

Title	センシングと実空間シミュレーションの統合によるインフラ防災・環境制御手法の開発
Sub Title	Development of methods for disaster prevention of civil infrastructure and environment control by integration of sensing and real-space simulation
Author	小國, 健二(Oguni, Kenji) 佐伯, 昌之(Saeki, Masayuki)
Publisher	
Publication year	2015
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2014. )
JaLC DOI	
Abstract	<p>本研究では、都市全域を対象としたインフラ防災・環境制御システムの構築を最終目標とし、都市全域を覆う無線センサネットワークによる実空間情報の生成手法を開発した。具体的には、無線センサネットワークを、実空間の生データ計測と物理シミュレーションの統合による実空間情報生成のための分散処理装置と位置付け、平常時の粗い計測・計算を処理する省電力CPUと災害時の高精度計測・高速演算処理を担う高機能CPUの両者を搭載し、必要に応じて切り替わるハイブリッド・センサノードを開発した。このセンサノードを用いた無線センサネットワークにより、高精度GPS測位、環境データ計測、構造物損傷の直接同定が可能である。</p> <p>In this project, system for automatic generation of real-space information by city-scale wireless sensor network has been developed. Wireless sensor network is considered as a parallel processing device for generation of real-space information by integrating sensing and simulation. For this sensor network, a hybrid sensor node equipped with low power CPU and high power, high performance CPU has been developed. This sensor network can perform high accuracy GPS localization, environment data measurement and direct identification of structural damage.</p>
Notes	研究種目：基盤研究(A) 研究期間：2010～2014 課題番号：22246062 研究分野：応用力学
Genre	Research Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_22246062seika">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_22246062seika</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246062

研究課題名(和文) センシングと実空間シミュレーションの統合によるインフラ防災・環境制御手法の開発

研究課題名(英文) Development of methods for disaster prevention of civil infrastructure and environment control by integration of sensing and real-space simulation

研究代表者

小國 健二 (OGUNI, KENJI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：20323652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、都市全域を対象としたインフラ防災・環境制御システムの構築を最終目標とし、都市全域を覆う無線センサネットワークによる実空間情報の生成手法を開発した。具体的には、無線センサネットワークを、実空間の生データ計測と物理シミュレーションの統合による実空間情報生成のための分散処理装置と位置付け、平常時の粗い計測・計算を処理する省電力CPUと災害時の高精度計測・高速演算処理を担う高機能CPUの両者を搭載し、必要に応じて切り替わるハイブリッド・センサノードを開発した。このセンサノードを用いた無線センサネットワークにより、高精度GPS測位、環境データ計測、構造物損傷の直接同定が可能である。

研究成果の概要(英文)：In this project, system for automatic generation of real-space information by city-scale wireless sensor network has been developed. Wireless sensor network is considered as a parallel processing device for generation of real-space information by integrating sensing and simulation. For this sensor network, a hybrid sensor node equipped with low power CPU and high power, high performance CPU has been developed. This sensor network can perform high accuracy GPS localization, environment data measurement and direct identification of structural damage.

研究分野：応用力学

キーワード：センサネットワーク 実空間シミュレーション インフラ防災 都市環境制御

### 1. 研究開始当初の背景

MEMS 技術の発達に伴い高性能センサが安価に供給可能になった 1990 年代後半, Smart Dust プロジェクトによるセンサノード開発により, センサネットワーク研究は飛躍的に発展した。

土木分野でも, 構造物の常時微動や弱い地震外力に対する応答を, 加速度計を搭載したセンサネットワークで計測し, 橋梁など土木構造物のヘルスマニタリングに用いる研究が多くなされてきたが, これまでに(土木工学分野に限らずとも)センサネットワークが有意義な工学的課題の解決に寄与した例は見られない。

少なくとも, センサネットワーク研究の萌芽期に提唱されていた「都市全域を覆うユビキタス・センシング」は実現されていない。これは, 「欠損を伴う質の悪いデータでも大量に集めれば何か有用な情報が得られるはず」という, センサネットワーク研究分野での信仰を前提に, センサネットワークを工学的課題の解決に適用してきた結果である。

例えば, 加速度計測に基づくヘルスマニタリングなど, 土木工学で要求されるセンサネットワークでは, 欠損のある時系列データは無意味である。計測精度・計算性能・無線通信の距離と信頼性など, あらゆる面において, 既存のセンサネットワークは能力不足である。

上記の考察に基づき, 本研究課題開始以前から GPS on Every Roof の開発を行ってきた。このシステムは, ばらまくだけで「ノード ID の自動割り振り・ネットワークの自動形成・GPS 衛星データ観測・GPS 測位解析(数 mm 精度)・各ノードの位置座標の情報の集約」の一連の動作を 10 分以内に完了する。本研究課題の開始以前に 50 個のセンサノードからなるネットワークの性能検証を終えていた。このシステム開発の成功のポイントは, データ欠損をはばむロバストな無線通信と, 倍精度演算を高速に処理する高機能な組込 CPU を用いた分散並列処理である。

GPS on Every Roof は, 本研究課題で提案する「センシングと実空間シミュレーションの統合」の最初の具体例である。また, 詳細は割愛するが, 平成 22 年度を最終年度とする基盤研究(B)で開発した「時刻同期を確保した稠密多点加速度計測のためのセンサネットワーク」により, 強い地震時の構造物の塑性化検知による被害状況の把握が可能である。以上, 2 つの研究での独自開発技術に, 以下に述べる改良を加えることにより, さらに発展させ, 社会基盤としてのセンサネットワークの構築を目指す。

### 2. 研究の目的

都市全域を対象としたインフラ防災・環境制御システムの構築を最終目標とし, 都市全域を覆う無線センサネットワークによる実

空間情報の生成手法を開発する。

具体的には, 無線センサネットワークを, 実空間の生データ計測と物理シミュレーションの統合による実空間情報生成のための分散処理装置と位置付け, 非常時にも平常時にも利用可能な社会基盤設備としてのセンサネットワークの構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の必達目標として, 「太陽電池による充電機能を備え, 省電力低機能 CPU と高機能 CPU を併せもち, 必要に応じて切り替わるハイブリッド・センサノードの開発」を設定し, 必達目標の達成のため, 初年度にハイブリッド・センサノードの装置開発を終えた。研究計画 2~3 年目に太陽電池による充電機能を完成させ, 4 年目初頭に必達目標に到達した。すべてのステップで, 屋外テストフィールドでの性能検証実験を行い, 実際の環境で使用可能なシステムの構築を図った。

本研究課題では, 都市全域を対象とする工学的課題の解決に資するセンサネットワークとして, 特にインフラ防災・都市環境制御をおこなうシステムの開発を目的として研究を行ってきた。具体的な研究課題として設定した, 「太陽電池によるバッテリー充電機能をもつハイブリッド・センサノード開発」が必要となる理由について簡単に述べ, 「センシングと実空間シミュレーションの統合によるインフラ防災・環境制御手法の開発」と, 設定した研究課題との関係を明確にする。

社会基盤としてのセンサネットワークが受容されるためには, 災害などの非常時のみならず, 平常時にも役立つシステムであることが必須条件である。ところが, センサネットワーク研究の観点からは, 両方で機能するシステムの構築は極めて難しい。これは, 非常時と平常時で求められる計測・演算処理の質が異なるからである。非常時, たとえば強い地震入力に対する構造物の応答の計測のためには, 少なくとも 100Hz 程度のサンプリングレートで加速度を計測しなくてはならない。また, 加速度の時系列データから重要な情報を得るためには単純なフィルタだけでは不十分で, 高度な演算が必要である。一方, 平常時, 例えば環境計測では, 高精度のデータが大量に必要なわけではない。気温・日照などのデータは 1 分に 1 回の計測でも多すぎるくらいである。また, このような粗い計測から得られたデータに高度な演算を施しても, 得られる情報は少ない。ただし, 平常時には放置しておいても稼働し続けるシステムが要求される。つまり, 平常時のシステムに対しては, 省電力への厳しい要求が存在する。したがって, 平常時と非常時, 両方で役立つシステムは, 省電力低機能システムと高機能システムを併せもつシステムでなくてはならない。

以上の考察から, 本研究の必達目標として,

太陽電池による充電機能を備え、省電力低機能 CPU と高機能 CPU を併せもち、必要に応じて切り替わるハイブリッド・センサノードの開発を設定し、その開発と性能検証を行うこととした。

#### 4. 研究成果

##### 【平成 22 年度】

平常時の粗い計測・計算を処理する省電力 CPU と災害時の高精度計測・高速演算処理を担う高機能 CPU の両者を搭載し、必要に応じて切り替わるハイブリッド・センサノードのハードウェアの仕様検討・仕様確定・設計をおこない、プロトタイプを作製した。このセンサノードは、高機能系統(高機能 CPU・加速度計・GPS など、精密かつ高サンプリングレートの計測と、高度な演算を処理する系統)と省電力系統(無線通信装置と一体化した省電力 CPU・日照・温度・湿度センサなど、低サンプリングレートかつデータ長の短い計測と、単純な演算で事足りる系統)とが、ひとつの基板上に実装されたものである。平常時の計測と無線通信を受け持つ省電力 CPU がセンサノード全体の動作を制御するという仕組みにより、高サンプリングレートの加速度計測や GPS 測位解析などの高い計算負荷のかかる作業のみを高機能 CPU に投入する仕様となっている。また、消費電力を抑制しながら GPS 測位解析の信頼性を向上させるために、グラフ理論に基づく測位解析アルゴリズムを新たに開発した。

##### 【平成 23 年度】

平常時の粗い計測・計算を処理する省電力 CPU と災害時の高精度計測・高速演算処理を担う高機能 CPU の両者を搭載し、必要に応じて切り替わるハイブリッド・センサノードのプロトタイプに実装するための組み込みプログラムの開発を行った。これを実装したセンサノードによるネットワークを形成し、ネットワークとしての動作確認・通信安定性の検証・様々な物理量の計測の精度検証のための実験を行った。特に、センサノード間の距離・設置密度・周辺の遮蔽物の配置など、無線通信の制約条件を洗い出し、実際の構造物に展開する時のための知見を蓄えることができた。また、このセンサノードを用いたシステムを長時間駆動させるための太陽電池充電機能の仕様検討にも着手した。更に、当初計画以外の成果として、消費電力を抑制しながら GPS 測位解析の信頼性を向上させるために、参照点ノードの測位データの多様化を担保する測位解析アルゴリズムの新規開発にも成功した。

##### 【平成 24 年度】

ハイブリッド・センサノードの太陽電池充

電機能の仕様策定のための実験を行い、太陽電池によるバッテリー充電機能の仕様を確定した。また、ハイブリッド・センサノードで生成した都市環境に関する情報と、地震などの際の被害状況に関する情報を GIS (地理情報システム) に反映し、情報を集約する仕組みを作成した。都市環境制御のためには、多点計測された日照・温度・湿度・風況などの計測データに基づいて、数分後、数時間後の都市環境の状況を予測するシミュレーション手法が必要であるが、このシミュレーションのためには、都市の地形や構造物の形状などの詳細なデータを作成する必要がある。GIS データから自動的にシミュレーションモデルを生成する手法も開発した。さらに、GPS 測位解析アルゴリズムに改良を加え、消費電力を抑制しながら GPS 測位解析の信頼性と精度を向上させることにも成功した。

##### 【平成 25 年度】

このときまでに開発を進めてきたハイブリッド・センサノードの省電力性能を向上させた。具体的には、通信量を抑制するために GPS 解析をオンボード解析とし、オンボード GPS 解析において必要となる倍精度演算を高速に処理できる高機能 CPU の稼働時間を全所要時間の 2% 以下に抑制した。このことによりセンサネットワークシステムの長期連続稼働が可能となった。また、大学構内において位置計測および振動計測のフィールド実験を行い、データを取得した。さらに、構造物損傷の直接同定のための計測およびオンボード解析システムを全て自動化し、実験室内において検証実験を行った。このシステムを既存構造物に設置することにより、人の手を介することなく強い地震が発生した直後に構造物の損傷を同定することが可能である。

##### 【平成 26 年度】

このときまでに開発を進めてきて省電力性能を向上させたハイブリッド・センサノードの長期連続稼働実験を行った。平成 25 年度より継続して、大学構内において位置計測および振動計測のフィールド実験を行い、データを取得した。このデータを解析することにより、システムの安定性や計測の精度について考察した。さらに、構造物損傷の直接同定のための計測およびオンボード解析システムを全て自動化したものの性能検証実験を行った。当初に目標としていた構造物損傷の直接同定が、当初の目標どおりの精度で自動的に行われることを確認した。

以上により、本研究の目標であったインフラ防災(非常時)と環境制御(平常時)に資する情報を生成するセンサネットワークの構築を終えた。

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 20 件)

- (1) Takahiro Kawaguchi and Kenji Oguni, Automatic Conversion of Visually Consistent Digital Maps to Conforming Geometry for Computational Fluid Dynamics, Journal of Computing in Civil Engineering, 査読有, 29, 04015003-1-11, 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000473, 2015.
- (2) Ichidai Nakamura, Masayuki Saeki, Kenji Oguni, Berta Buttarazzi, Michela Basili and Steven D Glaser, Energy-Saving Wireless Sensor Node for Relative Positioning of Densely Deployed GPS Network, Journal of Infrastructure Systems, 査読有, 20, 04014003-1-10, 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000185, 2014.
- (3) 中村一大, 宮崎知洋, 佐伯昌之, 小國健二, 大地震発生時の戸別倒壊状況把握システム用 GPS センサノードの開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, 69(4), I\_87-I\_94, 2013.
- (4) Liping Huang, Kenji Oguni and Muneo Hori, Image Analysis of Measuring Building Configuration for Seismic Damage Estimation, Natural Hazards Review, 査読有, 14, 1-10, 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000086, 2013.
- (5) Naofumi Murata and Kenji Oguni, Behavior of magnetic particles under fluctuating fields considering hysteresis characteristics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, 335, 36-45, 2013.
- (6) Hirotaka Ikeda, Takahiro Kawaguchi, Kenji Oguni, Automatic detection of damage level of structures under the severe earthquake using sensor network, Applied Mechanics and Materials, 査読有, 169, 2216-2220, 2012.
- (7) 近藤真徳, 小國健二, 線形弾性体の動的破壊進展の数値解析手法の提案, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 67(1), 51-66, 2012.
- (8) 斎藤拓馬, 渡邊和樹, 佐伯昌之, 精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法の精度検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 68(2), I\_761-I\_769, 2012.
- (9) 小國健二, 堀宗朗, 無線センサネットワークによる構造物塑性化検知のための計測・解析手法の提案, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 67(1), 13-24, 2011.
- (10) 佐伯昌之, 澤田茉伊, 志波由紀夫, 小國健二, 準静的変位モニタリングのための GPS 無線センサネットワーク, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 67(1), 25-38, 2011.
- (11) 垰本尚葵・佐伯昌之・小國健二, 家屋倒壊推定システムにおけるデータ共有と GPS 測位解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 67(2), I\_429-I\_437, 2011.
- (12) 山下拓三, 堀宗朗, 小國健二, 岡澤重信, 牧剛史, 高橋良和, 大規模有限要素法解析のためのコンクリート非線形構成則の再定式化, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 67(1), 145-154, 2011.
- (13) 小坂未来, 田中美緒, 小國健二, PDS-FEM を用いた破壊解析のための FEM モデルの自動生成手法の開発, 応用力学論文集, 査読有, 14, 113-122, 2010.
- (14) 垰本尚葵, 佐伯昌之, 宮崎知洋, 小國健二, 稠密多点配置を考慮した GPS 相対測位手法の開発, 応用力学論文集, 査読有, 14, 611-619, 2010.
- (15) 宮崎知洋, 小國健二, 垰本尚葵, 佐伯昌之, 大地震発生時の戸別倒壊状況把握のための GPS 無線センサネットワークの通信システムの開発, 応用力学論文集, 査読有, 14, 621-629, 2010.

[学会発表](計 21 件)

- (1) Hiroaki Sumitomo and Kenji Oguni, GPU accelerated Symplectic Integrator in FEA for solid continuum, Simulating information propagation by near-field P2P wireless communication, European Conference on Numerical Mathematics and Advanced Applications (ENUMATH 2013), Lausanne, Switzerland, August 28, 2013.
- (2) Hiroki Ishizuka and Kenji Oguni, Simulating information propagation by near-field P2P wireless communication, European Conference on Numerical Mathematics and Advanced Applications (ENUMATH 2013), Lausanne, Switzerland, August 26, 2013.
- (3) Kenji Oguni, Analysis of dynamic propagation of cracks based on Particle Discretization Scheme Finite Element Method, Society of Engineering Science 50th Annual Technical Meeting, 招待講演, Providence, USA, July 28, 2013.
- (4) Sayako Hirobe and Kenji Oguni, Numerical Simulation of Diffusion Induced Crack Formation in Solids,

- International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2013), Ibiza, Spain, 17 Jun, 2013.
- (5) Michela Basili, Berta Buttarazzi and Kenji Oguni, Application of a wireless sensor network technology based on GPS for structural health monitoring, 22nd IEEE International WETICE Conference, Hammamet, Tunisia, 20 Jun, 2013.
- (6) Kenji Oguni and Masanori Kondo, Particle-based method for dynamic propagation of cracks with energy balance consideration, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences Seattle, USA, May 24-28, 2013.
- (7) Ichidai Nakamura, Tomohiro Miyazaki, Masayuki Saeki and Kenji Oguni, Hybrid Sensor Node for GPS on Every Roof, Proceedings of the International Symposium on Earthquake Engineering, JAE, Vol. 1, 303-310, Tokyo, Japan, November 8-10, 2012.
- (8) Hiroaki Sumitomo and Kenji Oguni, O(N) algorithm for identification of domain isolation by fracture surfaces, Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), J. Eberhardsteiner et.al. (eds.) Vienna, (Austria, September 10-14, 2012)(8 pages), 2012.
- (9) Masanori Kondo and Kenji Oguni, Analysis of dynamic propagation of brittle fracture by PDS-FEM with energy balance consideration, Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), J. Eberhardsteiner et.al. (eds.) Vienna, (Austria, September 10-14, 2012)(15 pages), 2012.
- (10) 佐伯昌之, 精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法の精度検証, 応用力学シンポジウム, 名古屋, 2012年9月4日.
- (11) Kenji Oguni, Wireless Sensor Network for Automatic Diagnosis of Structural Damage, 21st IEEE International WETICE Conference Toulouse, France, DOI 10.1109/WETICE.2012.49, 25 June, 2012.
- (12) Masayuki Saeki, MULTI-HOP POSITIONING Relative Positioning Method for GPS Wireless Sensor Network, 2nd International Conference on Pervasive Embedded Computing and Communication Systems (PECCS2012), Rome, Italy, 26 Feb, 2012.
- (13) Kenji Oguni, Wireless Sensor Network for Post-seismic Building-wise Damage Detection, 20th IEEE International WETICE Conference, 招待講演, Paris, France, 27 Jun, 2011.
- (14) Kenji Oguni, PDS-FEM Analysis of Reinforced Concrete Pier Subjected to Seismic Loading, WCCM-IX (9th World Congress on Computational Mechanics), Sydney, Australia, 20 Jul, 2010.
- (15) Kenji Oguni, Muneo Hori, Takeshi Maki, Shigenobu Okazawa and Yoshikazu Takahashi, PDS-FEM Analysis of Reinforced Concrete Pier Subjected to Seismic Loading, WCCM-IX (9th World Congress on Computational Mechanics), Sydney, Australia, 21 Jul, 2010.
- (16) Miki Kosaka, Mio Tanaka, Kenji Oguni and Yoshikazu Takahashi, Monte-Carlo Simulation of Failure Behavior of Concrete using PDS-FEM, WCCM-IX (9th World Congress on Computational Mechanics), Sydney, Australia, 20 Jul, 2010.
- 〔図書〕(計 1 件)
- (1) 小國健二, オーム社, 応用例で学ぶ逆問題と計測, 2011, 264 ページ.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
小國 健二 (OGUNI KENJI )  
 慶應義塾大学・理工学部・教授  
 研究者番号 : 20323652
- (2) 研究分担者  
佐伯 昌之 (SAEKI MASAYUKI )  
 東京理科大学・理工学部・准教授  
 研究者番号 : 70385516
- (3) 連携研究者  
 該当なし