

センサネットワーク技術を活用した ユビキタス構造モニタリング

倉田 成人

センサネットワークは、ユビキタスコンピューティングの中核をなす基盤技術であり、高度な情報通信機能を有する次世代の建築・都市への応用が期待されている。その適用事例として、無線センサネットワークによるユビキタス構造モニタリングシステムの超高層ビルへの応用を紹介し、実地震時の振動計測を用いたビルのエリアごとの健全性評価手法を示す。

キーワード：センサネットワーク、ユビキタスコンピューティング、構造モニタリング、構造健全性評価、構造損傷評価、無線センサ、スマートネットワーク、MEMS

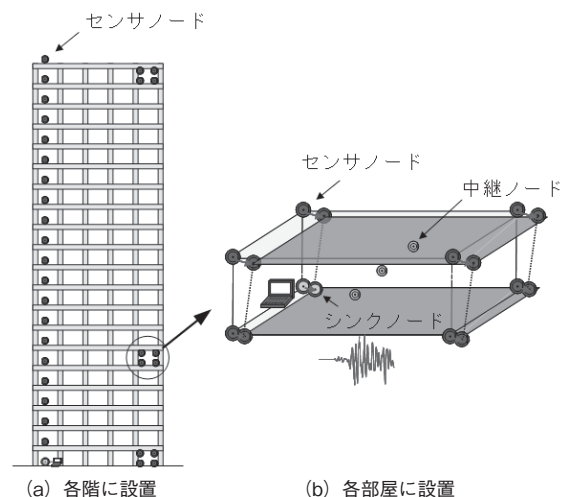
1. はじめに

各種無線センサ、RFID、スマートフォンからスマートネットワーク、クラウドシステムに渡り、情報通信技術の研究開発が進められ、広い意味でのセンサネットワーク技術が様々な分野において応用されつつある^{1)~4)}。建築分野でも、構造、環境、生産、計画、防災等で、センサネットワーク技術を利用したアプリケーションが実現しつつあるが^{5)~11)}、本格的な普及はこれからである。適用事例として、無線センサネットワークによるユビキタス構造モニタリングシステムの超高層ビルへの応用を紹介し、実地震時の振動計測を用いたビルのエリアごとの健全性評価手法を示す。

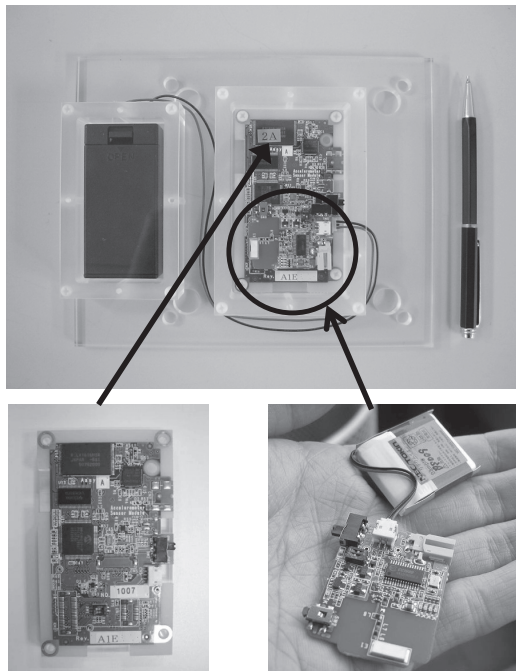
2. 無線センサネットワークによるユビキタス構造モニタリング

無線センサネットワークは、センサモジュールの超小型化と大量生産による低コスト化を実現するMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の発展を背景に、アドホックネットワーク、マルチホップ通信といったスマートネットワーク技術を組み合わせ、センサをばらまくがごとく遍在させるための技術である。元々は、米国防総省による Smart Dust プロジェクトによるもので、航空機で無線センサネットワーク・モジュールを散布し、敵軍の軍事車両の活動をモニタリングしようとして開発が進められた。こうした技術を構造工学、地震工学に応用すれば、従来とは比較にならないほど、超高密度な (ユビキタスな)

構造モニタリングや、地震観測の実現が期待できる(図一1参照)。これにより、少ない台数の高価なセンサに頼らざるを得なかった構造ヘルスマニタリングの課題を解決できる。しかも、無線センサネットワーク・モジュールは、演算機能を持つスマートセンサでもあるから、センシングだけではなく、様々な付加機能を持たせることが可能である。こうした着想から、筆者らは「ユビキタス構造モニタリング」を提案し^{12), 13)}、東京大学先端科学技術研究センター・森川研究室と共同で研究開発を進めている。まず、構造モニタリングに必要な性能として、小地震から大地震までを対象として、地震観測から超高層ビルでの振動計測までを可能とすることを念頭に、振動台を用いたベンチマークテストにより MEMS 加速度センサ (最大加速度 2 G) を選定した¹³⁾。これに加え、フィルタ、A/D コンバー



図一1 ビルのユビキタス構造モニタリング



(a) 加速度センサボード (b) 無線通信モジュール

写真-1 ユビキタスセンサモジュール

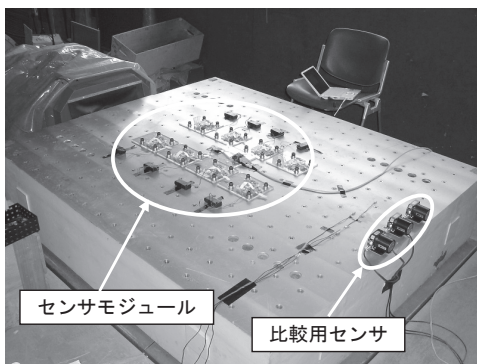


写真-2 振動台による性能確認

タ、SRAM等を搭載した加速度センサモジュールを製作し、無線通信モジュールと組み合わせた「構造モニタリング用ユビキタスセンサモジュール」(写真-1)を開発した。本センサモジュールによる構造モニタリングでは、センサモジュール間の関係を分析するため、振幅に加えて位相の情報が重要であり、センサモジュール間の時刻同期が取れている必要がある。こうした計測機能と時刻同期機能について、振動台実験により性能を確認した(写真-2)^{6), 14)}。

3. ユビキタス構造モニタリングシステムの開発

ユビキタス構造モニタリングシステムでは、図-1に示したように、ビルの各階やビル内の各部屋に超高密度にセンサノードを設置することを想定している。図-1(b)のように、システムは、制御用PCに接続

されたシンクノード、中継ノード、及びセンサノードで構成される。シンクノードは、常時は全センサノードに時刻同期パケットを送りながら、ノード間で1ミリ秒以内の時刻同期を確保する。すべてのノードは、常に精密にサンプリング周波数100Hzで加速度センサによる計測を行いメモリにデータを保持する。シンクノードは、設定した閾値に応じて地震のイベント発生/終了を検知し、イベント終了後、全センサノードにプレトリガー分を考慮した記録を無線で送るように指令する。センサノードは、シンクノードからの指令に応じて、メモリ上の必要なデータを無線で送る。シンクノードは、1台ずつ全センサノードからデータを受信し、接続されたPCに記録する。すべての記録を収集した後に、次の地震への待機状態となる。

前述のように、超高密度なセンシングを実現するためには、シンクノードとセンサノード間の無線通信を1対1で行うことができるとは限らず、必然的にノード間をマルチホップさせるような通信手法が必要となる。そこで、シンクノードとセンサノード間に中継ノードを設置して、マルチホップ通信しながら時刻同期を取り、計測データを収集するシステムを開発した。本システムでは、ネットワーク全体の時刻同期プロトコルとして、Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP)を採用した¹⁴⁾。FTSPでは、送信側、受信側でタイムスタンプを取ることで、一方向の同期パケットの送信だけで、1us程度の精密な同期を実現することができる。FTSPにより、アドホックにネットワークを構築する手順は、下記の通りである。

- (1) シンクノードから各センサノードへパケットを送信
 - (2) 目的のセンサノードへパケットが最初に届いた経路を設定(中継ノードを介しても介さなくても良い)
 - (3) 設定された経路によりセンサノードからシンクノードへパケットを送信
 - (4) シンクノードへパケットが届かなければ、再度シンクノードからパケットを送信し、経路を再設定
- 各センサノードにより計測されたデータの収集に当たっては、1回のリクエストで8パケット(8サンプル)が送信されるが、もしデータロスが発生すれば、ロスしたデータのみを再送することとしており、すべてのデータが収集される。

マルチホップ通信による時刻同期性能を確認するために、シンクノード、3台のセンサノード、及び30台の中継ノードを、地震の揺れを再現できる実験装置である振動台に固定し実験を行った(写真-3)。シンクノードから時刻同期の為に各センサノードへ送られる時刻同期パケットは、センサノード1及び2はシ

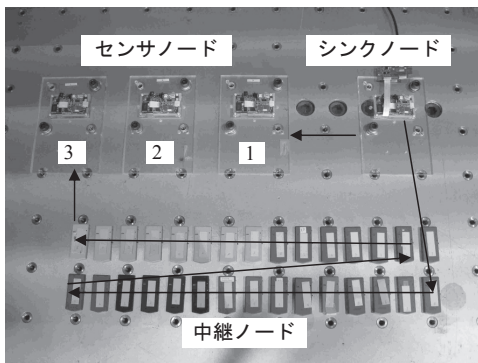


写真-3 振動台によるマルチホップ通信実験

シングルホップで受信，センサノード3は30台の中継ノードをマルチホップして受信することとした。動的に通信経路を構築するアドホックネットワーク機能も実装しているが，振動台上では距離が短く，全てのセンサノードからシンクノードへ直接通信ができてしまうため，時刻同期パケットをマルチホップする通信経路を予め固定して実験を行った。センサノード3とセンサノード1による計測波形のフーリエ振幅スペクトル比を取った結果を図-2 (a) に示す。マルチホップ通信により時刻同期を行ったセンサノード3による

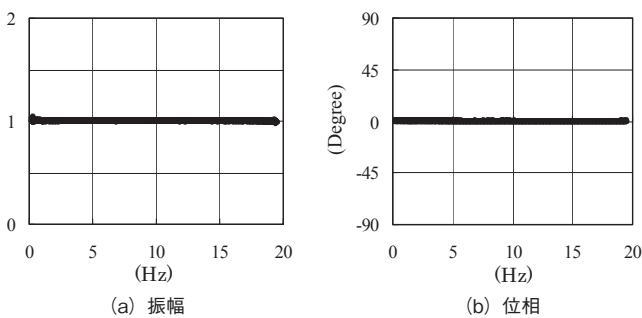


図-2 センサノード3と1のフーリエスペクトル比

計測で，シングルホップのセンサノード1と同等の振幅特性が得られていることがわかる。また，センサノード3とセンサノード1のフーリエ位相スペクトル比を取った結果を図-2 (b) に示す。両センサノード間には位相遅れが無く，時刻同期が取れていることがわかる。

4. 超高層ビルへの適用とエリアごとの健全性評価

開発したユビキタス構造モニタリングシステムを超高層ビルに適用し，2009年4月から2011年2月まで，震度1以上の地震による揺れを観測して，実地震による性能を確認した⁶⁾。対象建物は，秋葉原地区に建設された地上31階，塔屋1階，地下2階のオフィスビルである(図-3)。その6階のオフィスに本システムを設置した(写真-4)。図-4, 5に示すように，本システムは，1台のシンクノード①，7台のセンサノード(②~⑧)，3台の中継ノード(21, 23, 24)により構成し，アドホックネットワークとマルチホップ

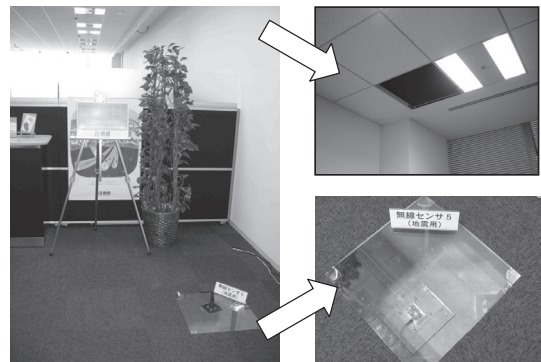
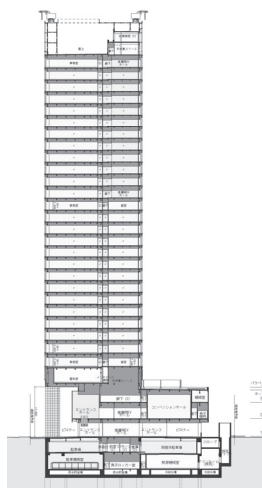


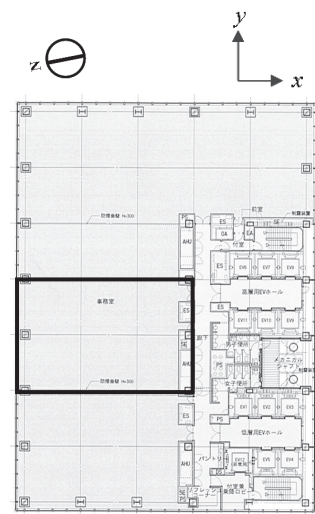
写真-4 システムを設置したオフィスと設置状況



(a) 建物外観



(b) 断面図



(c) 6階平面図

図-3 システムを設置した超高層ビル

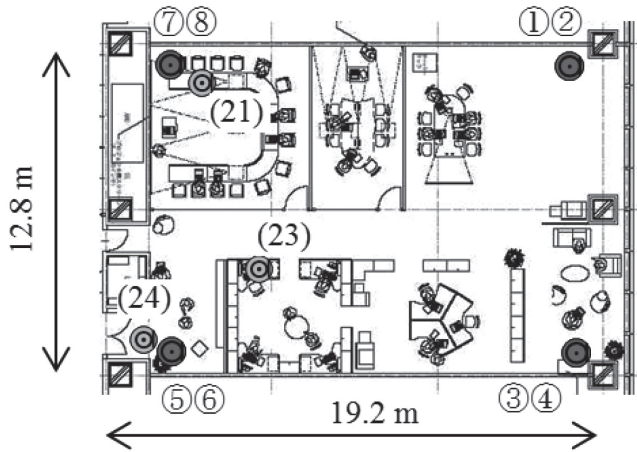


図-4 平面図

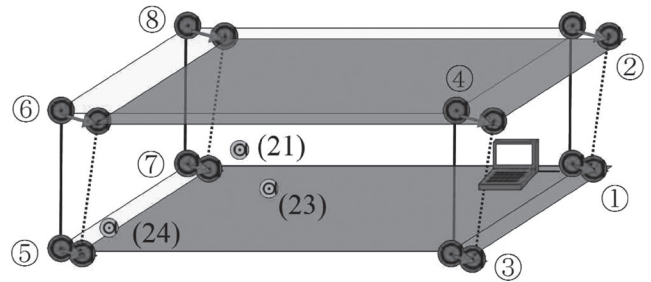


図-5 センサノードの配置

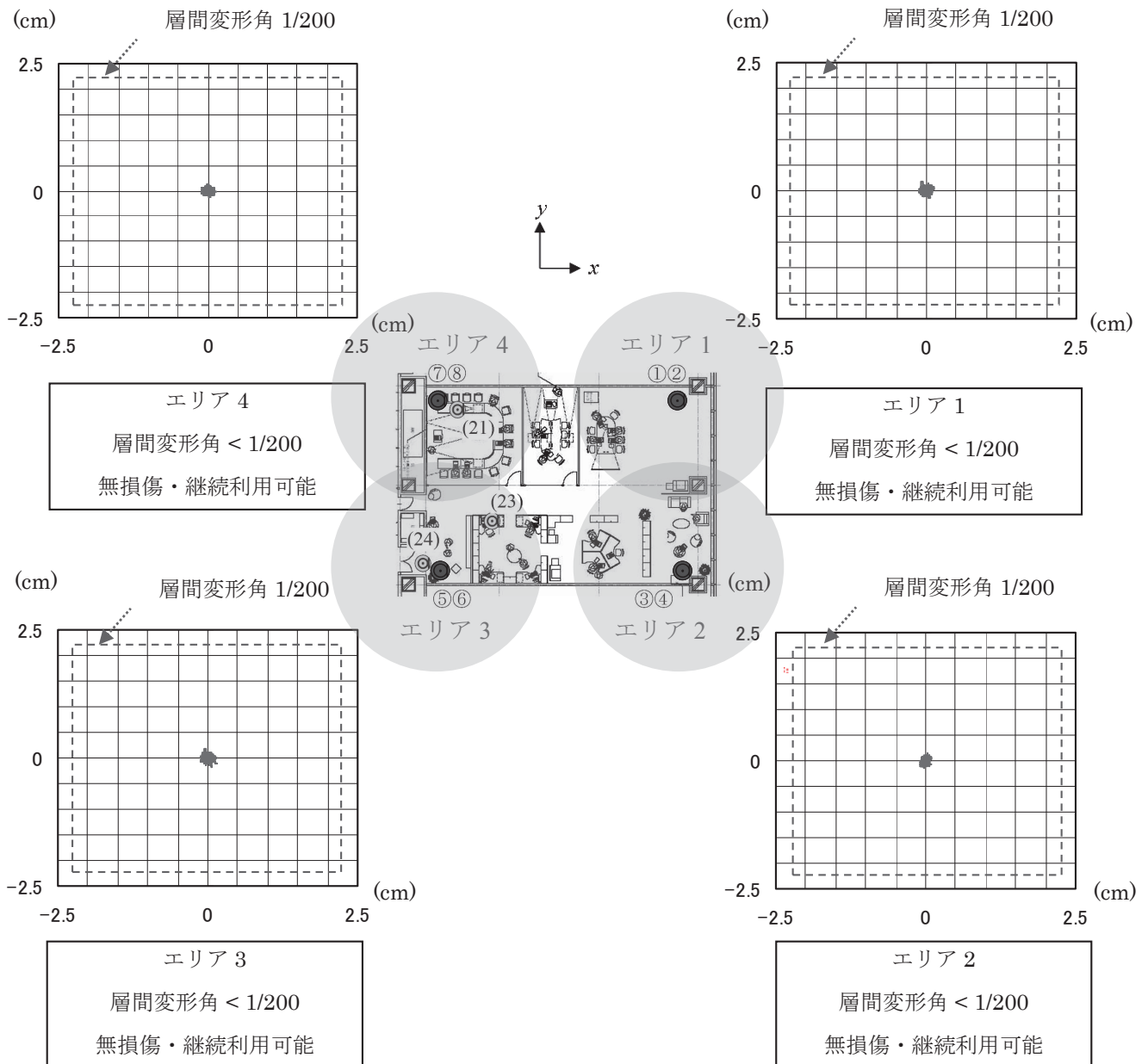


図-6 駿河湾地震に対するエリアごとの層間変形角と健全性評価

プ通信機能を実装した。

高さ 60 m 以上の超高層ビルの設計においては、建築基準法により、時刻歴応答解析が義務づけられ、稀に発生する地震動（レベル 1）によって建築物の構造耐力上主要な部分が損傷を受けないこと、極めて稀に発生する地震動（レベル 2）によって建築物が倒壊、崩壊等しないことを確認することとなっている。詳細に述べると、レベル 1 の地震動に対して層間変形角 1/200 以下で構造部材が損傷しないこと、レベル 2 の地震動に対して層間変形角 1/100 以下で構造部材の塑性化は許容するものの倒壊、崩壊等をしないで人命を守るということである。つまり、耐震設計された実際の超高層ビルで、ある地震による揺れがセンシングでき、何らかの形で最大層間変形角が算出できれば、1/200、1/100 を目安として、その層が損傷していないかどうかを大まかに評価できる。本システムでは、加速度をセンシングしているので二重積分により変位が得られ、天井に設置したセンサのデータから床に設置したセンサのデータを時刻歴上で引き算することで層間変形が算出できる。図-6 に、駿河湾地震（2009 年 8 月 11 日、東京都千代田区にて震度 4）に対するモニタリング結果を示す。センサ配置は図-4 に示す通り、1 つの部屋の四隅それぞれの天井、床にセンサノードを設置した。震度 4 の揺れであるため、当然ではあるが、図-6 に示す各エリアでは、層間変形角が 1/200 を大幅に下回っており、構造部材は全く損傷しておらず、健全であることがわかる。この例では 1 つの部屋を対象としているが、同じようにビル全体を対象として考えることもできる。天井と床を 1 つの単位としてセンサノードを設置すれば、地震時に、その周辺の構造部材が損傷していないかどうかを評価することができ、センサノード設置箇所分だけ高密度に、きめ細かく、ビル内のエリアごとの健全性評価、あるいは損傷評価が可能となる。

5. おわりに

本稿では、ユビキタスコンピューティングの中核をなす基盤技術であるセンサネットワークの適用事例として、無線センサネットワークによるユビキタス構造モニタリングシステムの超高層ビルへの応用を紹介し、実地震時の振動計測を用いたビルのエリアごとの健全性評価手法を示した。

JCMA

《参考文献》

- 1) 総務省：平成 23 年版情報通信白書。
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/index.html>
- 2) 猿渡 俊介, 森川 博之：社会創造に資するセンシングプラットフォーム, 情報処理学会誌, vol. 51, no. 9, pp. 7-14, September 2010
- 3) 倉田成人：建設分野におけるセンサネットワークの応用, 電子情報通信学会誌, Vol. 89, No.5, pp.424-429, 2006
- 4) 倉田成人：ユビキタス・センサネットワークの建築・都市への応用, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2007-5, May 2007
- 5) N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari and H. Morikawa : Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System using Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE) , Beijing, China, October 2008
- 6) N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa : Application of Ubiquitous Structural Monitoring System by Wireless Sensor Networks to Actual High-rise Building, Proceedings of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, July 2010
- 7) 馬郡文平, 野城智也, 迫博司, 藤井逸人：省エネルギー CO₂ 削減のための建築性能モニタリングによる見える化 - AI コントロールを活用した統合的エネルギーマネジメントに関する研究 -, スマートな情報通信技術で実現する建築性能モニタリングの未来像, 情報システム技術部門研究協議会資料, 日本建築学会大会 (北陸), pp. 37-53, 2010
- 8) 中島史郎：建築物の品質管理における IC タグとネットワークコンピュータの活用, ユビキタス社会と建築・都市のフロンティア, 日本建築学会総合論文誌, No.8, pp. 69-72, 2010
- 9) 松岡典克：宅内情報ネットワークを用いた生活行動モニタリングと生活見守り技術, スマートな情報通信技術で実現する建築性能モニタリングの未来像, 情報システム技術部門研究協議会資料, 日本建築学会大会 (北陸), pp. 63-68, 2010
- 10) K. Sasaki, N. Ishii, N. Kurata, Y. Tobe : An assistance system for safe evacuation using wireless sensor networks. Int. Workshop on Sensor Webs, Databases and Mining in Networked Sensing Systems (SWDMNS 2007), Braunschweig, Germany, June 2007
- 11) 倉田成人：防災情報取得の新しい展開, 情報処理学会誌, vol. 51, no. 9, pp. 1150-1156, September 2010
- 12) N. Kurata, B.F. Spencer, Jr., M. Ruiz-Sandoval : Risk monitoring of buildings with wireless sensor networks, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 12, pp.315-327, 2005.
- 13) N. Kurata, S. Saruwatari and H. Morikawa : Ubiquitous Structural Monitoring using Wireless Sensor Networks, Proceedings of 2006 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2006) , Tottori, Japan, December 2006
- 14) 鈴木誠, 猿渡俊介, 倉田成人, 南正輝, 森川博之, “地震モニタリングに向けた高精度分散同期サンプリング”, 電子情報通信学会技術報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2008-91, January 2009

【筆者紹介】

倉田 成人 (くらた なりと)

鹿島建設株式会社
技術研究所 先端・メカトロニクスグループ
首席研究員

