

建築構造物 IoT センサの開発

猿渡 俊介*, 倉田 成人**

和文要旨 建築構造物 IoT センシングとは、建築構造物で生じる様々な現象をセンサによって取得して建築構造物の健全性の診断を行うことで補強工事の必要性の有無の判断や災害時の避難誘導に役立てたりする技術である。本稿では、建築構造物 IoT センシングの研究事例として超高密度地震モニタリング、軍艦島モニタリング、チップスケール原子

時計を用いたマルチモーダル計測について紹介する。個別の研究を紹介すると同時に、建築構造物 IoT センシングで求められる課題として、時刻同期、エネルギー、建築構造物 IoT センサに不可欠な加速度センサの性能に関して議論する。

1. まえがき

パーソナルコンピュータとインターネットが織りなす情報空間では、人間が思い描いたものは何でも具現化できる。人間の脳はチューリング機械でモデル化できるからである。現在のコンピュータもチューリング機械でモデル化できるため、計算能力の制約を無視すれば、人間の脳で想像可能なことは情報空間上では文字通り全て実現可能である。例えば Oculus VR や PlayStation VR は、人間が想像した物理空間を情報空間上に実現して視覚を通して体験する技術であると捉えられる。

一方で、筆者らの興味は情報空間における「想像したものは何でも具現化できる」という特性を我々が生活するこの物理空間に拡張することは可能であろうか、ということである。現段階では（数百年後になるかもしれないが）技術が進歩さえすれば物理空間と情報空間を隔てるものは存在しないと考えている。そして物理空間と情報空間の統合に向けた初めの一步として位置づけられると筆者らが考えているのが IoT (Internet of Things) である。

図 1 に物理空間と情報空間が連携したモデルを示す。センサによって取得した物理空間の情報を情報空間上で処理してアクチュエータにフィードバックする。このモデルは米国の数学者 Norbert Wiener が提唱したサイバネティクスを基盤にしている。Wiener の主張は基本的には単純で、「情報理論と制御理論を組み合わせると世の中の大抵のことは説明がつく」ということである。センサがあり、情報処理機構があり、アクチュエータがある。この 3 者によるフィードバックをモデル化したのが制御理論であり、それぞれの間の通信をモデル化したのが情報理論である。図 1 のモデルにおいて、センシングとアクチュエーションの高精細化・マルチモーダル化、コンポーネント間通信の広帯域化・低遅延化を実現することが物理空間と情報空間の統合である。そしてセンサによって情報空間に情報を取り込む技術の 1 つに IoT が位置づけられる。

ここで IoT の言葉の定義には注意されたい。図 1 のモデルの高度化に向けて多様な言葉が生まれている。例えば、ユビキタスコンピューティング、サイバーフィジカルシステム、パーベイシブコンピューティング、センサネットワーク、M2M (Machine to Machine)、ビッグデータ、イン

ダストリ 4.0、インダストリアルインターネットなどである。一見バズワードとも思えるこれらの用語について、その意味を個々に問うことは重要ではない。似たような方向性の概念を異なる分野・文化から見た表現であると捉えれば良いだろう。特に、国家プロジェクトのような新しい予算を獲得するためには、説得性のある言葉が求められることが多い。ある概念を表現した別の用語が多方面に拡散するとき、受け止める側がしばしば異なる意味を当てはめることもある。その集積の結果がバズワードの多発である。

2. 建築構造物 IoT センシングとその課題

建築構造物 IoT センシングとは、建築構造物で生じる様々な現象をセンサによって取得する技術である。例えば加速度センサを用いて建築構造物の振動を取得して健康状態を評価、補強工事や避難計画の作成に役立てることができる。現在、高度経済成長期に施工されたビルや橋梁の老朽化が社会問題になっており、建築構造物の健全性を把握することが喫緊に求められている。建築構造物のセンシングに向けて、次の 2 つが技術的な課題となる。

1 つ目の課題は時刻同期である。時刻同期は IoT センサにおいて、センサが分散配置されることと、センサで取得する物理情報が時々刻々と変化することから不可欠である。特に、加速度や音などの周波数の高い現象では、タイムスタンプの同期のみならず、サンプリングのタイミング同期が不可欠である。例えば、複数のマイクを用いて音の発信源を求める場合、同期誤差が発信源の位置の算出精度に直接的に影響を及ぼす。同期誤差の要因は、時刻同期パケットの伝搬遅延、各センサノードが具備するクロックの速度の微小な違い、サンプリングやタイムスタンプの記録におけるソフトウェア処理の実行遅延など多様に存在する。建築構造物や都市に対して多様なセンサを設置して大規模なセンサデータを取得することを考えると、複数の異なる性能を具備したコンピュータや複数の異なる特性のネットワーク上で正確な時刻同期を取ることは極めて困難な課題となる。

2 つ目の課題はエネルギーである。エネルギーは IoT センサにおいて不可欠な「設置の自由度を高める」ために避けては通れない。IoT センサでは、現状ではエネルギーの供給にバッテリーを用いることが一般的である。しかしながら、バッテリーはどうしても容量の制約からは逃れることができない。この数十年間、CPU や無線モジュールなどの半導体で作られたデバイスにおいてスリープ時の消費電力は半導体技術の進歩によって急激な勢いで改善された。一方で、バッテリーのエネルギー密度、CPU や無線モジュールの動作中の消費電力の改善度合いは相対的に小さい。個々のデバイス技術の改善速度の違いに鑑みると、バッテリーの利

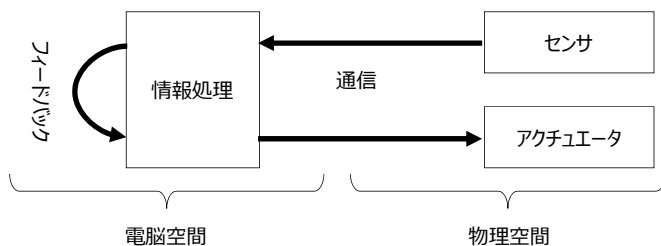


図 1 物理空間と電腦空間の融合

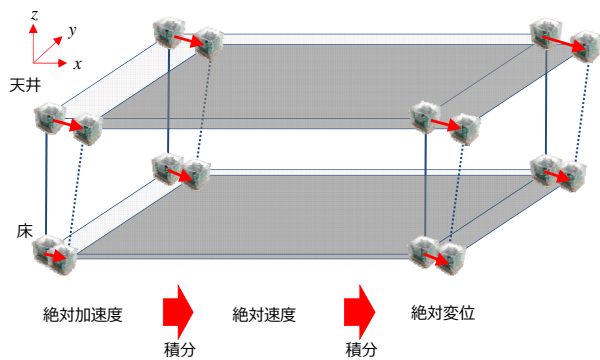


図 2 超高密度地震モニタリング

用から脱却しないことには真の意味でありとあらゆる建築構造物の情報を取得できるようなにはならない。

3. 超高密度地震モニタリング

地震は将来にわたって確実に発生する自然現象であり、巨大地震は人々に甚大な被害をもたらす。防災科学技術研究所が運用する高感度地震観測網は 20 km 毎に設置されており、コストも 1 か所あたり数百万円を要する。数メートル離れた場所でも地盤が異なれば地震による揺れも異なるため、耐震技術の向上に向けては、地震モニタリングのさらなる高密度化と低コスト化が必須である。

筆者らの進めている超高密度地震モニタリングでは、究極的にはありとあらゆる建物に対して、1つの建物あたり数個から数十個の地震センサを埋め込むことを目指している[1]。1つの部屋での動作例を図2に示す。部屋の4隅上下に加速度センサを設置し、地震が来た際に地震期間中の加速度を 100 Hz サンプリングで収集する。取得した加速度サンプルの二重積分から地震時の層間変形(天井と床の変位の差)を算出して建築構造物の健全性判断を行う。

超高密度地震モニタリングシステムは、屋内に設置することを想定して AC 電源で動作することを前提としている(図3)。地震が来た際の停電時でも動作できるようにバッテリーでも駆動する。時刻同期では、100 Hz に相当する 10 ms 毎のサンプリングの 10 分の 1 である 1 ms 以下の精度で時刻同期を実現している。各センサノードは 315 MHz 帯の微弱無線で相互に通信する。無線通信の物理層ではマイコン上のソフトウェアでオンオフ変調の ON と OFF をハードリアルタイムで制御している。すなわち、パケットを送信する瞬間にタイムスタンプをパケットに挿入、

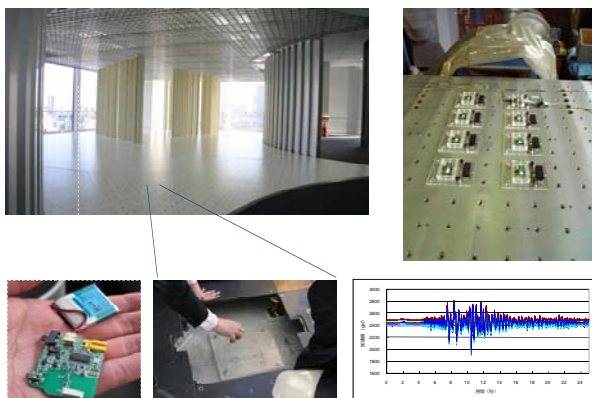


図 3 超高密度地震モニタリングの実験の様子：左の写真は秋葉原ダイビルでの実証実験。手のひらサイズのセンサノードに加速度センサボードを接続して床下に設置した。右の写真は振動台実験で実際に地震波を入力して位相特性、振幅特性、同期サンプリング性能を評価した。

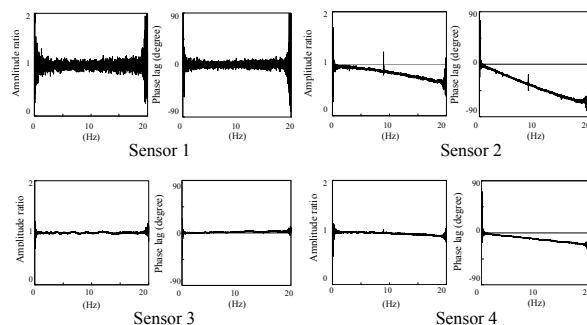


図 4 振動台によるセンサの比較結果：各センサの左側が振幅特性、右側が位相特性である。センサによって特性が全く異なることが分かる。

受信側ではパケットが到着した瞬間にタイムスタンプを取得することで正確な伝搬遅延を見積もることができる。オペレーティングシステムも筆者らの独自開発であり、貧弱なマイコン上でハードリアルタイムを保証できることが特徴である[2]。最先端の研究成果では、無線通信をマルチホップさせた場合に 9 ホップでもマイコンの 1 clock (数 μ s) レベルでの時刻同期が実現されている。

加速度センサとしては、静電容量式の MEMS 加速度センサを用いている。エアバッグやスマートフォンでの利用に伴って多様かつ安価な MEMS 加速度センサが登場した。しかしながら、位相特性・振幅特性・ノイズレベルの観点では地震計測に利用可能なものは限定的である。前述したとおり、健全性診断の過程で取得した加速度は二重積分で誤差の影響も重畳されるからである。特に位相特性・振幅特性はデータシートからは読み取れないため、実際に加速度センサを振動台で試験しなければならない。

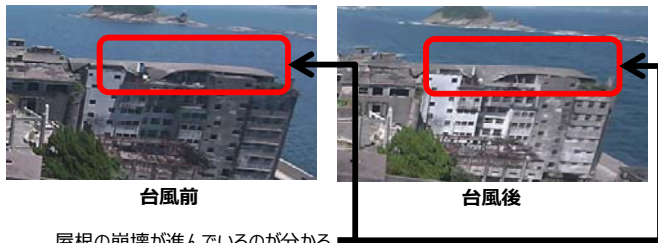
図4に筆者らが行った振動台実験の結果を示す。図4は、実際に地震計測で用いている高価なリファレンス用のセンサと MEMS 加速度センサの計測結果の比をとったものである。X 軸が周波数、Y 軸がリファレンスセンサとの比である。全ての周波数帯において比が 1 であることが望ましい。位相や振幅、あるいはその両方にドリフトが生じているものや、特定の周波数だけ大きなノイズが生じているものなど、加速度センサごとに特性が全く異なることが分かる。多様なセンサの実験の結果、現段階では 1つの計測装置あたり数万円、量産すれば将来的には 1万円以下で実現できる目途が立っている。

4. 軍艦島モニタリング

軍艦島モニタリングでは、実際の建築構造物が崩壊する際の映像・音声・振動データを取得し、劣化・崩壊等を検知することを目的としている[3, 4]。軍艦島では 1916 年に日本初の鉄筋コンクリート造アパートが建設され、一時は東京以上の人口密度を有していた。1974 年の炭鉱の閉鎖に伴って無人化して廃墟となった様態は、巨大地震が発生した後崩壊過程の建築が散在する状況に類似している。経年劣化によって想定できないほどに複雑な崩壊が発生している特異性は世界的にも類を見ない。崩壊中の軍艦島で取得した映像・音声・振動データはデータドリブンの建築構造解析などの新たな技術の礎となる可能性を秘めている。軍艦島は 2015 年に世界遺産に登録されたこともあり、軍艦島に広がる都市空間の崩壊過程のセンサデータは歴史的建造物の記録の観点からも重要である。



図5 赤色がモニタリング対象の建物[4]



屋根の崩壊が進んでいるのが分かる

図6 70号棟の画像

軍艦島には電力のインフラが存在しないため、軍艦島モニタリングシステムに必要な電力は全て太陽光発電で供給している。長崎市の許可を取った上で小さな漁船で軍艦島に上陸すること、軍艦島は崩壊中の建物が複雑に入り組んだ地形であること、太陽光発電設備は建物の屋上に設置する必要があることなどの理由から、ソーラーパネルを大量に設置するのは困難な状況にある。特に軍艦島では屋上が既に崩壊している建物も少なくない。このような太陽光発電の制約により、各センシングシステムは24時間の連続運用はできず、電力状況に合わせて取得データ量の増加とデータロス時間の縮小を両立するように間欠動作している。また、全ての加速度センサはGPS信号を利用して同期している。

図5に軍艦島の地図を示す。赤色の建物の部分が現段階でのモニタリング対象の建物である。図6は70号棟・65号棟を撮影しているカメラからの映像である。70号棟・65号棟を撮影しているカメラは3号棟屋



図7 日本最古の鉄筋 コンクリート造集合住宅 30号棟



図8 自律型カメラシステム

上に設置されている。屋上は比較的広いため、太陽光発電には据え置き型のソーラーパネルを用いている。3号棟に設置したカメラからは、台風が来たあと図6のように実際に屋根が崩壊している様子が観測できた。図7は30号棟を撮影しているカメラからの映像である。30号棟を撮影しているカメラも太陽光発電で駆動しているが、30号棟を至近から撮影するために図8のような移動可能な自立型カメラシステムを開発した。加速度センサに関しては、日本航空電子工業のMEMS加速度センサを計48台設置している。「3. 超高密度地震モニタリング」で用いたセンサは振動が比較的大きい地震時の揺れから建築構造物の健全性を評価することを目的としていたためノイズレベルと同時に価格も重視していた。それに対して、軍艦島モニタリングでは振動が微小な常時微動から建築構造物の健全性を診断していることからノイズレベルの低い高精度なものを用いている。常時微動の解析結果から建物の基礎の一部が支持力を失っていることが確認できている。また、2016年4月14日の熊本地震の際は軍艦島でも建物の揺れを計測した。地震前後で建物の固有振動数を比較したところ、この地震での構造的な損傷は生じていないことが確認できた。成果の一部は公開しているため、詳細はプロジェクトのウェブページ[4]を参照されたい。

5. チップスケール原子時計を用いたマルチモーダル計測

建築構造物、社会インフラ、あるいは都市を対象としたマルチモーダル計測を行い、データを分析するためには、そのデータの位置情報と時刻情報が必要である。しかしながら、正確な時刻情報を確保することは簡単ではなく、GPSやネットワークを介した時刻同期が必要となる。前述した「3. 超高密度地震モニタリング」では無線ネットワークを介して時刻同期、「4. 軍艦島モニタリング」ではGPS信号を用いて時刻同期している。無線技術を使ってセンサ間の時刻同期を行う方法は広域での利用に制約があり、屋外でGPS信号を使う方法はビルの中や地下、トンネルなどでは利用できない。この問題を本質的に解決するために、チップスケール原子時計 (CSAC: Chip Scale Atomic Clock) を利用して、センサが自律的に高精度な時刻情報を保持するセンシングシステムを開発した[5]。表1に示す通り、CSACはボード上に実装できるほど小型で低消費電力でありながら、ルビジウム原子時計に近い計時精度を有し、水晶発振器による計時よりも圧倒的に高精度である。CSACをセンサモジュールに実装すれば、自律的に正確な時刻情報を保持できるため、計測データを収集し、データベース上で時刻情報に合わせた並べ替えをするだけで良い。また、アナログ型のセンサであれば、専用のインタフェースボードを介して接続することができ、データ収集のための手段を選ばない。すなわち、有線LANだけでなく3Gが使えるエリアやWi-Fi

ホットスポットにセンサを設置するだけで、時刻同期を確保したマルチモーダル計測が可能となる。

一般的なセンサモジュールは、CPU、センサ、フィルタ、A/D変換器、メモリ、ネットワークインタフェース等を装備しているが、CSACを高精度な時計としてボード上に実装することは可能である。しかしながら、センサモジュールのCPUにより、CSACの時刻情報を計測データに付

ール原子時計を用いたマルチモーダル計測について紹介した。2節で課題として時刻同期とエネルギーを紹介したが、もう1点課題を挙げるとするならばMEMS加速度センサである。筆者らは、この15年間、建築構造物IoTセンシングの研究を行ってきたが、真の意味でありとあらゆる建築構造物にIoTセンサを埋め込むためには必要なのは小型・安価・高精度・低消費電力を全て兼ね備えたMEMS加速度センサの登場である。最大1000 Hzで0~2 Gの加速度を 1×10^{-8} G rms/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の精度で取得、位相特性・振幅特性がフラット、100 MB分の加速度データをフラッシュメモリに一時的に蓄積、1 mW以下の電力で動作、A/D変換器内蔵、1000円以下の価格が全て満たされる統合チップが実現できれば世界を変えることができる。物理空間と脳空間の融合に向けた初めの一步として、建築、土木、物理、デバイス、ソフトウェア、通信など多くの分野の研究者と協力しながら建築構造物IoTセンシングの社会展開を目指したい。

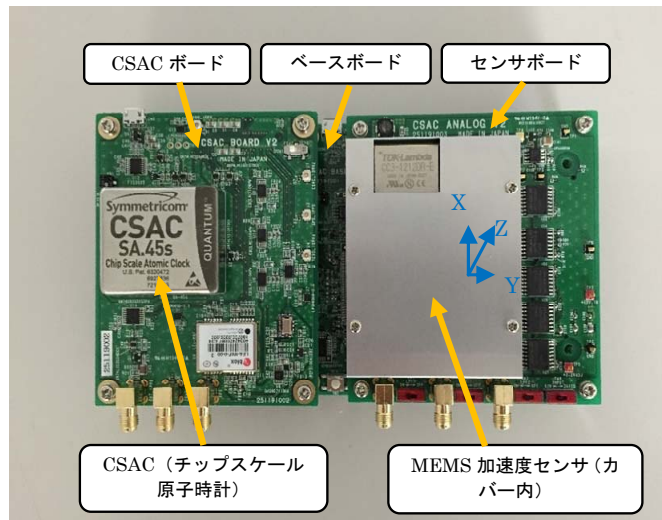


図9 CSACを搭載した自律型時刻同期センサモジュール

加しようとする、CSACの計時精度が高すぎて遅延が生じるためにCSACの性能を生かし切れないという問題が生じる。これを解決するために、専用のFPGAを装備した。FPGAを利用してCSACの時刻情報を計測データに付加することにより、センサモジュールのCPUは負荷を受けず、正確なタイムスタンプを計測データに付与することができる。開発したセンサモジュールを図9に示す。開発したCSACを搭載したセンサモジュールの時刻同期性能を振動台実験(図10)により確認し、現在、実際の橋梁や高速道路に設置して維持管理技術への応用を目指した実証実験を行っている(図11)。

表1 様々な時計・発振器

	セシウム 原子時計	ルビジウム 原子時計	CSAC	水晶 発振器
1秒狂うの にかかる 時間	5万年	1000年	1000年	1日
大きさ	0.1 m ³	1000 cm ³	1 cm ³	10mm ³
消費電力	50 W	数10W	30mW	10μW

6. あとがき

本稿では、建築構造物IoTセンシングシステムとして筆者らが取り組んでいる超高密度地震モニタリング、軍艦島モニタリング、チップスケ

7. 謝辞

軍艦島モニタリングは科学研究費補助金(26289194、代表:濱本卓司)の助成を受けたものである。長崎市世界遺産推進室の特別な許可の下、日本航空電子の富岡昭浩氏のサポートを受けて実施した。チップスケール原子時計を用いたマルチモーダル計測に関する開発は、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」において、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務として実施したものである。

8. 参考文献

- [1] Narito Kurata, Makoto Suzuki, Shunsuke Saruwatari, and Hiroyuki Morikawa, "Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System using Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), 2008.
- [2] Shunsuke Saruwatari, Takuya Kashima, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama, "PAVENET: A Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks," Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. E-S-1, No. 1, pp. 74-84, 2005.
- [3] 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1: 研究計画と予備計測/長期計測," 社団法人日本建築学会学術講演梗概集, 2015.
- [4] 軍艦島モニタリングプロジェクト, <http://sarulab.inf.shizuoka.ac.jp/battleship/>.
- [5] Narito Kurata, "Development of Sensor Module for Seismic and Structural Monitoring with a Chip-scale Atomic Clock," 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE), 2017.

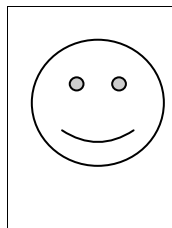
Profile



図10 振動台実験

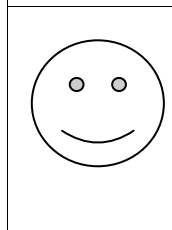


図11 設置したモジュール



猿渡 俊介 (さるわたり しゅんすけ)

2007年東京大学大学院博士課程修了。博士(科学)。東京大学先端科学技術研究センター助教、静岡大学大学院情報科学研究科講師を経て2016年より大阪大学大学院情報科学研究科准教授。ワイヤレスネットワーク、センサネットワークの研究に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。



倉田 成人 (くらた なりと)

1986年東京大学大学院工学系研究科建築学専門課程(地震研究所)修士課程修了。博士(工学)。鹿島建設・小堀研究室、同・技術研究所を経て2014年より筑波技術大学産業技術学部産業情報学科教授。建築情報学、構造工学、地震工学の研究に従事。日本建築学会、計測自動制御学会、IEEE、電子情報通信学会各会員。