

## 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 (Wireless Sensor Network, WSN) 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、リレー、ゲートウェイから構成される。ここで、リレーはセンサデータを中継する機能を持つデバイスであり、ゲートウェイ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ゲートウェイまで伝送され、ゲートウェイで受信されたセンサデータはインターネットや携帯電話回線などの通信インフラを用いてデータベースサーバへ送信される (図1)。また、センサやリレーの電源は、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、センサやリレー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。

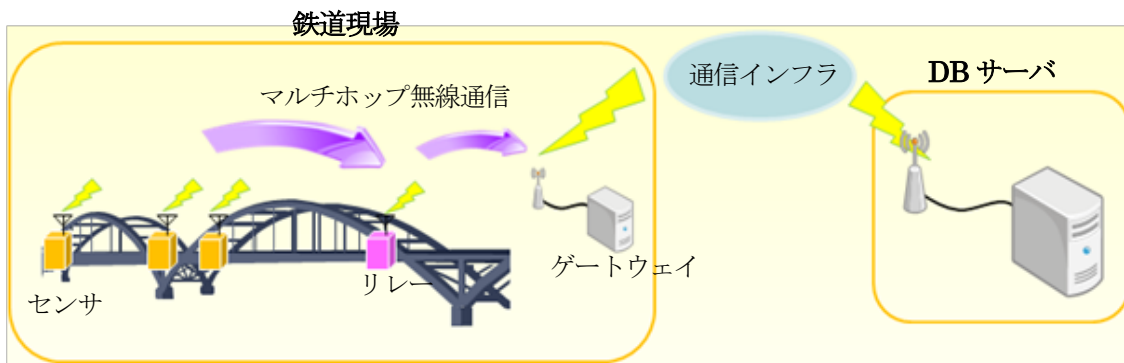


図1 WSN を活用した設備監視

### 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、リレーを多く設置すると、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、各センサや各リレー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、リレー設置費用や電力消費費用などに大きく関係する。そこ本発表では、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、ゲートウェイ、リレーを設置するための初期費用が発生する。しかし、センサとゲートウェイ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リレー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、各電池の電力消費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リレー設置費用が、そして運用段階においては電力消費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。

#### リレー設置に関する制約条件

リレー設置を考慮する場合に必要な制約条件である。リレー設置を考慮する場合には、リレー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、各センサからあるゲートウェイ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

センサやリレー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、各センサや各リレー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、リレー、ゲートウェイを特に区別する必要が無い場合には、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，ゲートウェイ設置場所，リレー設置候補場所
- －各センサと各リレー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（電池消費費用，リレー設置費用，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】

- －リレーの設置場所は，リレー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リレーを介して）ゲートウェイまで伝送する。
- －各センサと各リレーの送信出力は，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。
- －各センサデータのゲートウェイまでの伝送経路
- －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）
- －リレーの設置場所，各センサと各リレー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。このアルゴリズムでは，数理モデルの最適値（総費用の最小値）に対する推定値を利用して，アルゴリズムの各段階で構築した数理モデルの実行可能解を評価する。また，最適値に対する推定値と構築した実行可能解の評価値を比較して，より良い実行可能解が生成されるような乗数調整・探索操作を繰り返す。

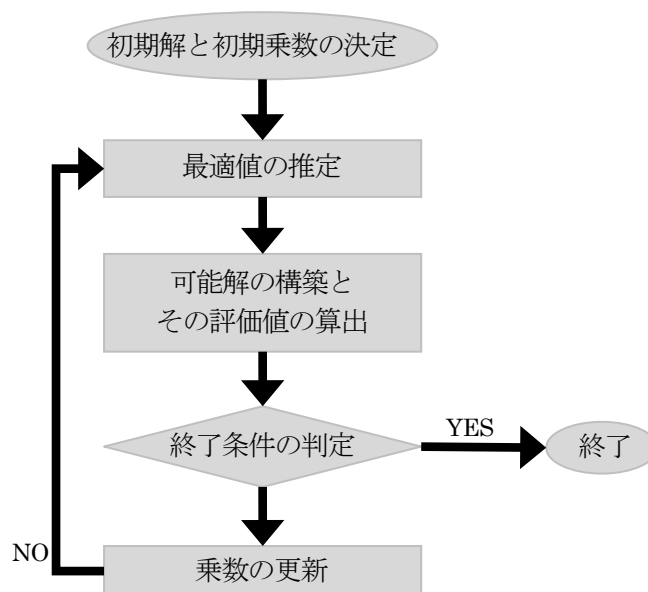


図2 ラグランジアン・ヒューリスティック法

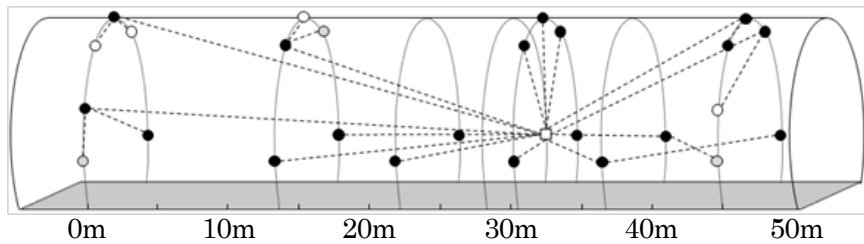


図3 構築した数理モデルを用いて設計したロンドン地下鉄 WSN 設計案[2]

### (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ペーカ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に対して数理モデルの評価値を求めると、年間費用は569,550円となる。他方、構築したラグランジアン・ヒューリスティック法で近似最適解を求めると、その年間費用は492,300円となる[1][2]。これより、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、年間総費用を約13.6%削減できることがわかる。提案手法により構築されたWSN設計案を図3に示す。ただし、図3においては、センサ、リレー、ゲートウェイをそれぞれ○、△、□で示している。また、ゲートウェイ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-25dBm, -10dBm, 0dBm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.