

無線マルチホップ通信技術を用いた 社会インフラモニタリングシステム

野崎 正典
西川 雅之

久保 祐樹
福井 潔

近年、高度成長期以降に整備した社会インフラ（以下、インフラと略す）の急速な老朽化が社会的な課題となっている¹⁾。そのため、定期的な巡視や点検によるインフラの健全度を把握することに加え、予防保全や危機予測によるインフラの長寿命化が要望されている。従来の橋梁やトンネルなどのインフラの点検方法は、人手による目視や打音検査が主であったが、人員不足や検査精度の観点からセンサー技術を活用した試みが進んでいる。

そこでOKIは、920MHz帯無線を用いた電池駆動可能な無線マルチホップ技術（以下、スリープルーター技術と呼ぶ）と、加速度センサーを組み合わせることで、構造物の振動データを収集し、その振動データから構造物の劣化状況を分析するシステムを開発した。本システムは、データ集約装置とデータ解析用サーバーとの通信に軽量かつ即時性に優れた通信方式を採用することで、通信回線の低コスト化や多地点でのリアルタイム監視を実現している。また本システムは、傾斜センサーや土壌水分量センサーと組み合わせることで、斜面や法面の状態を遠隔で監視することもでき、土砂崩れ監視などの防災分野への適用も期待できる。

本稿では、インフラ監視分野に必要とされるセンサーネットワークシステムの要件を挙げ、特に電源の敷設工事を必要としないスリープルーター技術と、10年以上の連続稼働を実現するエネルギーハーベスティング技術について述べる。最後に開発した無線モニタリングシステムの構成の特徴や機能について報告する。

センサーネットワークシステムの要件

インフラ監視向けの無線モニタリングシステムの構成例を図1に示す。

図では、橋梁やトンネルなどに加速度センサーを備えた920MHz帯無線センサーネットワークシステムを設置し、定期的に収集する構造物の振動データを分析することで、構造物の劣化や異常を検知する様子を示している。

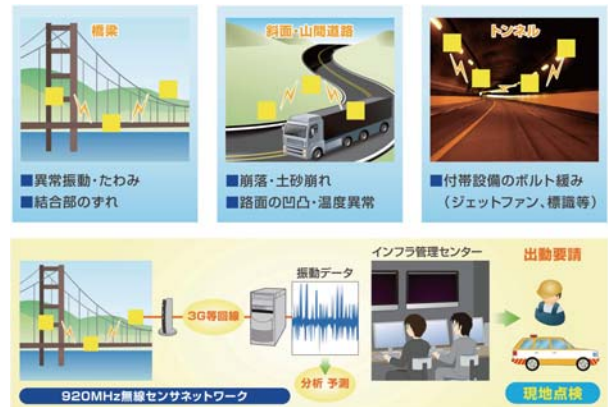


図1 無線モニタリングシステムの構成例

ただし、このような構造物が設置された場所は、電源の確保が困難な場所が多い。そのため、インフラ監視に適用する無線センサーネットワークシステムの要件として、電池での動作が可能な省電力な無線装置が必要となる。また920MHz帯無線は特定小電力無線であり、最大出力に上限があるため、電波の到達距離は数十mから数百mと限りがある。さらに構造物は様々な形状をしているため、必ずしも電波の見通しの良い環境に無線装置を設置できるとは限らない。そのため広範囲にモニタリングを行うためには、測定したセンサーデータを無線で中継する無線マルチホップ機能が必要となる。この様子を図2に示す。無線マルチホップ機能は、無線装置が自律的に周辺の無線装置を探索し、直接通信できない無線装置間においてもバケツリレー的にパケットを中継する技術である²⁾。

一方、従来の無線センサーネットワークでは、中継装置には電源が必要であることが多い。これは無線中継されるパケットは非同期で転送されるため、常に自身宛のパケットを受信可能な状態としておく必要があるためである。そのためインフラ監視向け無線モニタリングシステムの要件として、電池駆動かつマルチホップ中継が可能なスリープルーター機能が必要となる。

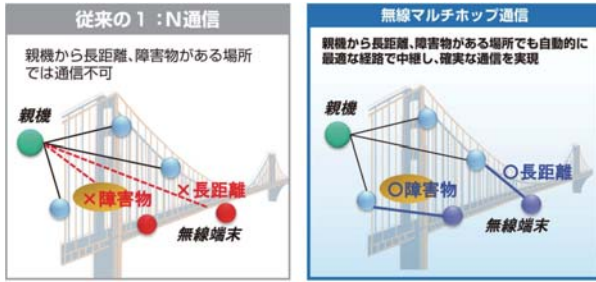


図2 無線マルチホップ通信

また、橋梁は5年に1回の人による近接目視点検が法令で規定されているため、電池交換はその頻度で行うことも考えられるが、設置場所によっては高所作業のための足場設置や重機の稼働費用など、電池交換のコストが増大する場合がある。さらに低消費電力な加速度センサーと異なり、高精度な変位計や腐食センサー、水分量センサーなどの消費電力が高いセンサーを用いた場合、電池で数年動作させることが困難となる。

そのため、環境エネルギーから電力を創出することでシステムの長寿命化を実現するエナジーハーベスティング機能も必要となる。

スリープルーター技術

スリープルーター技術は、MAC層が間欠的にスリープ動作を行い、ネットワーク層と協調動作することで無線装置の省電力化を実現する技術である。MAC層における間欠動作機能は、同期型と非同期型に分類され様々な方式が提案されている³⁾。

参考文献³⁾にあるように、筆者らはX-MAC方式をベースに上位層で受信待機(スニフ)のタイミングをデータの送信方向に合わせて階段状に調整することで、データ中継の低遅延化と省電力化を実現するTURTLE (Time adjUsted Receiving Technique with Low Energy consumption) 方式を提案してきた。本方式では、定期的に受信待機している相手側の受信機に対して、送信側が連続してパケットを送信することで、受信機を起動状態に遷移させている。この時、間欠受信周期あたりの受信待機時間を短くすることで、受信機のスリープ時間を長くすることができるが、そのためには送信側のパケット送信間隔をできるだけ短くする必要がある。

一方、920MHz帯無線の技術基準には、データ送信時間後の停止時間が規定されており、データ送信後は2ms以上の休止が必要となる。そのため従来方式では受信待機時間を2ms以下にできず、電池寿命の長寿命

化に限界があった。ただし、データ送信時間が6ms以下の場合、この休止時間が必要ない。そのため、ショートパケット(100kbpsの伝送速度であれば、75バイト以下)であればパケットの連続送信が可能となる。

そこで、これまでのX-MACベースの提案方式をIEEE802.15.4eで規定されているCSL方式(Coordinated Sampled Listening)に準拠することで、受信待機時間の短縮化を図った。CSL方式の動作例を図3に示す。

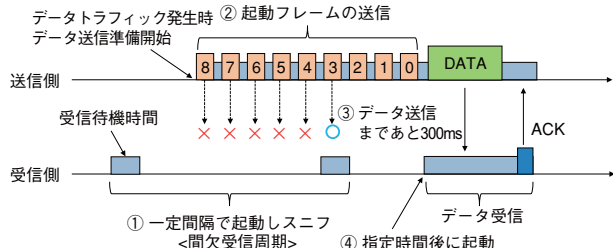


図3 CSL方式の動作例

受信側は間欠受信周期毎に起動し、受信待機時間だけ無線を受信状態とし、自分宛の通信がないかどうかを確認する。・・・①

送信側は、データトラフィックが発生するとデータ送信準備を開始し、何ms後にデータ送信を行うかを記載した起動フレームを送信する。・・・②

受信側が起動フレームを受信すると、フレームに記載された送信予定時刻を参照し、その指定された時間に起動しデータを受信する。・・・③④

このCSL方式では、起動フレームのパケット長は数十バイトとなるため、2msの休止時間を必要とせずに起動フレームの連続送信が可能となる。なお、従来のX-MAC方式からCSL方式に変更することで、受信待機時間は約1/3に短縮することができた。この結果、1日に数回程度の加速度データの送信であれば、電池駆動で5年以上の連続動作の見込みが得られた。

エナジーハーベスティング技術

エナジーハーベスティング技術とは、太陽光や照明光、振動や熱などのエネルギーを収集し、電力を得る技術である。これらのハーベスティング技術を調査したところ、振動や熱での発電は、太陽光発電と比較して発電電力が小さく、無線装置やセンサーを長時間動作させることが困難なため、インフラ監視向けの発電素子としては、太陽光発電が最も適していることが分かった。しかし、太陽光発電では、発電力が天候に左右される

ため、雨天や曇天が長く続くとシステムが停止してしまう恐れがある。そこで本システムでは、二種類の充電電池を備えることにより、曇天などで発電量が少ない場合にも効率的に充電できる構成としている。本システムの機能ブロック構成を 図 4 に示す。

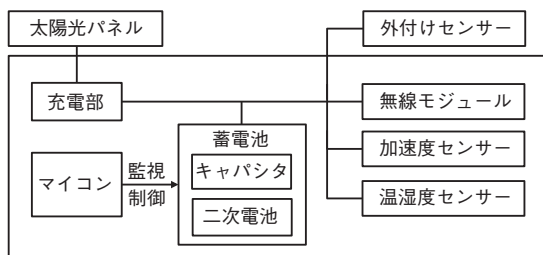


図 4 ハーベスター装置の機能ブロック図

本システムは、太陽光パネルと、太陽光パネルからの出力電圧の昇圧降圧を行う充電部と、大容量の二次電池と、発電量が少なくても充電可能なキャパシタと、充電量と蓄電量を監視し二種類の蓄電池を制御するマイコンから構成される。また、加速度センサー、温湿度センサーと920MHz帯無線モジュール⁴⁾を内蔵しており、外付けセンサーとして土壌水分量センサーも搭載できる構成としている。本システムでは、天候によって変わる発電量に応じて二種類の蓄電池の充放電を適切に制御し、効率的に充電することができる。例えば曇天などで発電量が少ない場合は、キャパシタに充電し、キャパシタの充電量がフルになると二次電池に充電するように制御している。

本構成により、5分に1回程度の加速度/温湿度データの収集であれば、不日照が14日程度続いたとしても連続動作の見込みが得られた。

無線モニタリングシステム構成

今回我々が開発したインフラ監視向け無線モニタリングシステムの構成を 図 5 に示す。

本システムは、加速度センサーの振動データの収集/解析を行う構造物監視システムと、加速度センサーを用いた傾斜センサーと土壌水分量センサーを組み合わせた斜面監視システムの二つのシステムから構成される。本構成では、前述したスリープルーター技術とエナジーハーベスティング技術に加えて、携帯電話回線を用いて遠隔からのデータ収集を可能とするゲートウェイと、センサーデータの保存や分析/解析を行うためのDBサーバーと、無線装置の設定やセンサー情報を地図上に表示する管理端末などから構成される。なお、

ゲートウェイとDBサーバーとの通信は、M2M向け通信プロトコルとして代表的なMQTT(Message Queue Telemetry Transport)を採用している⁵⁾。このためゲートウェイから送信されるセンサーデータは、一旦、MQTTブローカーと呼ばれるヘッドエンド装置に送信され、MQTTブローカーから各種サーバーや回転警告灯などの監視装置に配信される。

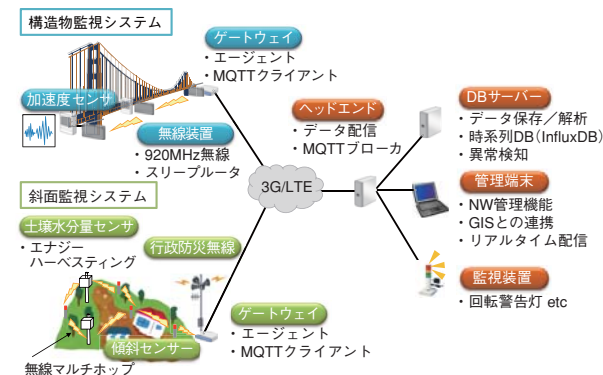


図 5 無線モニタリングシステムの構成

ゲートウェイとDBサーバーには、エージェントと呼ばれるソフトウェアを実装している。本エージェントは、データ書式の変換やセンサーの初期化/閾値設定などの機能を有する。またDBサーバーはマルチアカウント機能を有しており、複数のユーザーでシステムを共有することができる。本機能の一部は、OKIが提供しているクラウドサービスEXaaSの機能を利用している⁶⁾。

従来のデータベースシステムと異なる点は、大量なデータ収集やリアルタイム分析に特化している時系列データベースを採用している点である。時系列データベースは、データの挿入やキーワード検索には時間を要するが、データの追加や時間軸に対する検索が早いという特徴がある。また時系列データベースは、いくつかの集約機能があり、例えば、1分毎に取得したデータに対して15分おきに引いてその間の平均値を求めるなどを容易に行うことができる。さらに時系列データベース向けに用意されているフロントエンドを活用することで、ノンプログラミングで時系列データベースに蓄積されたセンサーデータを簡単に可視化することができる。この様子を 図 6 に示す。

図 6 は3軸の加速度センサーの取得データを示しており、横軸は時間(単位:秒)、縦軸は加速度(単位:Gal)を示している。加速度センサーは2種類のファンに取り付けており、片方のファンは羽根に加工することで、回転軸をずらす処理をしている。図の左図が正常なファンで右図が回転軸の異常なファンの測定結果である。

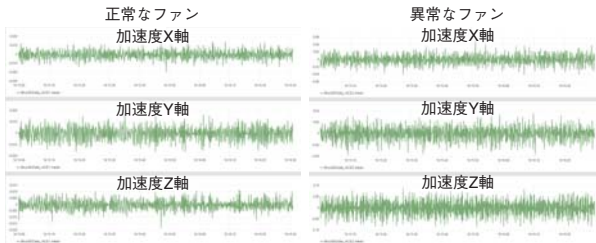


図6 加速度センサーの測定結果

本データでは、右図の振幅値が大きく見えるが、生データだけでファンが異常かどうかを判別することは難しい。そこで本システムでは、生データに対する分析機能として、高速フーリエ変換 (FFT:Fast Fourier Transform) による周波数分析機能を備えている。高速フーリエ変換の結果を図7に示す。

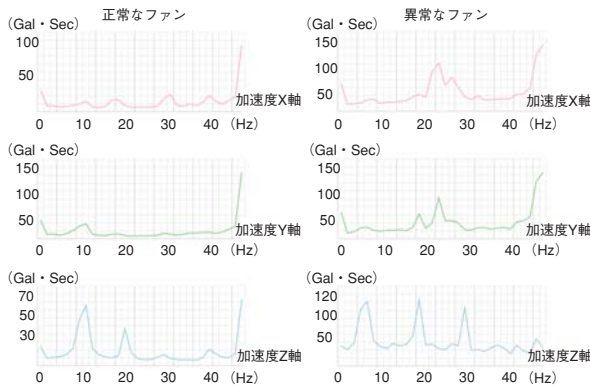


図7 高速フーリエ変換の結果

図の横軸は周波数、縦軸はフーリエスペクトルであり、左図は正常なファン、右図は異常なファンの高速フーリエ変換の結果を示している。正常なファンに取り付けられた加速度センサーのZ軸の周波数成分では、10Hz付近と20Hz付近に2つの強いスペクトルを確認することができる。一方、異常なファンに取り付けられた加速度センサーのZ軸の周波数成分は、30Hz付近にも3つ目の強いスペクトルが現れており、何らかの異常が発生していることを示している。このように加速度センサーデータを分析することで、回転軸の異常を検知ことができ、例えばトンネルのジェットファンのモニタリングなどに適用可能である。同様に、橋梁や構造物に設置した加速度センサーデータを分析し、モード解析や固有振動数の変化をモニタリングすることで橋梁や構造物の異常を検知できるようになる。例えばスペクトルピークが低周波数領域に移動した場合は、固有振動

数が小さくなっており、構造物の剛性低下が想定される。また、スペクトルピークが増える場合は、別の振動パターンが加わっており、例えば橋脚と橋桁を支持する支承の異常の可能性が想定される。

まとめ

920MHz帯無線を用いた電池駆動可能なスリープルーター技術と、環境エネルギーから電力を創出することでシステムの長寿命化を実現するエナジーハーベスティング技術について報告した。これらの技術を活用した無線モニタリングシステムの開発について述べ、加速度センサーデータの分析によるファンの異常検知や、橋梁や構造物の固有振動数のモニタリングへの適用例を示した。

今後はOKIが参加しているモニタリングシステム技術研究組合 (RAIMS)⁷⁾の活動を通じて、フィールドでの実証実験に取り組む予定である。◆◆

参考文献

- 1) 国交省, "インフラ長寿命化基本計画", 平成25年11月
- 2) 野崎, 西村, 久保, 柳原, "スマートネットワーク向け無線マルチホップ通信技術", OKIテクニカルレビュー No218, 2011年10月
- 3) 久保, 中嶋, 野崎, "バッテリー駆動無線センサネットワークにおける低遅延省電力マルチホップ技術", OKIテクニカルレビュー No218, 2011年10月
- 4) 920MHz帯無線通信モジュール <https://www.oki.com/jp/920M/module/>
- 5) MQTT.org <http://mqtt.org/>
- 6) 平野, 瀬戸山, 池田, "プリンタLCMのクラウドサービス拡充", OKIテクニカルレビュー No222, 2013年11月
- 7) モニタリングシステム技術研究組合 RAIMS <http://www.raims.or.jp/>

筆者紹介

野崎正典：Masanori Nozaki. 研究開発センタ スマート社会ビジネスイノベーション推進部
 久保祐樹：Yuki Kubo. 研究開発センタスマート社会ビジネスイノベーション推進部
 西川雅之：Masayuki Nishikawa. 研究開発センタスマート社会ビジネスイノベーション推進部
 福井潔：Kiyoshi Fukui. 研究開発センタ スマート社会ビジネスイノベーション推進部