

電力消費を考慮したセンサネットワーク設計の最適化手法

羽田 明生* 土屋 隆司**

Algorithm for Designing Energy-efficient Wireless Sensor Networks

Akio HADA Ryuji TSUCHIYA

This paper proposes effective algorithms for designing wireless sensor network systems in railway infrastructures. Firstly, we reviewed several optimization scenarios arising in railway system and highlighted the importance of the relay node and the gateway deployment for constructing energy-efficient wireless sensor networks for monitoring railway infrastructures. Lagrangean heuristic algorithm for the relay node configuration and life span algorithm for the gateway deployment issues have been suggested in this paper. Finally the proposed algorithms have been verified with randomly generated data and the railway tunnel field measurements.

キーワード：センサネットワーク，モニタリング，ネットワーク設計，蓄積運搬型センサネットワーク

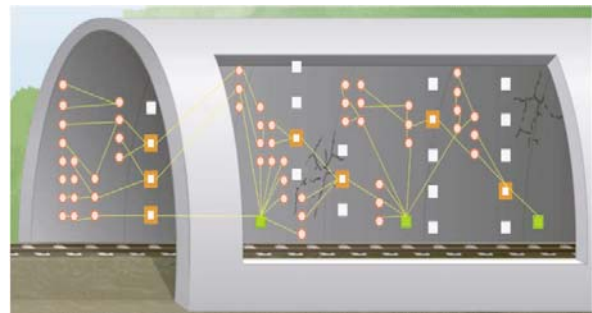
1. はじめに

鉄道構造物に対する保守管理は、これまで人手による目視検査を中心に行われてきた。しかし鉄道構造物には、地中や高所など目視による検査が難しい箇所が数多く存在する。また目視検査だけでは、経年的な劣化傾向を客観的に把握できないという問題もある。このため鉄道構造物の保守管理においては、近年、無線センサネットワークを利用した状態監視システムの導入が検討されている。

鉄道構造物では通常の AC 電源が必ずしも利用できるとは限らないため、鉄道構造物において無線センサネットワークを構築するためには各無線通信機器限りある電力資源を効率的に使用して、出来る限り無線センサネットワークの寿命を長くすることが求められる。ここで、センサネットワーク寿命とは、センサネットワークを構成する各ノードのバッテリー電源が枯渇する（必要な動作電圧を下回る）までの期間を指す。本論文では、このようなデータ収集・伝送の用に供する無線センサネットワークの効率的な設計手法を提案する。

無線センサネットワークを設計する際には監視対象となる鉄道構造物の設置環境を考慮して効率的な設計を行うことが求められる。通常、監視を行いたいポイントは事前に決まることが多く、これらのポイントに無線通信機器を搭載したセンサノードを設置する。しかし、計測データの中継を行うリレーノードや計測データの収集・処理を行うゲートウェイは比較的自由にその設置場所を定めることができる。そこで、リレーノードや

ゲートウェイに関しては、設置スペースや AC 電源の利用可能な場所などの設置環境を考慮して効率的に無線センサネットワークを設計することができる。リレーノードは無線通信機器を搭載しており、電力資源も限られているので、その設置においてはネットワーク寿命ができるだけ長くなるように設置場所を定めることが求められる（図1参照）。一方、ゲートウェイでは収集した各センシングデータを受信し、インターネットや携帯電話回線を利用してこれらを管理サーバに伝送するので、センサノードやリレーノードよりも多くの電力が必要である。よって、ゲートウェイは、AC電源が利用できる場所の中からその設置場所を選択する必要があるが、この場合ゲートウェイに関しては電力資源制約を考慮する必要はない。ただし、設置環境によっては AC 電源が全く利用できない場合もある。この場合は、電力資源が限られているため、電力消費の大きい無線伝送を行わない蓄積運



● : センサ ■ : ゲートウェイ
 ■ : リレー □ : リレー設置候補場所

図1 トンネルにおけるリレー配置の様子

* 輸送情報技術研究部（設備システム）

** 輸送情報技術研究部

特集：輸送情報技術

搬型システムが有利である。すなわち、ゲートウェイで受信したセンシングデータを管理サーバまで伝送せずに、一定期間ゲートウェイに蓄積して後日この蓄積されたセンシングデータを回収するというシステムであるが、ここではゲートウェイも限りある電力を効率的に利用できるようにその設置場所を決定することが求められる。

このように、リレーノードとゲートウェイの設置に関しては、設置環境に依存した様々なシナリオが考えられる。本論文では、バッテリー電源の観点からネットワークの長寿命化を目的に挙げ、ゲートウェイがAC電源を利用できる際のリレーノード配置場所決定問題とゲートウェイがAC電源を利用できない場合のゲートウェイ配置場所決定問題を取り上げ、これら両モデルにおける数理的な設計手法について説明する。

2. 関連研究

センサネットワークの長寿命化に関してはこれまでに多くの研究がある。例えば、Alfieriら¹⁾は与えられたセンサノード集合を分割して複数の部分センサネットワークを構成し、それらの運用時間帯を調整することによりセンサネットワークの寿命を長くする手法を提案している。また、Tangら²⁾は伝送データの信頼性を考慮して、Kimら³⁾はセンシングデータの伝送遅延を考慮してセンサネットワークの寿命を最大化する方法を提案している。しかしながらこれらの研究においては、ネットワークトポロジーは所与であるとしている。つまり、センサネットワークの寿命は、ネットワークトポロジーに大きく依存するが、これらの研究においてはそれが既に与えられているものとしている。これに対して本論文では、リレーノードやゲートウェイの配置場所も考慮してセンサネットワークの寿命を最大化する方法を提案しており、この提案手法の有効性を鉄道トンネルの保守管理における実例を交えた数値実験により検証している。

3. 最適リレーノード配置問題

3.1 問題背景

鉄道構造物の保守管理においては、無線センサネットワークによりリアルタイムにデータを収集、分析することが求められる場合がある。すなわち、各センサノードで収集されたデータをインターネットなどの既設通信網に接続されているゲートウェイを経由して管理サーバに伝送するといった通信型の監視システムを構築する場合である。このような監視システムの利点としては、地震などの非常時にリアルタイムに鉄道構造物の状態を把握することができるということが挙げられる。通信型の監視システムでは、AC電源を利用できる場所にゲート

ウェイを設置することが多いので、ここでもゲートウェイはAC電源を利用できるものとしその設置場所は所与であるものとする。このとき、処理データの集中するセンサノード付近に新たにリレーノードを設置し、処理データ量を分散させることを考えると、センサネットワーク寿命を出来るだけ長くするためには効率的にリレーノードを設置することが求められる。そこで、本論文では各センシングデータの通信経路に加え、リレーノードの設置場所も同時に考慮することによりネットワークの寿命を最大にするための最適化問題を取り挙げる。

3.2 問題設定

センサノード集合 M 、リレーノード設置候補場所集合 N 、ゲートウェイ集合 K は所与であるものとする。また、 $V=M \cup N \cup K$ とし、通信可能なリンクの集合を A とする。さらに、リレーノード設置候補場所 $i \in N$ にリレーノードを設置するために必要な費用を c_i 、リレーノード設置費用の上限を d とする。

各センサノードまたは各リレーノードの消費電力に関してはこれまでに数多くのモデルが提案されているが、本論文ではデータを1回送信するとき、またはデータを1回受信するときにそれぞれ E^T, E^R の電流が必要であるとする。また、各センサノードまたはリレーノードはデータの送受信を行っていないときにはスタンバイ状態にあるものとし、 E^S の電流が必要であるものとする。ここで、データを1回送信、受信するために必要な通信時間をそれぞれ t^T, t^R とし、 T を各センサノードのセンシング周期、 C を各センサノードと各リレーノードが正常に動作するために必要な電圧とし、変数 (x_{ij}^h) 、 $h \in M, (i, j) \in A$ をセンサノード $h \in M$ で収集されたデータが $(i, j) \in A$ を通過するとき1となり、その他の場合は0となる0-1変数と定義する。このとき、ノード $i \in M \cup N$ の消費電力を次で定義する。

$$\sum_{j \in V_i} \sum_{h \in M} C(E^R \cdot t^R + E^T \cdot t^T) x_{ij}^h - C \cdot E^R \cdot t^R \cdot d_i + C \cdot E^S \left\{ T - \sum_{j \in V_i} \sum_{h \in M} (t^R + t^T) x_{ij}^h + t^R \cdot d_i \right\} \quad (1)$$

ただし、 $V_i = \{j \in V \mid (i, j) \in A\}$ 、 $i \in V$ であり、 (d_i) 、 $i \in M \cup N$ は $i \in M$ である場合に1、 $i \in N$ である場合には0をとるものとする。

ネットワーク寿命を、“全てのセンサまたはリレーが電力枯渇することなく正常に動作している期間”と定義すると、ネットワーク寿命をできるだけ長くするためには各ノードの中で最も早く電力枯渇が発生するノード寿命をできるだけ長くすることが求められる。なお、各センサノードと各リレーノードの電力寿命は、式(1)で定まる各ノードの消費電力量と各ノードの電力容量 $E(J)$ により決定さ

れる。すなわち、 f と $g_i, i \in M \cup N$ を次のようにおくと、

$$f = \{(E^R - E^S)t^R + (E^T - E^S)t^T\} \cdot C \quad (2)$$

$$g_i = \{E^S(T + t^R \cdot d_i) - E^R \cdot t^R \cdot d_i\} \cdot C \quad (3)$$

各センサと各リレーの電力寿命は次のようになる。

$$\frac{E}{\sum_{j \in V_i} \sum_{h \in M} f \cdot x_{ij}^h + g_i} \quad (4)$$

本論文で提案する最適化モデルでは、上式で定義された各ノードの電力寿命のうち最小のものを最大化することを目的とする。

制約条件に関しては、リレー設置費用に関する制約条件と各センサノードからのデータがゲートウェイに伝送されるための連結性の制約条件を組み入れた。前者の制約条件は、リレー設置による費用の総和は与えられたリレー設置費用の上限値以下であることを保証し、後者の制約条件は各センサノードからあるゲートウェイへの通信経路の確保を保証するものである。

このとき、リレー設置に関して変数 (y_i), $i \in N$ を、リレー設置候補場所 $i \in N$ にリレーノードを設置する場合は1とし、リレー設置候補場所 $i \in N$ にリレーノードを設置しない場合は0となる0-1変数とすると、提案する最適リレーノード配置問題は次のように定式化される。

最適リレーノード配置問題

目的関数：

$$\max_{i \in M \cup N} \left\{ \min \left(\sum_{j \in V_i} \sum_{h \in M} f \cdot x_{ij}^h + g_i \right) \right\} \quad (5)$$

制約条件：

$$\sum_{j \in V_i} x_{ij}^h \leq y_i, \quad i \in N, \quad h \in M \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} c_i y_i \leq d, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V_i} x_{ij}^h - \sum_{j \in V_i} x_{ji}^h = \begin{cases} 1, & i = h \\ 0, & i \in \{M \setminus \{h\}\} \cup N \end{cases}, \quad h \in M \quad (8)$$

$$\sum_{i \in K} \sum_{j \in V_i} x_{ji}^h = 1, \quad h \in M \quad (9)$$

$$x_{ij}^h \in \{0,1\}, \quad (i,j) \in A, \quad h \in M \quad (10)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad i \in N \quad (11)$$

上記定式化の制約条件に関して、式(6)はリレー設置と各センシングデータの通信経路に関する制約条件であり、あるリレー設置候補場所にリレーノードを設置した場合のみ各センシングデータはそのノードを経由できるということを保証する。また、式(7)はリレー設置費用に関するものであり、式(8)(9)により通信経路の確立が保証される。

3.3 アルゴリズム

最適リレーノード配置問題はリレーノードの配置場所と各センシングデータの通信経路を同時に決定する問題である。本論文では、この問題に対するラグランジアン・ヒューリスティクス法を提案するが、まずこのアルゴリズムの概略について説明する。このアルゴリズムでは、最初に原問題のいくつかの制約条件をラグランジュ乗数を用いて目的関数に組み込み、原問題の緩和問題（ラグランジュ緩和問題）を生成する。このとき、ラグランジュ緩和問題は多項式時間で解けるような比較的簡単な問題に変換することが望ましい。次いで、これら緩和問題を解き、得られた解が原問題の制約条件を満たす程度を数値化する。ここで、緩和問題の解が原問題の全ての制約条件を満たした場合にはその解は原問題の最適解となることに注意する。さらに、得られた緩和問題の解を利用して原問題の可能解を生成する。最後に、これまでに得られた全ての情報を利用してラグランジュ乗数を更新する。つまり、ラグランジアン・ヒューリスティクス法では、緩和問題の解ができるだけ原問題の制約条件を満たすようにラグランジュ乗数を更新することが重要である。以下にラグランジアン・ヒューリスティクス法の概略を挙げる。なお、上界値とは最適値はその値以下であることが保証された値のことであり、下界値とは最適値はその値以上であることが保証された値のことである。

ラグランジアン・ヒューリスティクス法

- STEP1. 原問題のラグランジュ緩和問題を解いて、原問題の上界値を求める。
- STEP2. ラグランジュ緩和問題の最適解を利用して、原問題の近似解と近似値を求める。
- STEP3. 上界値と下界値の差（双対ギャップ）が所与の値以下ならば終了する。
- STEP4. ラグランジュ乗数を一定の方法で更新して、STEP1に戻る。

次に、最適リレーノード配置問題に対するラグランジアン・ヒューリスティクス法について説明する。上記STEP1におけるラグランジュ緩和問題の生成に関して、ここでは原問題の第一制約条件式とモデル変更に伴う付加的な制約条件式をラグランジュ乗数を用いてそれぞれ目的関数に組み込みラグランジュ緩和問題を生成した。また、生成したラグランジュ緩和問題はナップサック問題と最短路問題とに分解される（ラグランジュ分解法）。ナップサック問題は計算複雑性理論の観点からは難しい問題に分類されるが、動的計画法に基づいたアルゴリズムにより疑似多項式時間で最適解を算出するアルゴリズムが提案されている。一方、最短路問題に関してもこれまでに多項式時間で最適解を求めることができるアルゴリズムが提案されている。

ナップサック問題を解くと、リレー設置費用制約式を

特集：輸送情報技術

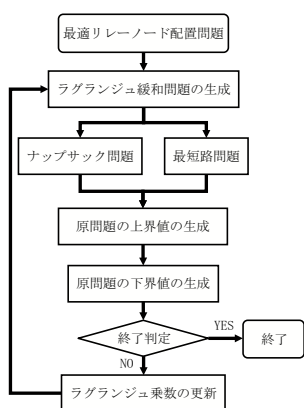


図2 最適リレー配置問題に対するラグランジアン・ヒューリスティクス法

満たしたリレー設置場所が定まるので、STEP2の可能解の決定の際にもこのリレー設置案を採用した。リレー配置が定まると、ネットワークトポロジーが一意に定まる。そこで、ラグランジュ乗数に基づいた重みで定義されたこのグラフ上で、各センサノードからあるゲートウェイへの最短路を求めることにより各センシングデータの通信経路を求めた（原問題の可能解の決定）。また、STEP4のラグランジュ乗数の更新は劣勾配法と呼ばれる方法で更新した。以上のように構築した最適リレーノード配置問題に対するラグランジアン・ヒューリスティクス法の概略を図2に示す。

3.4 数値実験

現在、ロンドン地下鉄Jubilee Lineのトンネルには傾斜計ノード16台、クラックメータノード6台、環境センサノード6台、ゲートウェイ1台から構成される無線センサネットワークが設置されている⁴⁾。図3にこの無線センサネットワークの概要を示す。図3における各ノードの色に関しては、赤色はゲートウェイ、緑色は環境センサノード、紫

色は傾斜計ノード、橙色はクラックメータノードである。

このロンドン地下鉄に設置されている無線センサネットワークに上述のモデルを適用した結果を図4に示す。なお、図4において黒ノードはセンサノード、緑ノードはリレーノード、赤ノードはゲートウェイであり、点線は通信リンクである。図4では、トンネルに設置された無線センサネットワークを長方形に展開して表示した。図4の結果から幾つかのリレーノードはゲートウェイ付近に設置されており、ゲートウェイ付近のノードの電力負荷を分散させるようになっている。また、本論文で適用した電力モデルによれば、図4のネットワーク設計案は既存のネットワークと比較するとネットワーク寿命は約1.3倍となり、長寿命化の効果も確認できる。

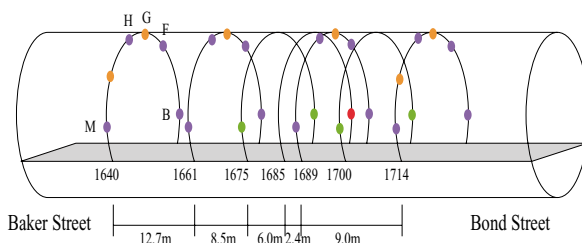


図3 ロンドン地下鉄トンネルに設置された無線センサネットワークの概要

4. 最適ゲートウェイ配置問題

4.1 問題背景

鉄道構造物の中には、AC電源が利用できないような劣悪な通信環境に設置されているものもある。このような環境においては、各センサノードで収集したデータをゲートウェイに布置したストレージに一定期間蓄積しておき、後日それを回収するシステムが効率的かつ経済的である。また、長期的な劣化傾向を把握することが目的である場合、センシングデータをリアルタイムで管理サーバに

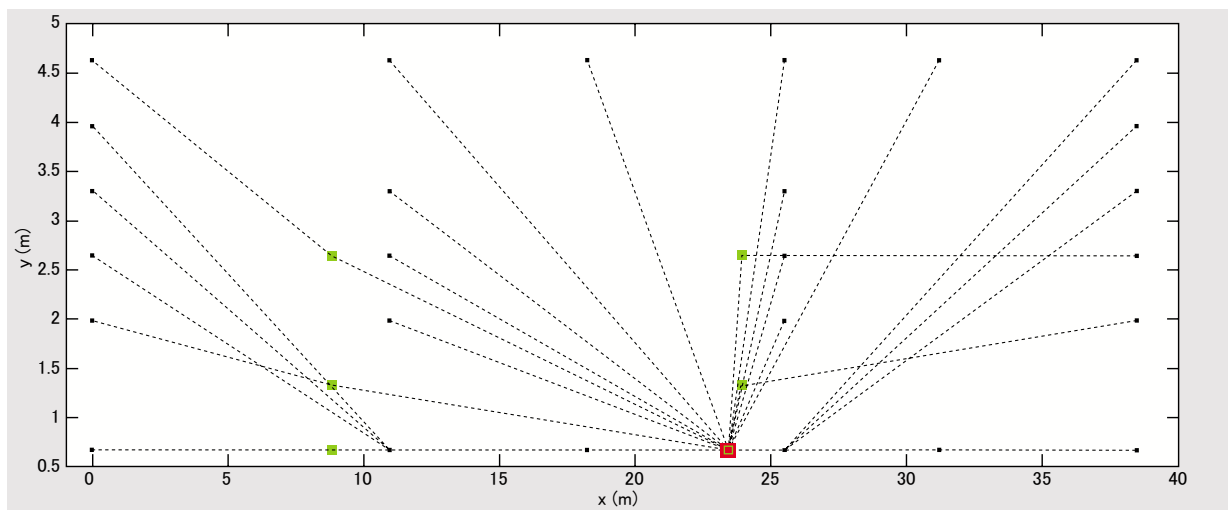


図4 提案アルゴリズムにより出力されたネットワーク設計案

伝送する必要はなく、蓄積運搬型システムはこのような目的における鉄道構造物の保守管理システムに適している。

通常、蓄積運搬型システムは劣悪な通信環境に設置されることが多く、AC電源が利用できない場合が多い。そこで、ここではセンサノードに加えゲートウェイもAC電源が利用できないケースを想定し、これらのノードはそれぞれに布置されている限りある電力資源を用いて運用されるものとする。このとき、センサノードとゲートウェイから構成される無線センサネットワークの寿命を最大にするようなゲートウェイの配置場所を決定する問題を考える。

4.2 問題設定

センサノード集合とゲートウェイの設置候補場所集合は与えられるものとする。また、各センサが定期的に収集するセンシングデータ量と設置できるゲートウェイ数の上限も与えられるものとする。加えて、各センサノードとゲートウェイで消費する電力に関して次が与えられるものとする。

- ・各センサノードと各ゲートウェイで単位データ量を受信するのに必要な電力量
 - ・各リンクで単位データ量を送信するとき、そのリンクの始点となるセンサノードに必要な電力量
 - ・各ストレージで単位データ量を蓄積するのに必要な電力量
 - ・各センサでデータを収集するのに必要な電力量
 - ・各センサノードと各ゲートウェイの電池容量
- つまり、各センサノードはデータ収集、データ送受信を行うときに電力を消費し、各ゲートウェイはデータ受信、データ蓄積を行うときに電力を消費する。ただし、各消費電力量は扱うデータ量に比例して大きくなるものとする。このとき、最適ゲートウェイ配置問題は次のようになる。

最適ゲートウェイ配置問題

目的関数：

ネットワーク寿命の最大化

制約条件：

- ・各センシングデータはいずれか1つのゲートウェイに伝送されなければならない。
- ・各センサノードで収集されたデータは分割して伝送することはできない。
- ・設置するゲートウェイ数はその上限以下でなければならない。

4.3 アルゴリズム

本章では、最適ゲートウェイ配置問題に対し、ライフスパン法に基づく解法アルゴリズムを提案する。ライフスパン法の基本的な考え方は良く知られたヒューリスティクス法であるであるタブー探索法のそれと同一である。このため、ライフスパン法はタブー探索法の一つで

あると見なされている。また、ライフスパン法は既に多くの組み合わせ最適化問題に適用され、その有効性が検証されている。

ライフスパン法においては、幾つかのノードまたはアークに対してライフスパンと呼ばれる一定の期間を設定して、その期間内にあるノードまたはアークを可能解に含むことを禁止する。そして、この一定期間の禁止という操作により同一解の繰り返し探索を防止すると共に、探索空間をより広く設定することができ多様な解を探索することができる。ライフスパン法では、ライフスパンにより定義された近傍の探索とライフスパンの更新を繰り返し行うことにより良質な可能解を探索する。近傍探索には様々な方法があるが、本論文で提案する近傍探索の概略を以下に挙げる⁵⁾。

近傍探索

- STEP1. 電池寿命が最小のノード i を求め、ノード i を経由する伝送経路の中から任意に1つの伝送経路 P を選択する。
- STEP2. 伝送経路 P と同一の始点を持ちノード i を経由しない伝送経路の中で、消費電力量が最小の伝送経路 P' を求める。
- STEP3. 目的関数値を改善できる場合は伝送経路 P を伝送経路 P' に入れ替える。終了条件を満たすまで同様の操作を繰り返す。

図5に近傍探索の様子を示す。ただし、図5のSTEP1において電池寿命最小のノードを経由する伝送経路はそれぞれ異なる色の点線で示してある。

4.4 数値実験

本章では、3.4節で説明したロンドン地下鉄から得られたデータに提案アルゴリズムを適用した。ここでは、設置されているセンサノード数とその設置場所、ゲートウェイ設置場所候補数とその候補場所を乱数を用いて生成することにより様々なノード設置パターンに対して数値実験を行った。その結果を以下に示す。ただし、数値実験に関しては以下の通りである。

- ・使用言語はC言語で、使用PCの仕様はWindows XP, 3.6GHz, 0.98GB RAMである。
- ・求めた可能解は相対誤差 $\epsilon = (UB - LB) / UB$ で評価した。ここで、 LB と UB はそれぞれ最適値の下界値（得られた可能解が与える目的関数値）と上界値である。
- ・センサノード数とその設置場所、ゲートウェイ設置候補場所数とその場所は一律乱数を用いて地下鉄トンネル内にランダムに定めた。

図6にセンサノード数54、ゲートウェイ設置候補場所数10、設置可能なゲートウェイ数2である問題例にアルゴリズムを適用した結果を示す。ただし、●はセンサノード、■はゲートウェイ設置候補場所、■はゲートウェイ

特集：輸送情報技術

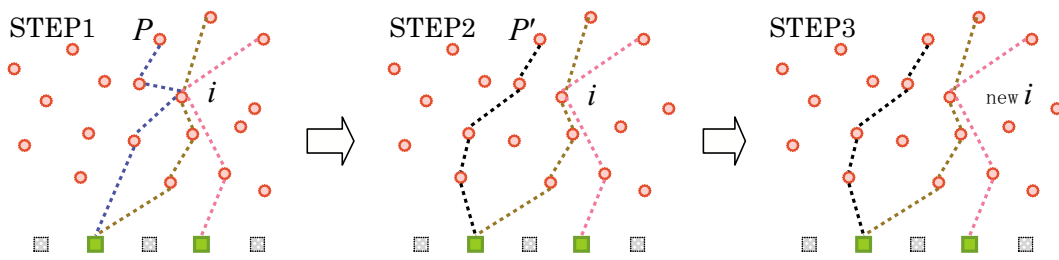


図5 ライフスパン法における近傍探索の様子

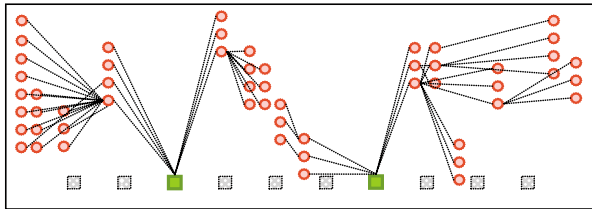


図6 ネットワーク設計案（ゲートウェイ数2）

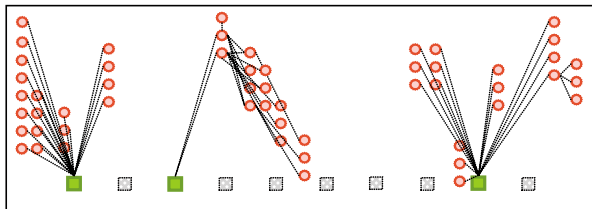


図7 ネットワーク設計案（ゲートウェイ数3）

イである。この設計案は相対誤差7.2%，ネットワーク寿命553日である。

次にセンサノード数54，ゲートウェイ設置候補場所数10，設置可能なゲートウェイ数3である問題例にアルゴリズムを適用した結果を示す。この設計案は相対誤差5.2%，ネットワーク寿命837日である。

その他の数値実験に関する結果を表1に挙げる。なお，表1における問題例においては設置可能なゲートウェイ数は3に固定した。また，各センサノード数 m ，ゲートウェイ設置場所候補数 n ごとに5題の問題例を解いた。したがって，表1における LB ， UB ， ϵ の値は5題の問題例の平均値である。さらに，計算時間は300秒（CPU time）とした。表1の上界値の決定については，各ノードで最低限消費する電力を元にその値を算出した。

実構造物データと乱数生成データに対する数値実験結果から，平均的に相対誤差5%程度の可能解が得られることが確認できる。相対誤差5%以下であれば最適解に近いと考えることができるため，数値実験の結果は概ね良好なものであると思われる。

5. おわりに

本論文では，最適リレーノード配置問題に対するラグランジアン・ヒューリスティクス法と最適ゲートウェイ配置問題に対するライフスパン法を提案し，これら提案アルゴリズムの有用性を数値実験により検証した。その

表1 数値実験結果

m	n	UB	LB	ϵ
100	10	477.33	459.88	0.0365
	20	477.33	467.95	0.0196
120	10	397.77	384.32	0.0338
	20	397.77	389.98	0.0195
140	10	340.94	327.39	0.0397
	20	340.94	326.05	0.0436
160	10	298.33	285.14	0.0442
	20	298.33	286.16	0.0407

結果，最適リレーノード配置問題に対するラグランジアン・ヒューリスティクス法は既存ネットワークポロジと比較して約1.3倍の寿命を達成する設計案を出力した。また，最適ゲートウェイ配置問題に対するライフスパン法は平均的に相対誤差5%程度の良質な解を出力した。

謝辞

本研究を進めるにあたり，ケンブリッジ大学の曾我健一教授には貴重なご意見を頂いた。また，曾我健一教授をリーダーとする研究プロジェクト“Smart Infrastructure”からもロンドン地下鉄に関するデータを提供して頂いた。感謝の意を述べる。

参考文献

- 1) A. Alfieri, A. Bianco, P. Brandimarte and C. F. Chiasserini, “Maximizing system lifetime in wireless sensor networks,” *European Journal of Operational Research*, vol. 181, pp. 390-402, 2007.
- 2) X. Tang and J. Xu, “Extending network lifetime for precision-constrained data aggregation in wireless sensor networks,” *the 25th IEEE INFOCOM'06*, pp. 1-12, Apr. 2006.
- 3) J. Kim, X. Lin, N. B. Shroff and P. Sinha, “On maximizing the lifetime of delay-sensitive wireless sensor networks with anycast,” *the 27th IEEE INFOCOM*, pp. 807-815, Apr. 2008.
- 4) http://www.eng.cam.AC.uk/news/stories/2006/smart_infrastructure/
- 5) A. Hada and R. Tsuchiya, “A Metaheuristic Algorithm for Wireless Sensor Network Design in Railway Structures”, in *Proc. The 5th IEEE ISSNIP'09*, pp. 231-236, Dec. 2009.