireless handheld device", SICE 2015 (54th Annual Conference), 2015.7.28 (中国、

杭州)

呉楠,「小型電気自動車自律走行システムの開発と模擬公道における走行実験」,第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム(MSCS2015),2015.3.4(東京都足立区)

趙雅雯,「携帯端末を用いた小型電気自動車の自律走行制御」, MSCS2015, 2015.3.4 (東京都足立区)

谷末 昂浩,「ウェーブレット変換を利用した橋梁劣化診断」,平成 27 年電気学会全国大会, 2015.3.24(東京都世田谷区)

下脇 僚太,「連続ウェーブレット変換を用いた橋梁の劣化診断技術」,第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2014.12.15 (東京都江東区)

Haitao Xiao, "A Novel Bridge Structure Damage Diagnosis algorithm based on Statistical Pattern Recognition",SICE2014 Annual Conference, 2014.9.3 (北海道札幌市)

Nan Wu," Vehicle to vehicle communication and platooning for SEV COMS by wireless sensor network", SICE2014 Annual Conference, 2014.9.3(北海道札幌市)

Harutoshi Ogai, "Development of Safety Assist System for Ultra Small EV", ITS World Congress Tokyo 2013.10.14 (東京都江東区)

6. 研究組織

(1)研究代表者

大貝 晴俊 (OGAI,Harutoshi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 8 0 3 6 7 1 6 9

(2)研究分担者

犬島 浩 (INUJIMA,Hiroshi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 6 0 3 6 7 1 6 7