

鉄道土木構造物の状態監視に用いる 無線センサネットワークの設計モデル

羽田 明生¹
鉄道総合技術研究所¹

廣瀬 壮一²
東京工業大学²

巳波 弘佳³
関西学院大学³

1. はじめに

近年、無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) を用いた鉄道土木構造物の状態監視システムが注目されている。WSN を構成する各センサでは、一定間隔でデータをセンシングして、それらを幾つかのノードを経由してゲートウェイまで無線伝送する。また、ゲートウェイで受信されたセンシングデータはインターネットなどの通信インフラを介してデータベースサーバまで送信される。鉄道土木構造物に WSN を設置すると、傾斜や変位などに関する工学値データを継続的に収集することができる。このため WSN を導入すると、異常状態の長期間放置によるリスクを低減できる、蓄積されたデータから経年変化傾向を適切に推測できる、などの効果が期待できる。

一方、鉄道土木構造物に設置する WSN は、多くの場合、数年から十数年に渡る長期的な運用を想定している。よって、WSN の設計段階においては、設置費用に加えて運用費用についても考慮し、それらの総和が最小となるように設計する必要がある[1][2]。そこで本発表では、設置費用と運用費用の総和が最小となるように、WSN を設計する数理モデルを提案する。

2. 問題設定

WSN の設置段階においては、センサ設置費用、リレー設置費用、ゲートウェイ設置費用が発生する。しかし、鉄道土木構造物に設置されるセンサは、通常、所与の監視対象箇所に設置されることから、センサ設置費用は埋没費用と見なすことができる。そこで本発表では、設置段階においては残りのリレー設置費用とゲートウェイ設置費用が発生するものとする。また、WSN の運用段階においては、各センサと各リレーの電池消費費用と電池交換作業費用が発生する。

しかし、鉄道土木構造物に対しては定期的に全般検査が実施されることから、各センサと各リレーの電池交換作業をその全般検査に併せて行うことができれば、WSN の運用費用を大きく効率化することができる。そこで本発表では、電池交換作業は全般検査に併せて実施するものとし、運用費用については電池消費費用のみを考慮するものとする。なお、ゲートウェイでは AC 電源を利用するものとし、電池消費費用は発生しないものとする。加えて、以下を仮定する。

- ・各センサでは一定間隔でデータを収集し、それを何れか1つのゲートウェイまでマルチホップで無線伝送する。
- ・全般検査間に各センサで収集するデータは複数の伝送経路を用いてゲートウェイまで伝送することができる。ただし、単位期間に収集するデータは分割せずにまとめて送信する。
- ・各センサと各リレーにおいては、送信出力を何れか1つの水準に設定できる。

このとき、全般検査のタイミングで各センサと各リレーの電池交換作業を実施するという条件の下で、WSN の設置費用と運用費用の総和が最小となるように、リレーとゲートウェイの設置数とその設置場所、各センサと各リレーの送信出力水準、全般検査間に各センサで取得するデータの伝送経路を同時に決定する問題を考える。本発表ではこの問題に対する数理モデルを提案するが、ここでは、提案する数理モデルの概略を以下に示し、詳細な説明は割愛する。

WSN の総費用最小設計問題

入力情報

- ・センサ集合、リレー設置候補場所集合、ゲートウェイ設置候補場所集合、送信出力水準集合、各送信出力水準における通信リンク集合
- ・各センサと各リレーの電池容量、全般検査周期、各センサで全般検査間に収集するデータ量

Design Methodology of Wireless Sensor Networks for the Condition Monitoring in Railway Structures

1 Akio HADA, Railway Technical Research Institute

2 Sohichi HIROSE, Tokyo Institute of Technology

3 Hiroyoshi MIWA, Kwansai Gakuin University

- ・消費電力パラメータ（収集、送信、受信）
- ・費用パラメータ（電力消費、リレー設置、ゲートウェイ設置）

制約条件

- ・各センサと各リレーにおいて、全般検査間に消費する電力量の総和は、それらに搭載された電池の容量以下である。
- ・全般検査間に各センサで収集したデータは、1つまたは複数の伝送経路により、何れか1つのゲートウェイに伝送される。
- ・リレーとゲートウェイを設置できるのは、それぞれリレー設置候補場所とゲートウェイ設置候補場所だけである。
- ・各センサと各リレーの送信出力は、何れか1つの水準に設定される。

出力情報

- ・WSNの設置費用と運用費用の総和を最小とするような、リレーとゲートウェイの設置数とその設置場所、各センサと各リレーの送信出力水準、全般検査間に各センサで収集するデータの伝送経路と各伝送経路での送信量

3. 数値実験

上述の数値モデルの有用性を検証するために、実際の鉄道土木構造物から取得したデータを用いて数値実験を実施した。本発表では、地下鉄トンネルにおいて、センサ数、リレー設置候補場所数、ゲートウェイ設置候補場所数をそれぞれ26台、21カ所、12カ所とした問題例を取り上げ、各種パラメータがWSNの全体費用に与える影響について考察した。なお、本実験における各種パラメータに関しては次の通りである。

- ・全般検査周期は2年とした。また、1Jの電池消費費用は 3.3×10^2 円とした。
- ・各センサでは、2分毎にデータを収集し、それに必要な電力量は 5.25×10^{-3} Jとした。
- ・送信出力は-24dBm, -10dBm, 0dBmの3段階とし、単位データの送信に必要な電力量はそれぞれ 6.0×10^{-3} J, 1.65×10^{-2} J, 2.61×10^{-2} Jとした。
- ・単位データの受信に必要な電力量は 5.91×10^{-2} Jとした。
- ・リレーとゲートウェイを1台設置した場合の全般検査周期あたりの費用はインスタンス毎に定めた。また、各センサと各リレーでは同一の電池を使用するものとし、その容量はインスタンス毎に定めた。

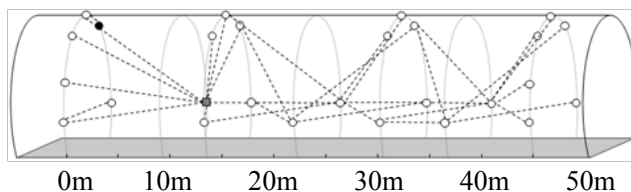


図1 地下鉄トンネルにおけるWSN設計案

ここでは数値実験結果の詳細については割愛するが、提案した数理モデルを用いると様々な導入ケースを想定した場合の全体費用が評価できることを確認した。一例として、提案した数理モデルが構築したWSN案を図1に挙げる。ただし、図1において、黒円ノードと白円ノードはそれぞれ送信出力が-24dBm, 0dBmに設定されたセンサであり、四角ノードはゲートウェイである。図1に示したWSN設計案の年間費用は293,830.2円である。この例では、リレーを設置することなく全体費用の最小化が達成されるが、これは、比較的狭い監視領域に、センサが一定間隔で設置されているためと考えられる。つまり、各センサでは周囲に通信可能なセンサが存在し、リレーを設置することなく、ネットワーク内の電力負荷を各センサ間で分散することができたと考えられる。

4. おわりに

本発表では、全般検査のタイミングで各センサと各リレーの電池交換作業を実施するという条件の下で、状態監視システムのためのWSNを全体費用が最小となるように設計するための数理モデルを提案した。また、実際の鉄道土木構造物を対象とした数値実験を通して、提案した数理モデルの有用性を確認した。しかしながら、信頼性の高いデータ通信を確保するためには、各センシングデータの通信ホップ数をできる限り少なくすることも重要な課題である。そこで今後は、通信ホップ数に対する制約条件も考慮した数理モデルの開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] A. Hada, K. Soga, et al., "Lagrangian Heuristic Method for the Wireless Sensor Network Design Problem in Railway Structural Health Monitoring", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.28, 20-35, 2012.
- [2] 羽田明生, 廣瀬壮一, "鉄道構造物ヘルスマニタリング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, 518-523, 2012.