

鉄道設備モニタリング用センサネットワークの 導入運用にあたっての課題整理

勝島悠太^{†1} 土屋隆司^{†1‡2} 羽田明生^{‡2}

センサネットワークを活用することで設備の保守管理の効率化が期待されている。設備の状態監視用センサネットワークは設備劣化の将来予測に活用される。高い予測精度を得る為には、高頻度かつ高密度なデータ計測を行う事が有効だが、モニタリングコストが嵩んでしまう。その為、要求精度を満たす範囲でコストを抑えた最適なトレードオフ点を見出す事が課題となる。本研究では、このような課題に対応可能な設備モニタリングシステムを構築する上で詳細な要件・課題を示す。また、エネルギーハーベスタ駆動型センサネットワークの安定稼働を確保した上で、設備の中長期的な状態監視アプリケーションの要求する可用性を満たす運用手法の概略を述べる。

Survey of the issues related to the design and operation of wireless sensor networks for condition monitoring of railway facilities

YUTA KATSUSHIMA^{†1} RYUJI TSUCHIYA^{†1‡2}
AKIO HADA^{‡2}

Application of sensor networks to railway facility management is expected to improve the effectiveness and efficiency of maintenance. In such applications, sensor networks are often used to monitor conditions of facilities in order to avoid potentially dangerous situations as well as to predict the future degradation of facilities. Precision of prediction highly depends on the frequency of sensing and density of sensor nodes. Sensing with high frequency and high density may often lead to high installation and/or operation cost of monitoring systems. Therefore, the tradeoff between the precision of prediction and the installation/operation cost of monitoring systems can be an important issue. In this report we describe a variety of requirements needed to realize condition monitoring systems for railway facilities and based on these requirements, discuss the necessity of energy-harvesting sensor network and their stable operations. We also propose a basic framework for the design and operation of energy-harvesting sensor networks which satisfy the requirements of long-term operation of condition monitoring systems.

1. はじめに

1.1 研究背景

鉄道設備に対する従来の保守管理は、人手による目視検査が中心である。しかし、鉄道設備は大規模かつ僻地にある場合が多く、地中や高所など人手による検査が困難な箇所が数多く存在する。また目視検査の問題点として、見落とし、見間違い等のヒューマンエラーが生じる、経年的な劣化傾向を正確に把握できない、等も挙げられる。これらの問題に対する対応策として、設備保守管理に無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) の活用が期待されている。

様々な対象領域において、状態監視に WSN を活用する取り組みが盛んである。一般的に WSN とは各設備に多数のセンサを配置し、センサによって測定されたデータはセンサ間で無線による送受信が行われ、ゲートウェイと呼ばれる中継装置にデータが集計された上でデータ管理サーバに送信される自律的なネットワークである。測定されたデ

ータは必要に応じてデータの中継を行うリレーノードを介してゲートウェイまで送信される (図 1)。

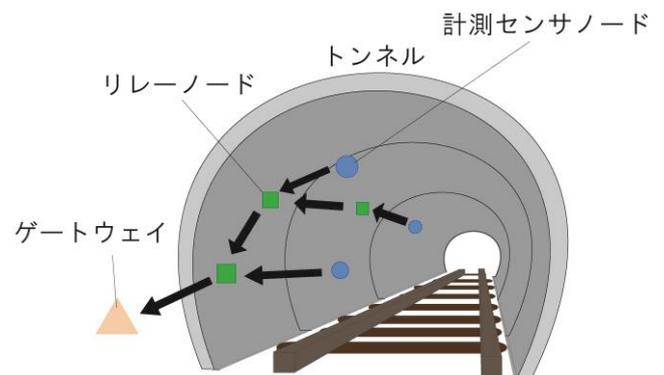


図 1 設備モニタリングシステム例

Figure 1 example of facility monitoring system.

WSN の従来の活用方法には、高速道路橋の変状を監視する構造ヘルスマニタリング[1]、河川を監視することで洪水予測をする河川モニタリング[2]等が存在し、WSN の有用性が示されている。鉄道環境における WSN の活用目的は設備の状態監視により効率的な保守運用の支援をする事である。

設備監視に際して、課題となる点を以下に述べる。図 2

^{†1} 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo, 182-0021, Japan

^{‡2} (公財)鉄道総合技術研究所
Railway Technical Research Institute, Kokubunji, Tokyo, 185-8540, Japan

は鉄道環境での WSN の活用方法を示したものである。データを一定期間収集し、その計測データから対策の目安となる閾値に達する時機を予測することで対策時機を定める。即ち、鉄道における WSN を利用した設備監視は構造物の状態変化を中長期的に把握し、構造物全体の状態変化を認識することで設備劣化の将来予測を行い、適切な対策時期を定めるといった設備の保守管理に活用する。対策の時機を見誤ると重大な事故に繋がりがかねないため、予測精度に対応した「予測の幅」に応じて、最悪の場合を想定して対策をしなければならない。ここで問題となるのは、将来の状態予測精度が低いと対策時機が早まってしまうという点である(図 2)。高い予測精度を得るためには、高頻度かつ高密度なデータ計測を行う事が有効だが、モニタリングコストが高くなってしまふ。そのため、要求精度を満たす範囲でコストを抑えた最適なトレードオフ点を見いだす事が課題となる。

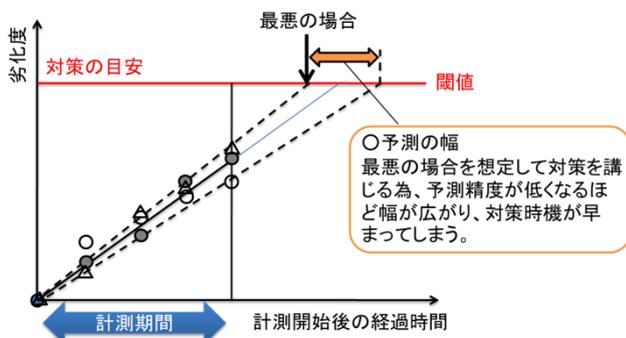


図 2 将来予測図

Figure 2 Future Prediction.

また、一般に WSN の電源には AC 電源やバッテリーが用いられる。鉄道沿線では外部からの AC 電源供給を期待できない場合が多いため、バッテリー駆動型のセンサノードが頻繁に使用される。バッテリー容量は限定されているため、定期的なバッテリー交換が必要となる。センサノードの配置されている場所、個数を考慮するとバッテリー交換は容易ではなく、バッテリー交換に多大なコストがかかる。またセンサノードのバッテリーが枯渇してから交換までの間、ネットワークは停止しているため、ネットワークの持続性が保たれないという問題も存在する。

1.2 関連研究

前述の問題に対し、ネットワークの長寿命化の手法として、リレーノードを最適な配置、設置数にすることでネットワーク全体での消費電力の平準化を行う設計段階での最適化手法[3][4]、センサノードの消費電力を適切に制御することでセンサの電力消費を抑える運用段階での最適化手法[5][6]の研究など多数存在する。これらの技術により長期的なネットワークの運用が可能になり、結果としてコストの削減に繋がる。しかし、センサの電源をメンテナンスフリーにすることはできず、バッテリー交換による運用コストは

かかってしまう。

そこで、周囲の環境に存在するエネルギーを収穫し、電力に変換するエナジーハーベスティング (Energy Harvesting, EH) 技術の活用が注目されている。太陽光、風力、振動、電波などがエネルギー源として挙げられ、WSN の運用に振動発電を利用したシステム[7]や太陽光発電を利用したシステム[8]の提案がされている。電源に EH を用いた場合、センサノードを常時稼働させることは困難であるため、バッテリー残量に応じてセンサノードの稼働・停止の制御を適切に行わなければならない。一般にセンサノードの稼働時間の割合であるデューティサイクル (Duty Cycle, DC) の最大化を目的とする研究が行われている[8][9]。しかし、DC の最大化を行う既存の研究では計測データの時間的、空間的な偏りか生じてしまうことや、同時計測されなければならない各種センサ (傾斜計センサと温湿度センサなど) の考慮がされていない等、設備監視アプリケーション固有の要件が十分反映されていないため、WSN は本来の目的を果たせない場合がある。次項では、設備監視アプリケーションの要件・課題について述べる。

2. 鉄道設備状態監視の要件

要求精度を満たす範囲でコストを抑えた最適なトレードオフ点を見いだす事が課題であり、そのような課題解決のための鉄道設備状態監視アプリケーションの詳細な要件、課題を分析し、その過程を図 3 に示す。

課題を分析するにあたり、信頼性、コスト制約、環境条件の 3 つの方向から分析を行った。信頼性はセンサや計測データ、機器等の信頼性を示す。コストは実運用する上で必要となるセンサ本体の費用や設置にかかる人件費等の導入コスト、センサの交換費用や機器メンテナンスの人件費等の運用コスト、両者のトータルコストを示す。環境条件はセンサの設置個所の環境を表し、対象物がどのようなものであるか、センサの設置個所で使える電源は何か、等を示す。以下、設備監視で考慮すべき要件・課題の分析結果である。

- ① 各種センサの計測頻度が要求を充足
- ② 各種監視用センサと温湿度センサの同時計測
- ③ 計測データの時間的・空間的偏りの排除
- ④ 蓄電容量の必要数の決定
- ⑤ データストレージ容量の決定
- ⑥ 発電デバイスの決定
- ⑦ センサの時刻同期はデータの同時計測時に行う

①, ②, ③は設備劣化の将来予測精度に関わり、④, ⑤, ⑥はモニタリングコストに関わる項目である。①については、対象となる設備、計測すべきデータ (傾斜, 亀裂等), によって要求される計測頻度が異なり、計測頻度が要求を満たせなければ将来予測精度の低下に繋がってしまうため必要となる項目である。②について、設備の経年的な劣化

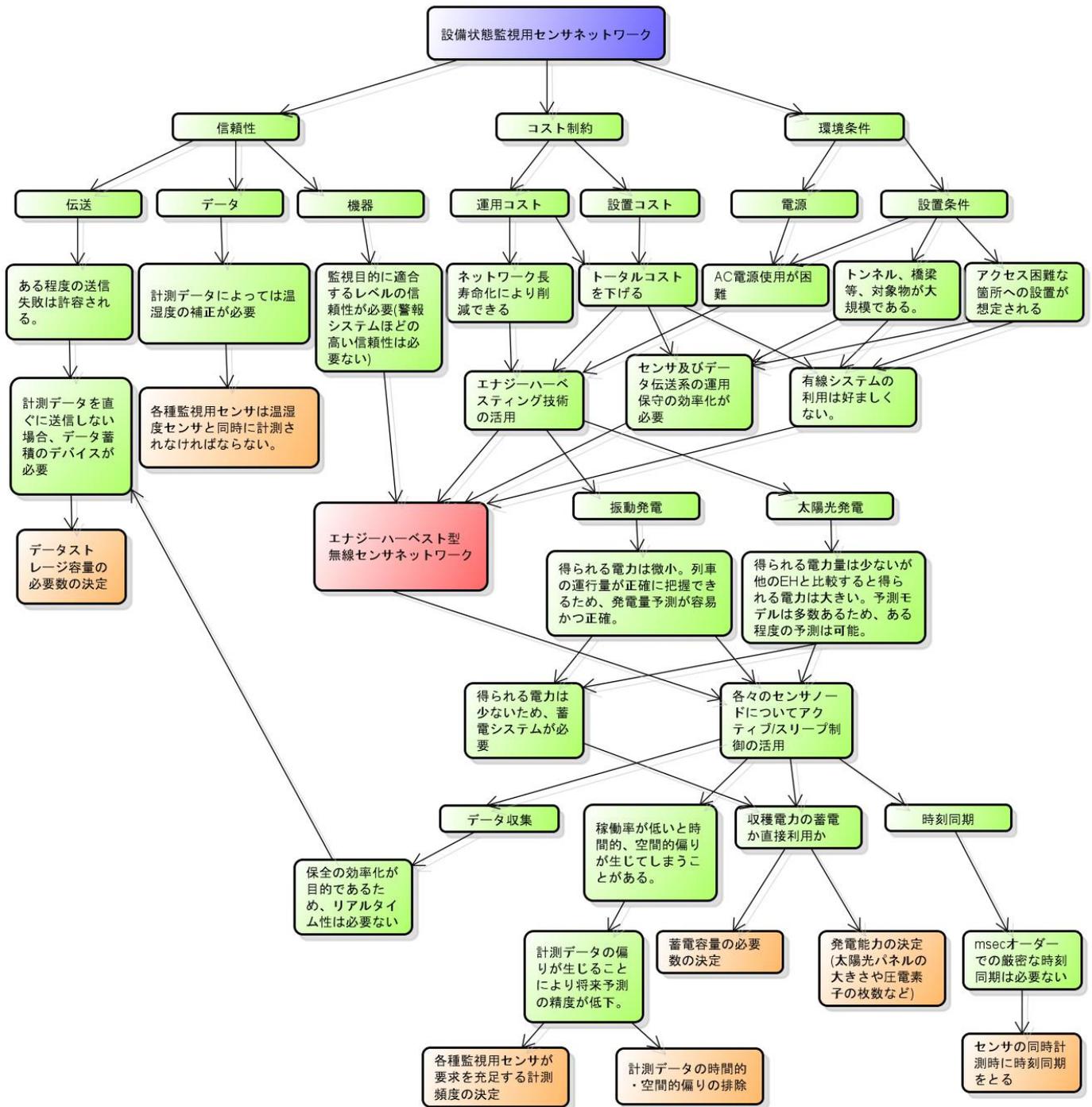


図 3 設備状態監視における要件・課題
 Figure 3 Problems for monitoring railway facilities.

傾向を見る場合、温湿度センサの計測をしなければ計測データが意味のある値にならないことがある。例えば、トンネルの歪みの度合を監視する場合を考える。トンネルの形状は温度や湿度によって膨張、縮小する。その為、計測データの信頼性を確保する為には温度や湿度の補正を加えなければならない。③については、時間的偏りが生じてしまうと将来の設備状態予測の誤差が大きくなってしまいうため、空間的偏りが生じてしまうと対象物全体の挙動を把握でき

なくなってしまうため必要となる項目である。④、⑤、⑥について、コストを多くかけた分だけ高性能、大容量のデバイス利用が可能になり、ネットワークの信頼性の向上、データ計測頻度の増加が見込める。実運用を見据えた場合、センサネットワークの安定稼働を確保し、かつ要求精度を満たす範囲でデバイスの性能、容量を落とし、コストを最小限に抑える必要がある。⑦については、計測データの波形からどのタイミングで計測したデータなのかある程度分

かり、厳密な時刻同期をとる必要がないためである。
 よって、鉄道設備モニタリングシステムを導入運用するにあたっての条件は以下になる。

- 各センサの電源に再生可能エネルギーを利用
- センサを稼働させる分の電力量確保が可能な発電デバイスの利用
- 発電した電力がオーバーフローしない程度の容量を持った蓄電池の利用
- 計測データをオーバーフローせずに一定期間貯めておけるだけの容量を持ったデータストレージデバイスの利用
- ①, ②, ③, ⑦を満たすようなセンサの稼働・停止制御

上述した条件の中でも、コスト、要求精度のトレードオフ関係を考慮した場合、EH技術の活用は必須となる。したがって、鉄道設備モニタリングシステムの構築には、上述の条件を踏まえたエナジーハーベスト型無線センサネットワークの適用が有効である。

3. エナジーハーベスト型システム

ここで、一般的なエナジーハーベスト型システム概要を述べる。以下、バッテリー駆動型システムとは異なる一般的なEH型システムの特性である。

- 不安定で時間とともに変化する発電特性
- エネルギーの可用性に関する不確実性

このような特性により、EH型システムにおいて、多くの場合は蓄電池を利用する。エネルギーの収穫から消費までの流れは、図4のように収穫エネルギーを直接利用する場合、蓄電池を介して利用する場合がある。

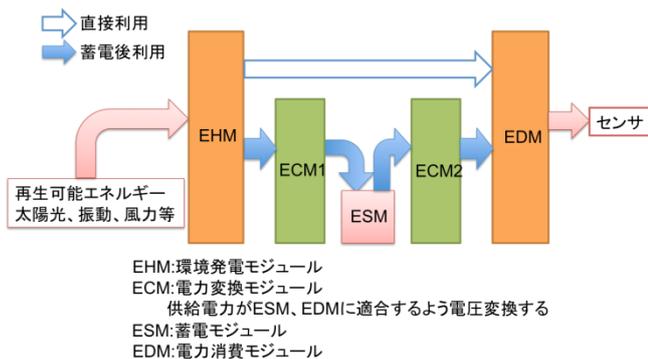


図4 EH型システムにおけるエネルギーの流れ
 Figure 4 Energy Flow in Energy Harvesting System.

直接利用する場合、環境中から得られる再生可能エネルギーはEHMで利用可能な電力に変換され、EDMに送られ、センサの稼働に消費される。蓄電後利用する場合、再生可能エネルギーはEHMで利用可能な電力に変換され、ECM1でESMに適合する電圧に変換される。その後、ESMに電力が蓄えられる。そして、ESMから取り出された電力が

ECM2でEDMに適合する電圧に変換され、EDMへと送られた後、センサに送られる。

エネルギーの消費パターンは3通りあり、①収穫エネルギーを直接利用する、②蓄電池から取り出して利用する、③収穫エネルギーを直接利用し、足りない分を蓄電池から補う(図5)。

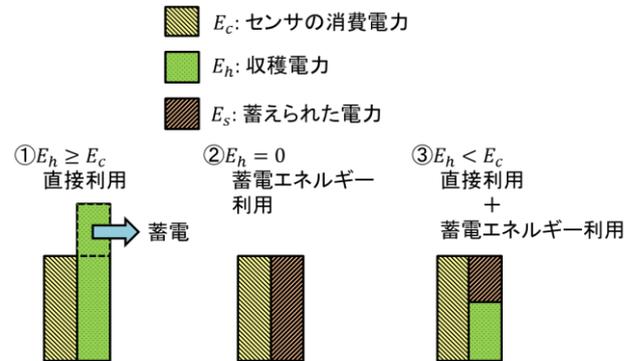


図5 電力消費パターン
 Figure 5 Energy Consumption Pattern.

収穫エネルギーを直接利用する場合はロスが無く、蓄電したものを利用する場合はロスが生じる。また、蓄電池に蓄えられた電力は漏えいし、時間とともに失われる。従って、効率的な運用には①の場合が理想的であるが、求められるタイミングでセンサを稼働させるためには、②、③の運用も考慮する必要がある。効率的なシステム運用を実現するには、要件を満たした上で導入、運用コストを抑えたシステム構成及び運用方法を定める事が重要である。次項では、アプリケーション固有の条件を考慮した、EH型センサネットワークにおける電力管理手法について述べる。

4. 電力管理手法のフレームワーク検討

4.1 システム要件

本システムにおいて、①各種センサの計測頻度が要求を充足、②計測データの時間的・空間的偏りの排除、③各種監視用センサと環境センサの同時計測、等が主な要件となる。

4.2 システムモデル

上記の要件に対して、実用規模の問題におけるスケラビリティを考慮し、システム構成を以下に示す3段階に分割し、実現を目指す。

【システム構成】

- Step1: コスト最小になるようなネットワーク構成の決定
- Step2: コスト最小になるように各センサの静的な運用スケジュールの決定
- Step3: 収穫エネルギー量に応じて各センサの動的な運用スケジュールの決定

ここでの運用スケジュールとは、センサのアクティブ/スリープを制御し、稼働（計測、送受信）タイミングを決定する事である。S1, S2 が含まれる静的なモデルは設計段階, S3 が含まれる動的なモデルは運用段階のものである。ネットワーク構成, 運用スケジュール決定の手順は以下のようになる。

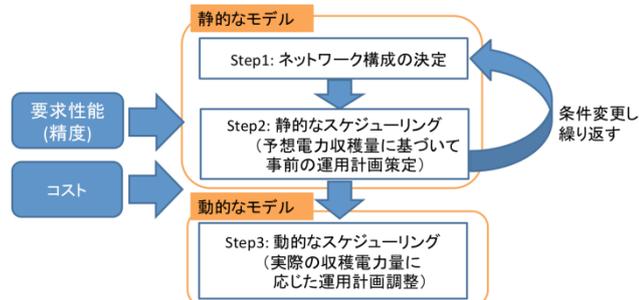


図 6 システムモデル
 Figure 6 System Model.

まず, S1 でネットワーク構成を決定する。次に, S1 で決定したネットワーク構成に基づき, S2 で各センサの運用スケジュールを静的に決定し, 出力する。この時の出力を暫定的な最適解とする。出力に応じて可変パラメータを変更し, 再度 S1⇒S2 の計算を行い, 以降繰り返す事で最適解を求める。解が出ない場合のパラメータ変更は以下のような方法を想定している。求められるタイミングにおいて, 電力不足によりデータ計測が出来ない場合, データ送受信が出来ない場合の 2 通りに分ける事が出来る (図 7)。

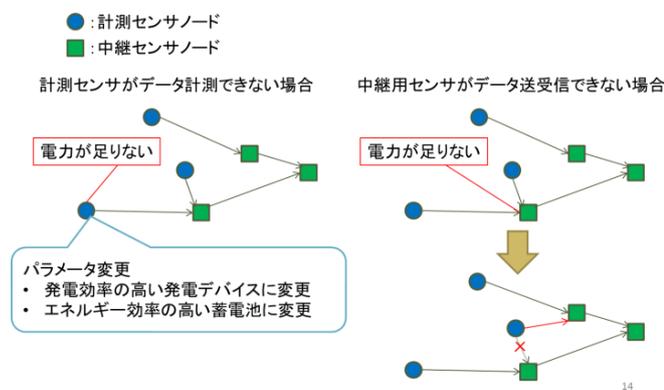


図 7 パラメータ変更手順
 Figure 7 How to change parameters.

データ計測が出来ない場合, 計測タイミングでセンサを稼働させるだけの電力量を確保するには, 蓄電デバイスを蓄電効率の高いものへ変更, 発電デバイスを発電効率の高いものへ変更, 等が考えられる。データ送受信が出来ない場合, データ送受信が集中するセンサノードの稼働頻度を減らし (送受信回数を減らす), 伝送経路を変更する。以上のようにして, 静的なモデルで求めた解に基づき, S3 の動的なモデルで運用スケジュールの更新をリアルタイムで行

う。
 本研究では静的なモデルに焦点を当て, S1 では既存手法の活用, 改良を行い, S2 では新たにスケジューリングアルゴリズムの作成を行う。S1, S2 の技術が確立後, S3 についても取り組む方針である。

4.3 ネットワーク構成の決定

無線センサネットワークのネットワーク構成を効率的に設計する手法に関しては, これまでに数多くの研究が行われている。そこでここでは, 図 6 に示したシステムモデルの Step1 のネットワーク構成に関して, 既存手法を用いて決定するものとする。以下では, 本論文で適用したネットワーク構成の決定手法の概略を述べる。

鉄道設備状態監視を目的とした 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る。そこで, 文献[10]では WSN の設置費用と運用費用の総和が最小となるように, ネットワーク構成を決定する手法を提案している。手法の詳細については割愛するが, そこでは設置費用と運用費用の間に発生するトレードオフ関係を考慮して, WSN の総費用が最小となるように, リレーノード (データの中継機) の配置場所, 計測センサノードとリレーノードの送信出力, データ伝送経路を同時に決定する。この手法で設定した定式化の概略を以下に示す。

WSN の総費用最小設計[10]

【入力パラメータ】

- ・センサ配置, ゲートウェイ配置, 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
- ・送信出力に依存した通信範囲
- ・費用パラメータ (電池消費, リレー設置, 電池交換)
- ・電力パラメータ (データセンシング, データ送信)

【制約条件】

- ・センサデータはゲートウェイまで伝送する。
- ・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。
- ・センサとリレーの送信出力は 1 つのレベルに設定する。

【目的】

WSN の設置費用と運用費用の総和が最小となるように次を決定する。

- ・センサデータのゲートウェイまでのデータ伝送経路
- ・リレー設置場所
- ・各センサと各リレーの送信出力レベル

文献[10]では上記定式化に対し, 近似最適解を算出するヒューリスティックアルゴリズムを提案している。そこで, 本論文では, 上述の定式化とヒューリスティックアルゴリズムを適用して, WSN のネットワーク構成を決定するものとする。

5. おわりに

WSN を利用した設備状態監視により効率的な保守運用の支援をする事が目的である。その際、要求精度を満たす範囲でコストを抑えた最適なトレードオフ点を見いだす事が課題となる。本研究では、このような課題に対する設備モニタリングシステムを構築する上での詳細な要件・課題を示した。またエネルギーハーベスト駆動型センサネットワークの安定稼働を確保した上で、設備の中長期的な状態監視アプリケーションの要求する可用性を満たす運用手法の概略を述べた。今後、スケジューリングアルゴリズムを作成、実装し、シミュレーションを通してモデルの有用性を検証する。

参考文献

- [1] M. Fraser, X. H., A. Elgamal and Conte, J.: Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 24, pp. 11-24 (2010)
- [2] Elizabeth A. Basha, D. R., Sai Ravela: Modelbased monitoring for early warning flood detection, In *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '08)*, pages 295-308, Raleigh, North Carolina (November 2008)
- [3] E.L. Lloyd, G. X.: Relay node placement in wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Computers* 56 (1) 134-138 (2007)
- [4] J. Tamg, P. L., B. Chuang: A relay node deployment method for disconnected wireless sensor networks: applied in indoor environment, *Journal of Network and Computer Applications* 32 (3) 652-659 (2009)
- [5] Xiuzhen Cheng, R. S. M. X. C. D. L., Bhagirath Narahari: Strong Minimum Energy Topology in Wireless Sensor Networks: NP-Completeness and Heuristics, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v.2 n.3, p.248-256 (March 2003)
- [6] S. Cui, A. J. G. and Bahai, A.: Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 6, pp.1089-1098 (2004)
- [7] 小林裕介:鋼鉄道橋における振動発電を利用したモニタリングシステム, *橋梁と基礎* 44(8), 69-72 (2010-08)
- [8] A.Kansal, S.Z.M.B.S., J.Hsu: Power management in energy harvesting sensor networks, *Technical Report ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, Vol.6, No.4, Article 32 (Publication date: September 2007)
- [9] D. Dondi, T. R., P. Zappi: A scheduling algorithm for consistent monitoring results with solar powered high-performance wireless embedded systems, In *Low Power Electronics and Design (ISLPED) 2011 International Symposium on, ISLPED*, pp. 259-264 (2011)
- [10] 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*, Volume 28, April 2012, Pages 20-35.