

設備監視のための無線センサネットワーク導入手法の提案

信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

副主任研究員 羽田 明生

1. はじめに

鉄道設備に対するこれまでの予防保全は、主に時間計画保全であり、その中心は定期的実施される定期検査であった。しかし、鉄道設備に対する全般検査の周期は通常、数ヶ月から2年程度であるため、全般検査直後に異常が発生した場合には、その異常状態が長期間放置されてしまうリスクがある。また、全般検査を含むこれまでの定期検査ではデータの継続的な収集が困難であり、検査対象設備の経時変化傾向を適切に把握することが難しいという問題も存在する。そのため、今後の鉄道設備の予防保全においては、継続的にデータを収集して、状態ベースでの予防保全を行う状態監視保全の重要性が高まることが考えられる。近年、このような状況において、無線センサネットワーク（WSN：Wireless Sensor Network）を活用した設備状態監視が注目されている。ところが、設備状態監視を目的としたWSNは、長期運用が想定されるため、経済性や信頼性を勘案して効率的に導入することが求められる。そこで本発表では、低コスト化を目的として設計されたネットワーク構成案に従い無線センサネットワークを導入する手法を提案する。

2. WSNを活用した設備監視

通常、WSNはセンサ、中継機、データ集約装置から構成される。ここで、中継機はセンサデータを中継する機能を持つデバイスであり、データ集約装置は各センサデータを集約してデータベースサーバまで送信する機能を持つデバイスである。なお、センサも中継機能を持つものとする。各センサデータはマルチホップ無線通信によりデータ集約装置まで伝送され、データ集約装置で受信されたセンサデータは公衆網や専用回線などを用いてデータベースへ送信される（図1）。また、センサや中継機の電源は、多くの場合、それらに搭載された電池である。従って、WSNを継続的に運用するためには、センサや中継機に搭載された電池を電力が枯渇する前に交換するための作業が必要となる。本発表では、低コストなWSNを設計するための数理モデルとその解法アルゴリズムについて報告する。

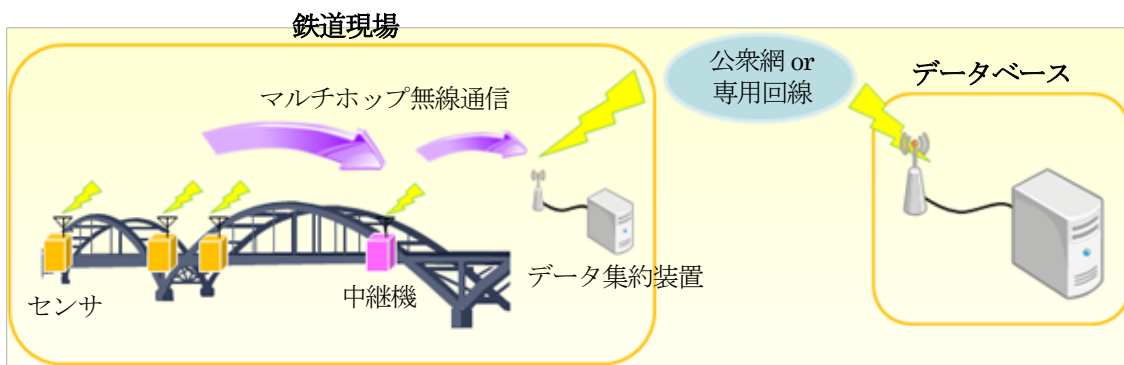


図1 WSNを活用した設備監視

3. 低コストな WSN の設計手法

(1) 問題設定

設備監視を目的とした WSN は、数年から十数年に渡る長期運用が想定される。そのため、WSN に関わる費用低減はシステムの実運用場面における重要な課題の一つであり、これまでも設置費用や運用費用の最小化を目的とした数理モデルが提案されてきた。ところが、これまでの既存研究では設置費用または運用費用のどちらか一方のみを最小化することを目的としており、設置費用と運用費用の総和の最小化が図られていないという問題点があった。つまり、WSN を構築し運用する際に発生する諸費用は互いに密接に関係しており、それらの間には様々なトレードオフ関係が存在する。例えば、中継機を多く設置すると、ネットワーク内の各電池の消費電力量が平準化され、電池交換のための巡回間隔を長くできる傾向にある。加えて、各センサや各中継機の送信出力の設定やセンシングデータを伝送するためのルート計画も、中継機設置費用や電池購入費用などに大きく関係する。そこで本発表では、これらトレードオフ関係にある各種費用を考慮して、WSN の設置費用と運用費用の総和を最小とするように、WSN を設計するための数理モデルを構築した。

WSN の構築においてはセンサ、データ集約装置、中継機を設置するための初期費用が発生する。しかし、センサとデータ集約装置の設置場所は所与である場合が多く、それらの設置費用は埋没費用であると見なすことができる。そこで、WSN の初期費用としては残りの中継機設置費用だけを考慮することにする。また、WSN の運用においては、ネットワーク内の電池を保守担当者が現場を巡回して交換する必要がある。よって、WSN の運用段階においては電池交換のための作業費用が発生する。加えて、WSN の運用段階においては、各電池の電池購入費用についても考慮する必要がある。従って、WSN の構築段階においては中継機設置費用が、そして運用段階においては電池購入費用と電池交換作業費用が発生することになる。

一方、鉄道の設備監視を目的とした WSN は様々な設置環境に導入されるため、これら設置環境の特徴を踏まえて適切に数理モデルを構築する必要がある。設置環境を特徴づける制約条件は数多く存在するが、ここでは WSN 設計において特に重要と思われる次の制約条件を考慮した。

中継機設置に関する制約条件

中継機設置を考慮する場合に必要な制約条件である。中継機設置を考慮する場合には、中継機をそれらを設置可能な場所の中のどこに配置するかを決定するための制約条件が数理モデルに組み込まれる。

データ伝送経路に関する制約条件

センサデータの伝送経路を考慮する場合に必要な制約条件であり、各センサからあるデータ集約装置までのデータ伝送経路を決定するための制約条件が数理モデルに組み込まれる。

送信出力に関する制約条件

センサや中継機に搭載された無線機の送信出力の調整を考慮する場合に必要な制約条件である。送信出力の調整を考慮する場合には、利用可能な送信出力の中から、各センサや各中継機で使用する送信出力を決定するための制約条件が数理モデルに組み込まれる。

このとき、WSN の総費用を最小化するための以下のような数理モデルを考える [1] [2]。ただし、以下ではセンサ、中継機、データ集約装置を特に区別する必要性が無い場合には、これらを単にノードと呼ぶものとする。

WSNの総費用最小設計のための数理モデル

【入力パラメータ】

- センサ設置場所，データ集約装置設置場所，中継機設置候補場所
- 各センサと各中継機で設定可能な送信出力レベル
- 送信出力レベル毎の各ノード間における通信可能性
- 費用パラメータ（電池購入費用，中継機設置費用，電池交換作業費用）
- 電力パラメータ（データセンシング，データ送受信）

【制約条件】

- 中継機の設置場所は，中継機設置候補場所の中から決定される。
- 各センサデータは（必要であれば他センサや中継機を介して）データ集約装置まで伝送する。
- 各センサと各中継機の送信出力は，1つのレベルに設定される。

【目的】

WSNの総費用が最小となるように次を決定する。

- 各センサデータのデータ集約装置までの伝送経路
- WSNのネットワーク寿命（全ての電池が枯渇することなく動作している期間）
- 中継機の設置場所，各センサと各中継機で設定する送信出力レベル

(2) アルゴリズム

上記の数理モデルに対するラグランジアン・ヒューリスティック法を構築した[1][2]。構築したラグランジアン・ヒューリスティック法の実行フローを図2に示す。構築した数理モデルは複雑な制約条件を含むため，直接解くことが難しい。そこで，幾つかの制約条件を緩和することにより比較的解きやすい問題に変形して，その問題の解を最初に計算する。その後，その解が緩和した制約条件を満たすように修正して，本来の数理モデルの解を構築する方法を開発した。

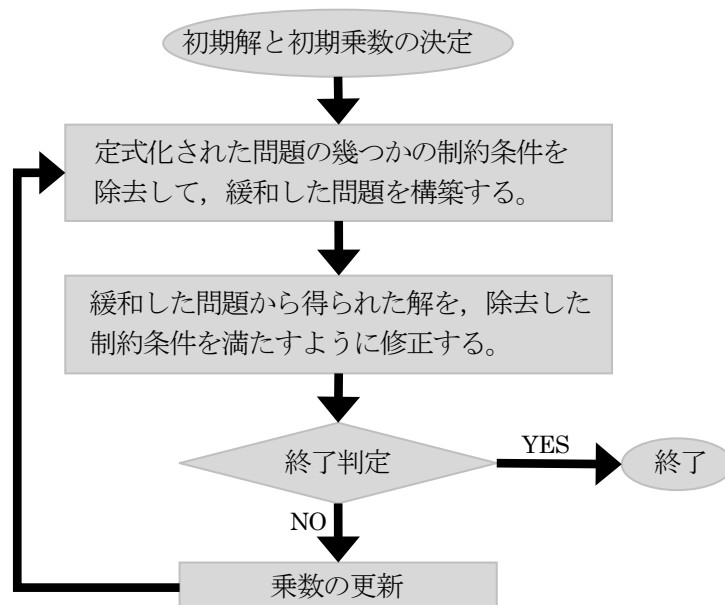


図2 ラグランジアン・ヒューリスティック法

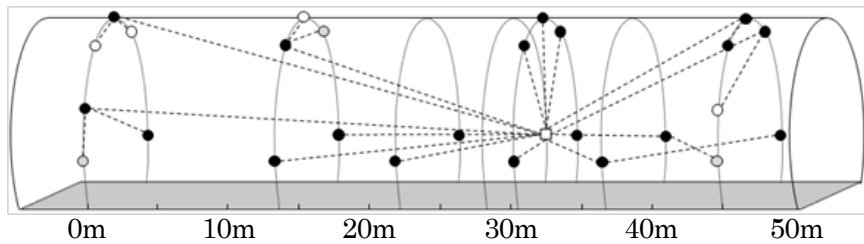


図4 構築した数理モデルを用いて設計したロンドン地下鉄 WSN 設計案[2]

(3) シミュレーション

ロンドン地下鉄は世界で最も老朽化の進んだ地下鉄の1つであり、トンネル内のライニング劣化や土圧による経年変化を監視するためのWSNが2007年にロンドン地下鉄ジュビリー線のパークーストリート駅とボンドストリート駅間に設置された。そこでここでは、ロンドン地下鉄のWSNに上述の数理モデルとラグランジアン・ヒューリスティック法を適用し、その経済性を検証した。

現在のWSNは上記数理モデルの1つの可能解であると思なすことができる。そこで、現在のWSNに対する数理モデルの評価値と、構築したラグランジアン・ヒューリスティック法で求めた近似最適解の評価値を比較した。その結果、構築した数理モデルとラグランジアン・ヒューリスティック法を用いると、現在設置されているWSNは、総費用を約10%削減できることを確認した。提案手法により構築されたWSN設計案を図4に示す。ただし、図4においては、センサ、中継機、データ集約装置をそれぞれ○、△、□で示している。また、データ集約装置を除く各ノードにおける送信出力の違いを塗りつぶしの濃淡で区別しており、白色、灰色、黒色のノードはそれぞれ送信出力を $3.16 \times 10^{-3} \text{mW}$ 、 0.1mW 、 1mW に設定することを示している。

4. おわりに

本発表では、設備状態監視のためのWSNの設計手法を提案した。特に、設計段階において、設置運用費用を考慮してWSNを設計するための数理モデルを提案した。また、提案手法を用いると、設置環境における各種パラメータを考慮した低コストなネットワーク構成案を作成できることを確認した。一方、実際にWSNの運用が開始されると、突発的なノード故障や電池枯渇などの問題が発生するため、ネットワーク構成を動的に変更することが求められる。よって、今後はWSNの運用段階において、動的にネットワーク構成を変更するための数理モデルについて検討する予定である。

参考文献

- [1] Akio Hada, Kenichi Soga, Ruoshui Liu, Ian J. Wassell: "Lagrangian Heuristic Method for the Wireless Sensor Network Design Problem in Railway Structural Health Monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.28, pp.20-35, 2012.
- [2] 羽田明生, 廣瀬壮一: "鉄道構造物ヘルスマonitoringにおける無線センサネットワークの総費用最小化計画", *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.57, No.9, pp.518-523, 2012.