

令和元年6月24日現在

機関番号：12103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01283

研究課題名(和文) チップスケール原子時計を応用した自律型地震センサの開発

研究課題名(英文) Development of an Autonomous Seismic Sensor Applying Chip-scale Atomic Clock

研究代表者

倉田 成人 (Kurata, Narito)

筑波技術大学・産業技術学部・教授

研究者番号：00416869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：地震の揺れを計るセンサにチップスケール原子時計(CSAC)を応用し、自律的に超高精度な時刻情報を付与する技術の開発を行い、3G/LTEエリアや無線LANホットスポットに置くだけで、日本全国に広く地震センサを展開できる技術基盤を確立した。超高精度な時計であるCSACを地震センサに搭載し、GPSやネットワーク等が無くても計測データに正確な時刻情報を付与するメカニズムを実装した。CSACを搭載した地震センサの振動試験装置による性能確認試験等を経て、実建築構造物での時刻同期地震観測を行った。BIMによる3次元モデルを利用して、建築物の構造健全性に関する分析結果を可視化するシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の揺れを計測したデータ分析により、地震現象や構造物の健全性を明らかにするには、センサが正確な時刻情報を取得することが必要である。屋外であればGPSを利用し、屋内であればネットワーク配線を利用して、時刻情報を取得することが一般的であるが、コストと手間がかかり過ぎ、地震センサが様々な場所に設置されるような状況には至っていない。本研究成果によれば、GPSやネットワーク不要で、センサがそれ自体で正確な時刻情報を保持できるので、どのような環境であってもセンサを設置しデータを収集するだけで、時刻同期を確保したビッグデータ群が得られることとなり、より詳細な地震現象の解明や構造物の健全性評価に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：A chip-scale atomic clock (CSAC) has been applied to seismic sensors, and technology has been developed that autonomously adds ultra-high-precision time information to measurement data. Just by installing seismic sensors in the 3G / LTE area and wireless LAN hotspots, a technology base has been established that enables seismic observation to be widely deployed throughout Japan. A mechanism was implemented to mount the CSAC, an ultra-high precision watch, on an earthquake sensor, and to add accurate time information to measurement data without GPS, networks, etc. After the performance confirmation test by the vibration test equipment of the seismic sensor with CSAC was conducted, the time synchronous seismic observation in the actual building structure was performed. A building management system was constructed to visualize the analysis results on the structural health of a building using a three-dimensional model by BIM.

研究分野：建築情報学

キーワード：地震観測 構造ヘルスマニタリング 時刻同期 チップスケール原子時計 アレイ観測 加速度 MEMS
BIM

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震の揺れを計る地震観測システムは、日本初の超高層ビルである霞ヶ関ビルを筆頭に、構造設計の検証や安全性の確認のために導入が進められたが、超高層ビルの建設が珍しくない時代に入り、導入は行われなくなった。その学術的価値は認められていたものの、導入時のイニシャルコスト、運用に当たってのメンテナンスコストが極めて高価であることもあり、原子力発電所等の極度に耐震安全性が求められる構造物以外には、ほとんど導入されていないのが現状である。

(2) 一方、2000年代初めから、情報通信技術の発展に伴って、いわゆるコピキタス技術の研究開発が活発に行われるようになった。また、センサや電子回路を一つのシリコン基板上に集積化することで安価に超小型のセンサを製作できる MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術が確立された。例えば、MEMS を応用した加速度センサチップは、携帯電話やゲームのコントローラ等に搭載され、爆発的に応用が進み、さらなる低価格化と高性能化をもたらした。これらの技術を地震の揺れを計るセンサに応用すれば、地震工学の分野からではなく、情報通信工学の分野から、地震センサの普及が進み、広範に展開することは夢ではないと考えた。そこで、2005 年以来、地震の揺れを計るセンサをすべての建築物に設置することを目標に、MEMS 技術と無線センサネットワーク技術を組み合わせたコピキタスモニタリングシステムの研究開発を行い、実際の超高層ビルに適用して実証実験を行ってきた。

(3) こうした研究開発から得られた本質的な課題は 2 つあり、1 つは電源問題、もう 1 つは時刻同期の問題であった。センサをバッテリーで動かすことは可能であるが、いつ起こるか分からない地震に対して、常に計測状態を維持することは現実的ではなかった。幸い建築物の内部であれば、容易に AC 電源が得られるため、停電時にのみバッテリーを使う方式で成立する。しかし、センサを広範囲に設置することができても、センサ同士の時刻同期が取れていなければ、異なるセンサのデータを統合して分析することができず、意味をなさない。そこで、上記の研究開発では、センサ間で無線パケットを送受信することで時刻同期を行った。一連の研究開発により、1 つの建築物の中にばらまいた多数のセンサの時刻同期を取り、データを収集することは可能であるという研究結果を得ている。しかし、複数の建築物や都市空間、さらには日本全国にセンサを展開することを考えると、センサ間で無線パケットを送受信する方法は現実的ではない。また、複数センサ間の時刻を合わせる従来技術として、GPS 信号を利用する方法があるが、屋外はともかく、建築物の内部、特に地下空間などでは限界がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、地震の揺れを計るセンサにチップスケール原子時計 (CSAC) を応用し、自律的に超高精度な時刻情報を付与する技術の開発を行い、3G/LTE エリアや無線 LAN ホットスポットに置くだけで、日本全国に広く地震センサを展開できる技術基盤を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) CSAC は、ピコ秒 (5×10^{-10} 秒) 級の超高精度時刻測定を実現する時計であり、水晶発振器による計時はもちろん、高精度とされる GPS 信号による時刻合わせに対しても 4 桁程度誤差が少ない。しかしながら、CSAC による時刻情報で、そのままセンサの CPU の水晶発振器を補正し計測を行おうとすると、遅延が生じてしまう。そのため、センサチップからのデータに、CSAC による時刻情報を付与するためのメカニズムを考案する。

(2) CSAC を搭載した地震センサには、地震の発生を検知する機能、地震時の加速度を計測する機能、サンプリングごとに計測データに正確なタイムスタンプを付与する機能、計測データを保存した上でネットワークを経由してサーバへ送信する機能が必要である。これらの機能を分離して、計測を行うセンサボード、地震の発生を検知して計測データにタイムスタンプを付与する制御ボード、データの保存と通信を行う通信ボードとして実現し、これらを組み合わせでパッケージ化する。

(3) CSAC を搭載した地震センサが複数台で時刻同期を行うことができるかどうか、振動試験装置を用いて確認する。複数台の地震センサを振動試験装置上に固定して同じ振動を加え、計測結果を比較する。さらに、本研究による地震センサと比較用サーボ型加速度センサを振動試験装置上に固定し、同じ振動を加えて計測結果を比較する。

(4) CSAC を搭載した地震センサを、3G/LTE エリア、及び無線 LAN ホットスポットに設置し、ネットワーク経由でセンシングデータがサーバへ収集できることを確認する。その際、概ね震度 1 以上の地震の発生を確実に検知し、地震の継続時間中の計測データを転送できることを実証する。

(5) CSAC を搭載した地震センサに、「外部入力」インターフェースを増設し、アナログ出力を

行う一般的なセンサを接続できるように改良する。一般的なアナログセンサとして、変位計、ひずみ計等を対象とする。

(6) CSAC を搭載した地震センサを、建築物に設置し、3G/LTE エリア、あるいは無線 LAN ホットスポットに設置して、実地震に対するセンシングを行う。実地震に対するセンシングデータをサーバへ収集・蓄積し、その分析結果を可視化して、地震センサを設置した建築物の被害の有無、避難の要否等の表示などを可能とする。

4. 研究成果

(1) CSAC による時刻情報で、センサの CPU の水晶発振器を補正し計測を行おうとすると、遅延が生じてしまうことを回避しなければならない。この課題に対し、センサチップからのデータに、CSAC による時刻情報をハードウェア的に付与するため、専用の集積回路 (FPGA) を装備することを考案した。これによりセンサの CPU は負担を受けず、FPGA により付与された CSAC の時刻情報を持つセンシングデータをメモリに保存し、ネットワーク経由でデータを収集することが可能となった。

(2) CSAC を搭載した地震センサをセンサボード、制御ボード、通信ボードで構成した。各ボードは可能な限り市販の製品を利用し、低コスト化を行った。センサボードには、MEMS による加速度センサチップ、温度センサ、A/D 変換器等を装備した。制御ボードには、CSAC と専用の集積回路 FPGA、通信ボードにはデータの保存と通信のために CPU、メモリ、SSD、ネットワーク・インタフェース等を装備した。センサボードは、制御ボードからの指令により、各センサによる計測を行う。制御ボードは、CSAC による超高精度な時刻情報を付与しながら各センサの計測を制御する。通信ボードは、計測データをメモリに保存した上で、データをネットワークへ送信する。計測データは常時計測するデータと、地震のイベントのみを切り出したデータの 2 種類を保存することとした。前者は常に SSD に保存を行い、一定量を過ぎると古いデータを削除し、新しいデータを上書きしていくこととした。後者は、地震の始まりと終了を検知するロジックを FPGA に組み込んでおき、地震後すみやかに地震のイベントのみのデータをネットワークへ送信することとした。ネットワーク・インタフェースとしては、一般的な無線 LAN (Wi-Fi) とイーサネットを装備した。また、3G/LTE による通信も可能とした。また、時刻情報の初期値を取得するために GPS を装備した。

(3) CSAC を搭載した地震センサの時刻同期性能を確認するために、振動試験装置による試験を行った。4 台の地震センサを振動台上に固定して水平 1 方向に対して同じ振動を加え、計測結果を比較した。実験は、2~10Hz のスイープ波を入力波として計測を行った。サンプリング周波数は 100Hz とした。1 台のモジュールをマスターとして、ほかの 3 台 (スレーブ) の加速度計測波形のフーリエ位相スペクトル比を計算した結果より、地震センサ間には位相遅れが見られず、0.001 秒以内の時刻同期が実現できていることを確認した。次に、4 台の地震センサと制御用サーボ型加速度センサで計測した加速度波形に対して、フーリエ振幅スペクトル比を計算したより、後者に対して、前者の 4 台の振幅は、2~10 Hz の振動数帯においてフラットで、 $1.0 \pm 5\%$ 以内となっており、地震センサに搭載した MEMS 加速度センサが良好な性能を有していることを確認した。

(4) 3G/LTE エリア、及び Wi-Fi が提供されている環境で、CSAC を搭載した地震センサを振動試験装置に固定して地震波による振動を加え、センサが地震を検知し、地震終了後にクラウド環境へ 3G/LTE、及び Wi-Fi 経由で計測データを送信できることを確認した。クラウド環境は、AWS Cloud 上で構築した。クラウドと地震センサ間のデータ送受信には、Fluentd を用いた。Fluentd は、複数の場所に分散したデータや常に増え続けるデータの安全な転送・収集・集約・保存を実現するソフトウェアであり、オープンソースで提供されている。

(5) CSAC を搭載した地震センサに、任意のアナログセンサを接続できる「外部入力」インターフェースを増設し、これを利用した場合の時刻同期性能を確認するために、変位計を用いた試験を行った。1 台の変位計の電圧出力を分岐し、「外部入力」インターフェースを増設した 4 台の地震センサに接続した。試験では、変位計の変位を 1 cm ずつ変化させて 4 台の地震センサで計測を行った。4 台の地震センサによる計測結果は一致しており、時刻同期が確保できていることを確認した。これにより、GPS 等が使えない環境でも、様々なアナログセンサの計測データに、CSAC による超高精度な時刻情報を付与することができるようになった。

(6) つくば地区に建設された鉄筋コンクリート造 3 階建ての建物の各階階段室脇の専用スペースに合計 4 台の CSAC を搭載した地震センサを設置した。全センサとも内蔵の MEMS 加速度センサを利用し、2017 年 10 月以降、地震観測を実施している。トリガー設定は概ね 1 cm/sec^2 を超えるレベルとしたが、この期間につくば地区で発生した震度 1 以上の地震時のデータが計測された。各地震について、各階の加速度波形の積分処理により、各層の層間変形を算出した。各層の層間変形と最大加速度分布から、各地震による最大層間変形角、及び最大加速度は小さ

く、建物の構造健全性には影響が無いことを示した。計測データと分析結果の可視化は、別途 BIM (Building Information Modeling, 建築用 3D-CAD) で作成した建築物の 3 次元モデルを利用して行った。地震時の建築物の構造安全性評価方法として BIM を活用した 3D 表現を用いることで、視認性が飛躍的に向上することが確認できた。視認性の向上は、専門知識を有しない建物管理者に対して有効であると考えられる。また、BIM (社会インフラを対象とする場合は CIM と称する) は建設分野に急速に普及しており、建築物や社会インフラの設計から施工、さらには維持管理までの利用が検討されている。BIM による 3 次元モデルをセンシングデータを蓄積し、分析結果を可視化する情報共有プラットフォームとすることは、普及面から意義が大きい。

(7) 上記のように、地震の揺れを計るセンサにチップスケール原子時計 (CSAC) を応用し、自律的に超高精度な時刻情報を付与する技術の開発を行い、3G/LTE エリアや無線 LAN ホットスポットに置くだけで、日本全国に広く地震センサを展開できる技術基盤を確立することができ、研究目標を達成した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

Narito Kurata, Development and Application of an Autonomous Time Synchronization Sensor Device Using a Chip Scale Atomic Clock, Sensors & Transducers Journal, 査読有, Vol. 219, Issue 1, 2018, pp.17-25.

猿渡俊介, 倉田成人, 建築構造物 IoT センサの開発, 応用物理, 査読無, Vol. 86, No. 4, 2017, pp. 350-353.

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, 2016, pp. 185-192.

倉田成人, 構造ヘルスマonitoringのためのビッグデータの活用と課題, 建築雑誌, 査読無, Vol. 1690, No. 11, 2016, pp. 16-17.

[学会発表] (計 13 件)

Narito Kurata, Kiyohiko Hattori, Katsuhiko Temma, Health Monitoring with Acceleration Measurement for Maintenance and Management in World Heritage Angkor Wat, Proceedings of the 11th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, 2019, 2179-2187.

Narito Kurata, Improvement and Application of Sensor Device Capable of Autonomously Keeping Accurate Time Information for Buildings and Civil Infrastructures, Proceedings of the Ninth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, 2017, pp. 114-120.

Narito Kurata, An Autonomous Time Synchronization Sensor Device Using a Chip Scale Atomic Clock for Earthquake Observation and Structural Health Monitoring, Proceedings of the Eighth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, 2017, pp. 31-36.

Narito Kurata, Development of Sensor Module for Seismic and Structural Monitoring with a Chip-Scale Atomic Clock, Proceedings of the 16th. World Conference on Earthquake Engineering, 2017, Paper No.583.

倉田成人, チップスケール原子時計 (CSAC) を搭載した自律型時刻同期センシングモジュール実用版の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2017, pp. 71-72.

濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩, 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との融合, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2017, pp. 1091-1092.

鶴岡湧, 関根明日香, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2017, pp. 1089-1090.

関根明日香, 鶴岡湧, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2017, pp. 1087-1088.

富岡昭浩, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2017, pp. 1085-1086.

Narito Kurata, Basic Study of Autonomous Time Synchronization Sensing Technology Using Chip Scale Atomic Clock, Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, 2016, pp. 67-74.

倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介, 富岡昭浩, 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, 日本建築学会大会

学術講演梗概集（九州），2016，pp. 1-2.

関根明日香，濱本卓司，富岡昭浩，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3）：長期モニタリングに基づく軍艦島 70 号棟の動的挙動に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），2016，pp. 957-958.

富岡昭浩，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，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），2016，pp. 955-956.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：倉田成人

ローマ字氏名：KURATA, Narito

所属研究機関名：筑波技術大学

部局名：産業技術学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：00416869