

設置運用費用を考慮した 無線センサネットワーク設計手法

羽田 明生* 土屋 隆司** 曾我 健一***

**Design Methodology of Wireless Sensor Networks with Consideration
for Installation and Operation Costs**

Akio HADA Ryuji TSUCHIYA Kenichi SOGA

Attention has been called to the condition monitoring system of railway structures using wireless sensor network (WSN) from the viewpoint of its maintenance. WSN can continuously collect data from the sensors deployed at railway structures, which will decrease risks caused by leaving unusual state of structures above for a long time. The cost-effectiveness of WSN deployment is a key to the success of this monitoring system and therefore must be evaluated and optimized through mathematical modeling approaches. In this paper, we have studied a design method for minimizing the total cost of a WSN used for monitoring railway structures.

キーワード：センサネットワーク，構造物，状態監視，数理計画，アルゴリズム

1. はじめに

設備管理におけ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全般検査であった。しかし、鉄道土木構造物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、検査対象設備の経年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、今後の鉄道土木構造物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）を活用した状態監視システムが注目されている。ところが、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。そこで本論文では、設置運用費用を考慮して低コストなWSNを設計するための数理モデルについて考察する。

2. WSNを活用した鉄道土木構造物の状態監視

通常、WSNはセンサ、リレー、ゲートウェイから構

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 信号・情報技術研究部

*** ケンブリッジ大学 工学部

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網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。

3. WSNの設置運用費用の最小化

上述のように、鉄道土木構造物の保守管理においては、近年、WSNが注目されており、ロンドン地下鉄、バルセロナ地下鉄の一部区間では既にWSNを利用した鉄道土木構造物の状態監視システムが導入されている。これらのWSNの設計段階においては、伝送遅延や伝送成功率などに関する技術的な検討と共に、初期投資費用と運用費用の総和を最小にするための方策が種々検討された。しかしながら、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いることから、WSNの設置費用や運用費用の検討には多くの時間を要し、それらの総和が最小となるように、WSNを系統的に計画するための具体的な方法の開発が急務であることが認識された^{1) 2)}。そこで以下では、WSNの設置費用と運用

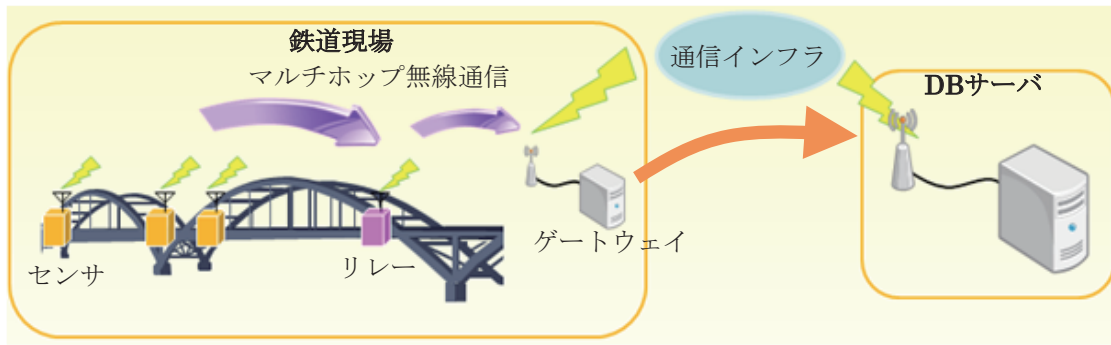


図1 WSNを活用した鉄道土木構造物の状態監視

費用の総和が最小となるように WSN を設計するための数理モデルについて考える。

3.1 問題設定

複数台のセンサの設置場所と単一のゲートウェイの設置場所は与えられているものとする。また、リレーを設置できる場所は幾つかあり、これらの場所も与えられているものとする。さらに、各センサと各リレーでは、データを送信する際に送信出力を数段階のレベル (Transmission Power Level, TPL) の中の 1 つに設定するものとし、その送信範囲と送信のための消費電力量は設定した TPL に依存するものとする。加えて、各センサと各リレーは電池駆動であるものとし、各電池は電力が枯渇する前に交換しなければならないものとする。このとき、鉄道土木構造物の状態監視を行うための以下のようなシステムについて考える²⁾。

- ・ 各センサでは単位期間に 1 回データを収集する。
- ・ 各センサで収集したデータは、マルチホップ無線通信でゲートウェイに無線伝送される。
- ・ ゲートウェイに伝送されたデータは、インターネットなどの一般の通信手段を用いて中央の管理サーバに転送される。

上記のシステムを構築する際の初期費用としては、センサ、ゲートウェイ、リレーの設置費用が発生する。しかし、上述のように、センサとゲートウェイの設置場所は事前に与えられることから、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。よって、システム構築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ればよいことになる。また、このシステムの運用においては、システム内の電池を担当者が現場を巡回して交換する必要がある。よって、システム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。なお、電池交換に関しては、電力が枯渇した電池と次の巡回までに電力が枯渇する電池を担当者が現場を巡回して交換するものとする。加えて、システムの運用段階においては、各電池の電池購入費用が発生する。したがって、このシ

ステム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池購入費用と電池交換作業費用が発生することになる²⁾。

他方、上記システムの設計においては、リレーの設置場所と TPL と送信のためのルートを計画する問題が発生する。すなわち、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問題と、各センサと各リレーでの TPL を決定する問題と、各センサで収集したデータをゲートウェイに送信するためのルートを決める問題である。これら 3 つの問題は先に示した 3 つの費用すべてに関係している。つまり、これら 3 つの問題は互に密接に関係しており、各問題を個別に解いても総費用の最小化を保証することはできない。そこで以下では、リレー設置費用と電池購入費用と電池交換作業費用の総和が最小となるように、これら 3 つの問題を同時に解くことを考える²⁾。

なお、本研究では、以下を仮定する¹⁾。

- ・ 1 のセンサで収集したデータは 1 つにまとめ、それを途中の中継点で分割することなくゲートウェイに伝送するものとする。
- ・ ネットワーク内に設置する各リレーはすべて同一のものであるとする。
- ・ 各センサや各リレーから送信できる範囲と送信のための電力消費量は、それらで設定する TPL に依存するものとする。
- ・ 鉄道土木構造物の保守管理において設置するセンサは、リレーにデータ収集機能を付加したものである場合が多い。つまり、センサも中継機能を持ち、センサとリレーの機能はデータ収集機能を除けば同一である場合が多い。そこで、各センサと各リレーにおける TPL の水準数は全て同一であるとする。
- ・ 電池交換作業において交換する電池は、電力が枯渇した電池と次の巡回までに電力が枯渇する電池だけで、次の巡回まで寿命のある電池は交換しないで良いものとする。つまり、システム内のある電池の寿命 (交換してから電力が枯渇するまでの期間) がネッ

トワーク寿命（システム内にある全ての電池寿命の最小期間）の θ (≥ 1) 倍以上でかつ $(\theta+1)$ 倍未満である場合は、その電池は回の巡回に一度の割合で交換すれば良いものとする。

3.2 定式化

前節の問題を定式化する前に、定式化で用いる記号と用語について説明する。センサの集合を S 、リレー設置候補場所の集合を R 、ゲートウェイを $\{0\}$ とする。また、 $M=S \cup R$ 、 $N=S \cup R \cup \{0\}$ とおき、 M や N の要素について考える場合はそれらをノードと呼ぶものとする。さらに、ノード $i \in M$ の電池容量を E_i 、各センサと各リレーにおける TPL の集合を P とし、ノード $i \in M$ からノード $j \in N$ へ直接送信できる、ノード i における TPL の集合を P_{ij} とする。加えて、 $G=(N, A)$ を有向グラフとする。ただし、アーク集合 A は次のように定義する²⁾。

$$A = \{(i, j, l) \in M \times N \times P \mid P_{ij} \neq \emptyset, l \in P_{ij}\}$$

あるセンサ $i \in S$ を始ノードとし、ゲートウェイ 0 を終ノードとする $G=(N, A)$ 上のルートの特に伝送ルートと呼び、それをアークの集合で定義する。このとき、 G にあるセンサを始ノードとする伝送ルートが存在しなければ、リレーをどのように配置しても、そのセンサからはゲートウェイにデータを送信することができない。そこで、 G には各センサを始ノードとする伝送ルートが少なくとも 1 本は存在するものとする。また以下では、 G におけるノード $i \in M$ の入次数と出次数は共に 1 以上であると仮定する。つまり、ノード $i \in M$ は少なくとも他の 1 つのノードから受信可能で、かつ少なくとも他の 1 つのノードへ送信可能であると仮定する²⁾。

また、センサ $k \in S$ で単位期間にデータを収集・処理するのに必要な電力量を s^k 、センサ $k \in S$ で単位期間に収集したデータを各ノードで受信するのに必要な電力量を r^k 、センサ $k \in S$ で単位期間に収集したデータを各ノードから TPL $l \in P$ で送信するのに必要な電力量を t_l^k とする^{1) 2)}。

加えて、1 回当たりの電池交換作業費用を c_1 、1J 当たりの電池消費費用を c_2 、リレーを 1 台設置した場合の単位期間当たりの費用を c_3 とする。また、 $e_i, i \in M$ を次で定義される定数とする。

$$e_i = \begin{cases} s^i, & i \in S \\ 0, & i \in R \end{cases}, i \in M$$

このとき、変数 (x_{ijl}^k) と変数 (y_{il}) を次のように定義すると、前節で説明した問題は次の問題 (P) のように定式化される^{1) 2)}。

$$x_{ijl}^k = \begin{cases} 1, & \text{センサ } k \in S \text{ で収集したデータを} \\ & \text{ノード } i \in M \text{ からノード } j \in N \text{ へ} \\ & \text{TPL } l \in P \text{ で送信する場合} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

$$(i, j, l) \in A, k \in S$$

$$y_{il} = \begin{cases} 1, & \text{ノード } i \in M \text{ の TPL が } l \in P \text{ の場合} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

$$i \in M, l \in P$$

問題 (P)

最小化

$$c_1 z + c_2 \sum_{i \in M} \left\{ \sum_{(i, j, l) \in A} \sum_{k \in S} t_l^k x_{ijl}^k + \sum_{(j, i, l) \in A} \sum_{k \in S} r^k x_{jil}^k + e_i \right\} + c_3 \sum_{i \in R} \sum_{l \in P} y_{il} \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{(i, j, l) \in A} \sum_{k \in S} t_l^k x_{ijl}^k + \sum_{(j, i, l) \in A} \sum_{k \in S} r^k x_{jil}^k + e_i \leq E_i z, i \in M \quad (2)$$

$$\sum_{(i, j, l) \in A} x_{ijl}^k - \sum_{(j, i, l) \in A} x_{jil}^k = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}, i \in M, k \in S \quad (3)$$

$$\sum_{(i, 0, l) \in A} x_{i0l}^k = 1, k \in S \quad (4)$$

$$x_{ijl}^k \leq y_{il}, (i, j, l) \in A, k \in S \quad (5)$$

$$\sum_{l \in P} y_{il} \leq 1, i \in M \quad (6)$$

$$x_{ijl}^k \in \{0, 1\}, (i, j, l) \in A, k \in S \quad (7)$$

$$y_{il} \in \{0, 1\}, i \in M, l \in P \quad (8)$$

ここで、式 (1) は目的関数であり、第 1 項は電池交換作業費用、第 2 項はネットワーク内の総電池消費費用、第 3 項はリレー設置費用である。また、制約条件に関する詳細な説明は割愛するが、式 (2) から式 (6) により、各センサを始ノードとする $|S|$ 個の伝送ルートが生成されること、各ノードにおいては TPL が同時に 2 つ以上の水準に設定されないことなどが保証される^{1) 2)}。

3.3 アルゴリズム

問題 (P) は計算量理論的に難しいとされる問題 (NP 困難な問題) であり、実際問題の多くはその最適解を求めるのは困難であると思われる¹⁾。それゆえ、実際問題に対しては、メタヒューリスティクスなどの近似解法が必要となるが、それらの近似解法では求めた解が最適解にどれだけ近似しているかを評価できない場合が多い。つまり、それらの近似解法では下界値 (最小化問題の場合は、最適値以下であることが理論的に保証された値のこと) を算出していないため、多くの場合、求めた解を相対誤差 ((上界値 - 下界値) / 下界値) で評価することができない。ただし、最小化問題の上界値とは、得られた解の目的関数値のことである。これに対して、求めた解を相対誤差で評価できる方法にラグランジアン・ヒューリスティック法がある。この方法は、上界値と下

界値の差を順次減少させながら対象問題の近似最適解を求める方法であり、実際規模の問題にも適用可能である。また、この方法によればラグランジュ緩和問題の最適解を利用して対象問題の近似解を効率的に探索することができる。原問題が最小化問題である場合のラグランジアン・ヒューリスティック法の概略を以下に示す。

ラグランジアン・ヒューリスティック法

- STEP1. 原問題のラグランジュ緩和問題を解いて、原問題の下界値を求める。
- STEP2. ラグランジュ緩和問題の最適解を利用して、原問題の可能解と目的関数值（上界値）を求める。
- STEP3. 上界値と下界値を用いて相対誤差を算出する。所与の終了条件を満たしたならば終了する。
- STEP4. ラグランジュ乗数を一定の方法で更新して、STEP1に戻る。

文献1)では、このラグランジアン・ヒューリスティック法に基づく問題(P)の近似最適解法を提案している。そこで以下では、この手法について説明する。

3.3.1 下界値の決定

ラグランジュ乗数 $u = (u_i) \geq 0, i \in M$ を用いて式(2)を、ラグランジュ乗数 $v = (v_{ij}^k) \geq 0, (i, j, l) \in A, k \in S$ を用いて式(5)を問題(P)の目的関数に組み込み、それを整理すると次のような問題(P)のラグランジュ緩和問題を得る。

問題(L(u, v))

Min

$$(c_1 - \sum_{i \in M} u_i E_i)z + \sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} f_{ijl}^k x_{ijl}^k + \sum_{i \in M} \sum_{l \in P} g_{il} y_{il} + \sum_{i \in M} (c_2 + u_i) e_i$$

s.t. 式(3), (4), (6), (7), (8)

ただし、 (f_{ijl}^k) と (g_{il}) を次で定義する。

$$f_{ijl}^k = \begin{cases} (c_2 + u_i) t_i^k + (c_2 + u_j) r^k + v_{ijl}^k, & j \in M \\ (c_2 + u_i) t_i^k + v_{ijl}^k, & j = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$(i, j, l) \in A, k \in S$

$$g_{il} = \begin{cases} - \sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} v_{ijl}^k, & i \in S, \\ c_3 - \sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} v_{ijl}^k, & i \in R, l \in P \end{cases} \quad (10)$$

このとき、問題(L(u, v))は、 (x_{ijl}^k) に関する問題(LX(u, v))と (y_{il}) に関する問題(LY(v))に分解される。

問題(LX(u, v)) Min $\sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} f_{ijl}^k x_{ijl}^k$

s.t. 式(3), (4), (7)

問題(LY(v)) Min $\sum_{i \in M} \sum_{l \in P} g_{il} y_{il}$

s.t. 式(6), (8)

また、問題 α の最適値を $c(\alpha)$ とすると、

$$c(L(u, v)) = c(LX(u, v)) + c(LY(v)) + \sum_{i \in M} (c_2 + u_i) e$$

となる。ここで、 $(LX(u, v))$ における $k \in S$ をある k に固定した場合の問題を $(LX^k(u, v))$ とすると、 $(LX(u, v))$ はさらに $|S|$ 個の問題 $(LX^k(u, v))$ に分解される。そして、各 $(LX^k(u, v))$ は明らかにノード k からノード0への最短ルート問題である。他方、 $(LY(v))$ における $i \in M$ をある i に固定した場合の問題を $(LY^i(v))$ とすると、問題 $(LY(v))$ もさらに $|M|$ 個の問題 $(LY^i(v))$ に分解され、そして各 $(LY^i(v))$ は明らかに自明な問題である。よって、ラグランジュ緩和問題 $(LX(u, v))$ の最適値は、つまり問題(P)の下界値は、 $|S|$ 個の最短ルート問題と $|M|$ 個の自明な問題を解くと

$$c(L(u, v)) = \sum_{k \in S} c(LX^k(u, v)) + \sum_{i \in M} c(LY^i(v)) + \sum_{i \in M} (c_2 + u_i) e \quad (11)$$

で求めることができる。ここで、最短ルート問題については、その最適解を多項式時間で求めるアルゴリズムが既に数多く提示されている¹⁾。

3.3.2 上界値の決定

ここでは、文献1)で提案された問題(P)の可能解を求める方法について説明する。

ラグランジアン・ヒューリスティック法の各繰返しにおいて、問題(LX(u, v))を解くとその最適解 (\hat{x}_{ijl}^k) が、問題(LY(v))を解くとその最適解 (\hat{y}_{il}) が求まる。しかし、ラグランジュ緩和問題(L(u, v))は式(2)と式(5)を問題(P)の目的関数に組み込んで生成した。それゆえ、 (\hat{x}_{ijl}^k) 、 (\hat{y}_{il}) は式(5)を満たしていない場合が当然、発生する。しかし、以下の手順を実行すると、 (\hat{x}_{ijl}^k) 、 (\hat{y}_{il}) を比較的容易に生成することができる。ただし、以下の手順における $P(i)$ は、 (\hat{x}_{ijl}^k) に対応した伝送ルートで送信する場合に、ノード $i \in M$ で設定しなければならないTPLの集合である。また、 $B(i)$ は $B(i) = \{(i, j) \in M \times N \mid \hat{x}_{ijl}^k = 1, l \in P, k \in S\}, j \in M$ であり、 $S(i, j)$ は $S(i, j) = \{k \in S \mid \hat{x}_{ijl}^k = 1, l \in P\}, (i, j) \in \beta$ である。ただし、 β は $B(i), i \in M$ の和集合である。

可能解の決定

STEP1. 任意の $i \in M$ を選択する。 $B(i) = \emptyset$ ならばSTEP4に進む。

STEP2. $P(i)$ の中で送信出力最大のTPL $l(i)$ を決定する。

STEP3. $\bar{x}_{ijl(i)}^k = 1, (i, j) \in B(i), k \in S(i, j)$ とし、 $\bar{y}_{il(i)} = 1$ とする。

STEP4. $M := M \setminus \{i\}$ とする。 $M \neq \emptyset$ ならばSTEP1へ戻る。 $M = \emptyset$ ならばSTEP5へ進む。

STEP5. 値を定めていない残りの \bar{x}_{ijl}^k と \bar{y}_{il} は全て0として終了する。

この手順の終了時における (\bar{x}_{ijl}^k) と (\bar{y}_{il}) が式(5)を満たすことは、STEP2における $l(i)$ の決定方法と、STEP3に

おけるそれらの決定方法より明らかである。また、この手順で (x_{ij}^k) を求めると、それより式 (2) を満たす最小の ε が定まる。そして、その ε とこの手順で求めた (x_{ij}^k) , (y_{ij}) は明らかに問題 (P) の可能解である。よって、それらを問題 (P) の目的関数に代入すると、問題 (P) の上界値を得ることができる。なお、文献 1) では、上記の手法で求めた問題 (P) の可能解に対して近傍探索アルゴリズムも提案しているが、ここではその説明は割愛する。

3.4 ロンドン地下鉄における検証

既述のように、ロンドン地下鉄にはトンネル内の状態監視のための WSN が既に設置されている。文献 1) では、ロンドン地下鉄の WSN において、様々な問題例を設定して総費用がどのように変化するかを検証している。そこでここでは、文献 1) に示された数値実験結果について説明する。

ロンドン地下鉄の WSN には、26 台のセンサ（傾斜計センサ 16 台、変位計センサ 6 台、環境センサ 4 台）と 1 台のゲートウェイが設置されている。そこで、この WSN を上述のアルゴリズムで設計した場合の WSN 案について考察し、その結果を表 1 に示す。また、ロンドン地下鉄において、設置センサ数を現在の WSN よりも増やした場合についても考察し、その結果を表 2 に示す。ただし、表 1 と表 2 に関しては以下の通りである。

- $|S|$ は設置センサ数、 $|R|$ はリレー設置候補場所数である。したがって、 $|R|=0$ である場合はリレーを設置できないことを示している。
- TPL に関しては、各ノードの TPL を調整可能な場合は 1、それが全て最高出力水準に固定されている場合は 0 としている。
- c_U と c_L はそれぞれ上記アルゴリズムで得られた最良の上界値（£/日）、下界値（£/日）である。
- e は相対誤差で $(c_U - c_L)/c_L$ である。
- r は得られた WSN において設置するリレーの数である。
- $|S|$ である問題例の計算時間はそれぞれ 300 秒、600 秒、1200 秒である。
- 上述の問題 (P) の可能解に対する近傍探索アルゴリズムは、乱数を利用した乱択アルゴリズムである。よって、同一の問題例でも計算結果が異なる場合が存在する。そこで、同一の問題例を 5 題解いた。したがって、表 1 と表 2 の値は 5 題の問題例の平均値である。

表 1 からは、ロンドン地下鉄に設置された WSN においては、TPL 調整のみで総費用の最小化が達成されており、リレーを設置する必要がないことがわかる。一方、表 2 は、リレーの設置を考慮すると上界値を低減できる

ことを、そして TPL を調整するとそれをさらに改善できることを示している。

つまり表 2 は、リレーの設置と TPL の調整を同時に考慮すると、総費用をより低減できることを示している。図 2 に $|S|=26, |R|=70, TPL=1$ である問題例、図 3 に $|S|=50, |R|=54, TPL=1$ である問題例に対するアルゴリズムの出力結果を示す。ただし、図 2 と図 3 においては、○, △, □ はそれぞれセンサ、リレー、ゲートウェイである。また、各ノードにおける TPL の違いを塗りつぶしの色で区別しており、緑色、黄色、橙色のノードはそれぞれ TPL を -25dBm , -10dBm , 0dBm に設定することを示している。

表 1 数値実験結果 ($|S|=26$)¹⁾

$ S $	$ R $	TPL	c_U (£/日)	c_L (£/日)	e	r
26	0	0	10.4035	9.2931	0.1195	-
26	0	1	8.9923	8.4988	0.0581	-
26	70	0	10.4035	9.3128	0.1171	0.0
26	70	1	8.9923	8.5098	0.0567	0.0

表 2 数値実験結果 ($|S|=50, 96$)¹⁾

$ S $	$ R $	TPL	c_U (£/日)	c_L (£/日)	e	r
50	0	0	32.4148	30.4878	0.0632	-
50	0	1	31.7508	30.3428	0.0464	-
50	54	0	31.3166	29.2255	0.0716	9.4
50	54	1	30.8223	28.5519	0.0795	9.6
96	0	0	57.2311	52.1161	0.0981	-
96	0	1	56.3126	51.9465	0.0840	-
96	58	0	56.9295	51.4858	0.1057	10.6
96	58	1	54.8668	49.2744	0.1135	17.8

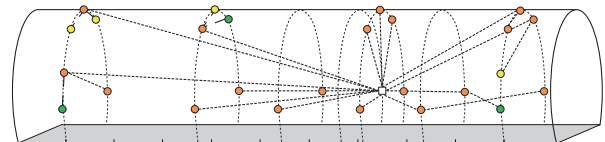


図 2 WSN 設計案 ($|S|=26, |R|=70, TPL=1$)²⁾

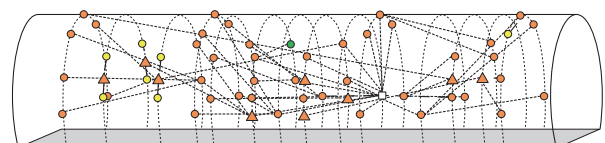


図 3 WSN 設計案 ($|S|=50, |R|=54, TPL=1$)²⁾

4. 所定のタイミングでの電池交換を考慮した WSN の設置運用費用の最小化

前章では、WSN の設置運用費用が最小となるようにネットワーク寿命を決定することができる数理モデルについて説明した。ところが、現場によっては鉄道土木構造物の定期検査など、所定のタイミングでしか WSN の電池交換作業を実施することができないケースも想定される。このような場合は、ネットワーク寿命は所与の期間以上でなければならないという制約条件を数理モデルで考慮する必要がある。このとき、所定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 の設置運用費用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れらの設置場所、各センサと各リレーの送信出力水準、所定の期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、次のような問題 (Q) を考えることができる。

問題 (Q)

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, 所定の期間, 各センサで所定の期間に収集するデータ量
- ・ 消費電力パラメータ, 費用パラメータ

制約条件

- ・ 各センサと各リレーにおいて、所定の期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。
- ・ 所定の期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 の設置運用費用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れらの設置場所、各センサと各リレーの送信出力水準、所定の期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上のデータ送信量

文献3)では、上述のロンドン地下鉄の WSN に対して問題 (Q) を数学的に定式化した上で、数理計画ソルバーを用いてその最適解を計算している。

5. おわりに

本論文では、WSN の設計段階において、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について説明した。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。

文献

- 1) Hada, A., Soga, K., Liu, R., Wassell, I., "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, pp.518-523, 2012
- 3) 羽田明生, 廣瀬壮一, 巳波弘佳: 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, 情報処理学会第 75 回全国大会講演論文集, pp.1-259-1-260, 2013