

IT利用を支援する最適化技術

羽田 明生

前 輸送情報技術研究部
(設備システム 研究員)

土屋 隆司

輸送情報技術研究部
(設備システム 研究室長)



はだ あきお



つちや りゅうじ

はじめに

今日、「最適化」という言葉は実に多くの場面で使用されます。一般に、与えられた制約条件の下で、何らかの評価指標(目的関数)を最大化もしくは最小化することを最適化と言います。実際、「生産計画の最適化」、「施設配置の最適化」、「配送計画の最適化」など、与えられた条件を満たしつつ、効率、コスト、利便性などをできるだけ高くしたいという状況は頻繁にあります。また、「最適化」という言葉をより広く捉えて、ハードウェア、ソフトウェア、サービスなどを最適な状態に近付ける(=改善する)行為全般を指す場合がしばしばあります。鉄道においても、他の輸送機関との競争の激化、地球環境問題への対応の必要性などを背景に、あらゆる分野で最適化が重要な課題となっています。

以下では、鉄道でのIT利用に関わる最適化の一例として、各種設備の状態監視用の無線センサネットワークの導入における最適化について紹介します。

IT導入場面における最適化

近年の情報通信技術の急速な発展により、鉄道の各分野においてIT利用が浸透しつつあります。しかし、単にITを導入するだけでは十分な効果が得られないケースや費用対効果の面でメリットが出にくいケースも散見されます。IT機器を鉄道現場に導入するにあたって、効果的、効率的な実施展開を支援するしくみを提供することが重要です。最適化技術は、ITの実施展開を支援するための基盤技術になり得るものです。

ITの積極的な活用による効率化は社会全体の電力消費を下げる効果がある一方で、IT機器の高密度化、遍在化に伴い、IT利用に関わる消費電力や排熱の問題

が顕在化しつつあります。そのような中、地球環境に配慮したIT機器、IT利用環境の構築が「グリーンIT」の名のもとに進められています。低炭素社会へ向けた社会全体の取り組みの中では、IT分野における一層の低消費電力化や自然エネルギー活用の深度化がますます重要になりつつあります。

以上の点を踏まえて、ITを活用した新しい設備状態監視システムとして近年さまざまな分野で検討が進められている無線センサネットワークを鉄道現場に導入する際の最適化手法の活用例について紹介したいと思います。

電力消費を考慮した センサネットワーク配置の最適化

近年、設備の維持管理を効率化するため、各設備にセンサを配置し、その状態を監視するモニタリングシステムの開発が各分野で行なわれています。鉄道も例外ではなく沿線の構造物や軌道などに設置したセンサから計測データを収集するシステムの開発が進められています(図1)。

この図に示されるように、各センサのデータは、いったんゲートウェイと呼ばれる中継装置に集約された上でデータ管理サーバに送信されるのが一般的です。ゲートウェイからデータ管理サーバに送るための広域網としては、携帯

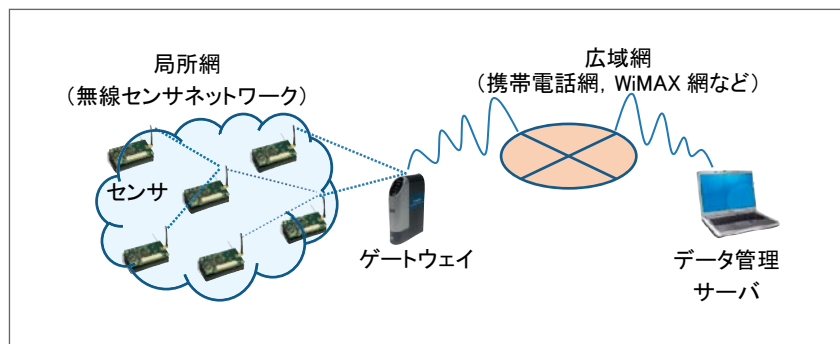


図1 無線センサネットワークによるデータ収集システム

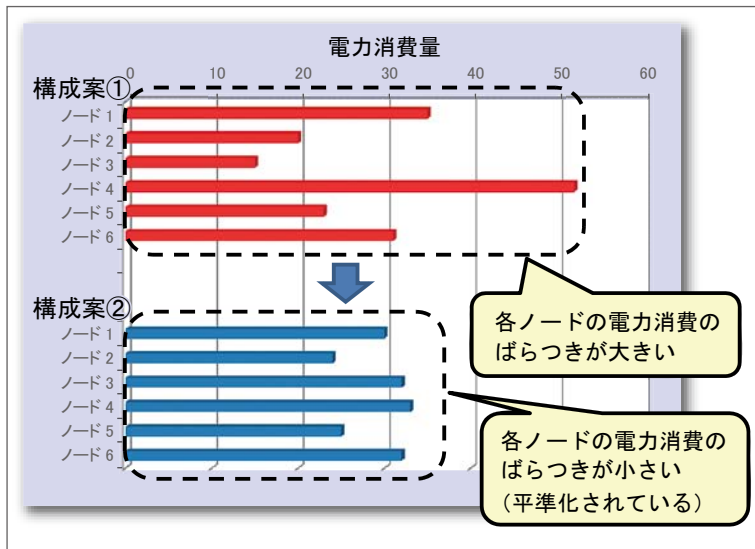


図2 センサノードにおける電力消費の平準化のイメージ

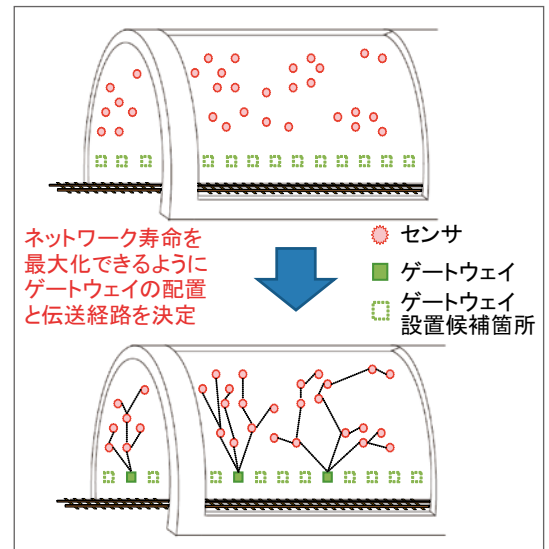


図3 ゲートウェイ配置と伝送経路の決定問題

電話網、WiMAX網の公衆回線を使う方法、自営通信ネットワークを使う方法などが考えられます。一方、各センサのデータをゲートウェイまで集めるための局所網については、一般に、無線センサネットワークと呼ばれる小型無線通信ノード（その多くはセンサを兼用）を相互に結合した通信ネットワークがしばしば使われます。

無線センサネットワークでは、AC電源不要のバッテリー駆動型のセンサノードがしばしば使用されます。鉄道沿線では、外部からの電源供給が期待できないことが多いため、ノードの消費電力をできるだけ削減することは重要な課題です。

そこで、各ノードにおける電力消費を最適化することにより、ネットワーク全体のバッテリー寿命（バッテリー交換作業が必要になるまでの時間）を最長化するネットワーク構成案を作成する手法について検討しました。最も電力消費が多いノードの寿命がネットワーク全体の寿命を決定づけるため、ネットワーク寿命の延伸のためには、各ノードにおける電力消費をできるだけ平準化することが必要です（図2）。ここで、単に全ノードに渡る電力消費の総量を最小化すればよいという訳ではない点がポイントです。図2の構成案①（赤）と構成案②（青）では、トータルの電力消費はまったく同じですが、前者の方が電力消費のばらつきが大きく、ネットワーク全体のバッテリー寿命が短くなってしまいます。

すでに述べたように、各センサのデータは、いったんゲートウェイと呼ばれる中継装置に集約された上でデータ管理

サーバに送信されます。そこで、各センサの位置があらかじめ与えられているという条件の下で、ゲートウェイの配置箇所と各センサからゲートウェイまでのデータ伝送経路を決定する問題を考えます（図3）。

この問題は、ネットワークを構成する各ノードの電力消費の最大値をできるだけ小さくする最適化問題として定式化することができます。「最大値を最小化する」とは一見わかりにくく思われかもしれませんが、このケースでは、考えられる配置計画ごとに、電力消費が最大となるノードを選び出し、それらの電力消費値が最も小さくなるような配置計画を選択するという他にありません。これによってノード間の電力消費のばらつきを抑制し、ネットワーク全体の寿命を延伸することが可能となる訳です。

最適なセンサネットワーク配置を求める

上記のような最適化問題を解くための様々な手法が知られています。具体的な手法としては、数理計画法を用いて厳密な最適解を求める手法と発見的な手法（ヒューリスティクス）を用いて近似解を求める手法に分けられます。上記の問題では厳密な最適解を短時間で求めるのは困難なため、ここでは、ライフスパン法（Life Span Method）と呼ばれる近似解を求める手法を適用した結果について紹介します。ライフスパン法は、最初に、「初期解」と呼ばれる実行可能解（実現可能な配置案）を求めた上で、解の一部を少しずつ改善していくことにより、最適解に近い配置案を求める逐次改善型の手法のひとつです。対象とした問題は、全

長約130m、直径3.8mの地下トンネルに設置予定の総数54個のセンサから成るセンサネットワークの配置問題です。図4に、地下トンネルに設置されたセンサノードの例を示します。

データの収集頻度は1日に1回と仮定しました。また、各ノードでデータの送受信や蓄積に必要とされる電力量は、対象とした地下トンネルの構造的な特徴を考慮して作成した電力消費モデルに基づいて計算しました。

設置可能なゲートウェイの数を変えて計算した結果得られたネットワーク構成とネットワーク全体のバッテリー寿命

を図5に示します。この結果から、設置可能なゲートウェイの数を多くすれば、ネットワーク全体の寿命を長くすることができるのですが、ゲートウェイ数の増加により、センサネットワークの導入コスト(初期コスト)は上昇します。ネットワークの寿命と導入コストのトレードオフを考慮した上で、導入するゲートウェイの数を決定することになります。

本手法は近似解法であるため、得られたネットワーク配置は厳密には最適であるという保証はありません。そこで、センサ数やゲートウェイ数を変化させた計算実験を

実施しました。その結果、本アルゴリズムが生成した配置案が、最適解の上限値に十分近い値を示していることを確認しました(図6)。

中継用ノード配置の最適化

設備状態監視のためのセンサネットワーク配置に関しては、上で述べたような最適化以外の問題設定も考えられます。たとえば、センサとゲートウェイの位置が事前に与えられているという条件の下で、センサノード間の通信を中継するノード(リレーノード)をどこに配置すべきかを決定する問題も考えられます(図7)。一般に無線センサネットワークを構成するノードの通信可能距離は、せいぜい数10m程度に過ぎません。センサの設置位置に応じて、中継ノードを適切な位置に配置することによって、個々のセンサからゲートウェイまでの伝送を確保する必要があります。

この問題に対しては、ラグランジアンヒューリスティック法と呼ばれる最適化手法を用いた計算実験の結果、最適化に十分近い解が求められることを確認しています。

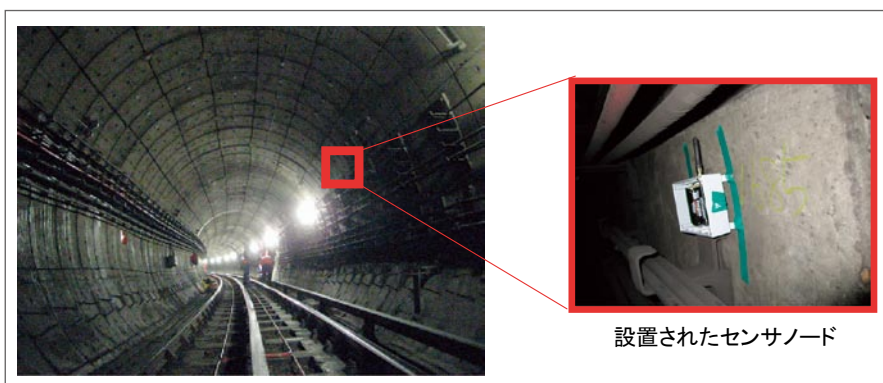


図4 地下トンネルに設置されたセンサノード

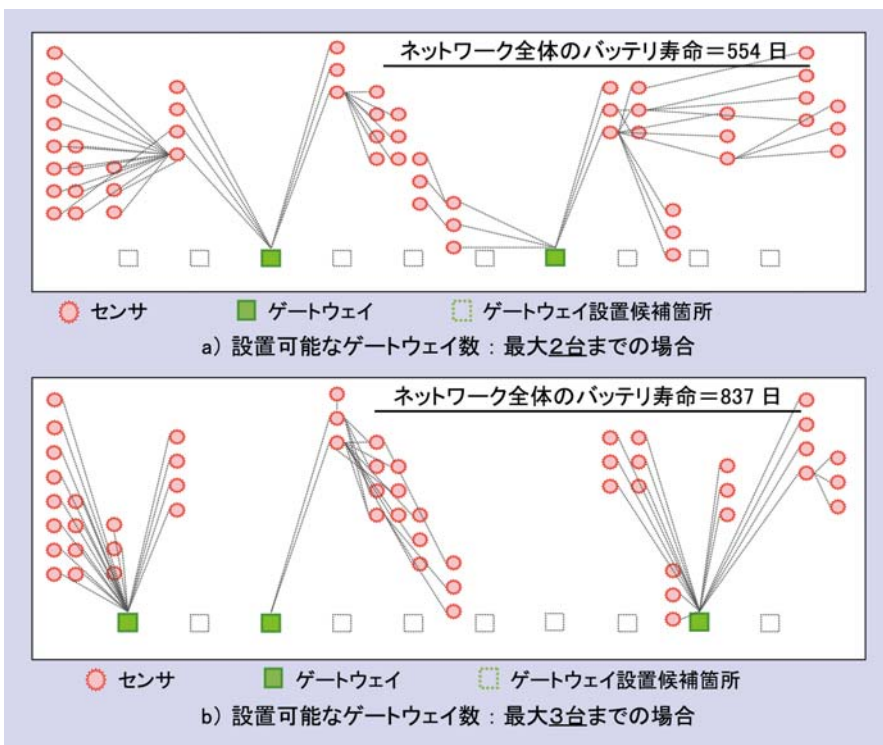


図5 得られたネットワーク構成

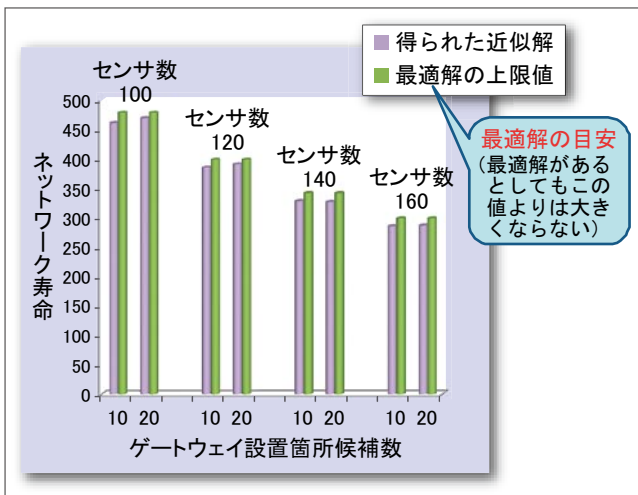


図6 計算実験の結果

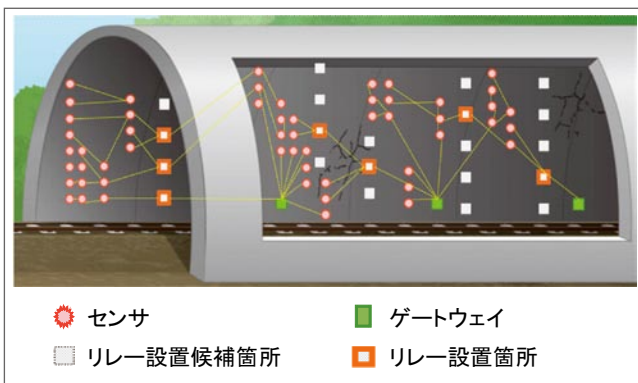


図7 無線センサネットワークにおけるリレー設置箇所決定問題

通信機能とストレージ機能の最適な役割分担

これまでの無線センサネットワークの検討では、発生したデータをいかに効率的にサーバまで伝送するか、という点に重点が置かれてきました。しかし、実際には、発生したセンサデータをすべて漏れなく送信する必要は、必ずしもありません。たとえば、センサが計測した生データをセンサノードやゲートウェイに付属した記憶装置（ローカルストレージ）に記録する一方で、それらのデータに基づいて計算した統計情報（平均、分散、カウント値など）や監視対象物の状態を評価した結果（健全度評価結果など）のみをデータ管理サーバに送るといった使い方が考えられます（図8 (a)）。また、所定のしきい値を越えたデータのみを選別（フィルタリング）してサーバに送るといった使い方も考えられます（図8 (b)）。

このようにセンサノードに付属したストレージを有効に活用し、無駄な通信を削減することにより、バッテリー寿命を延伸することも可能になります。近年、フラッシュメモ

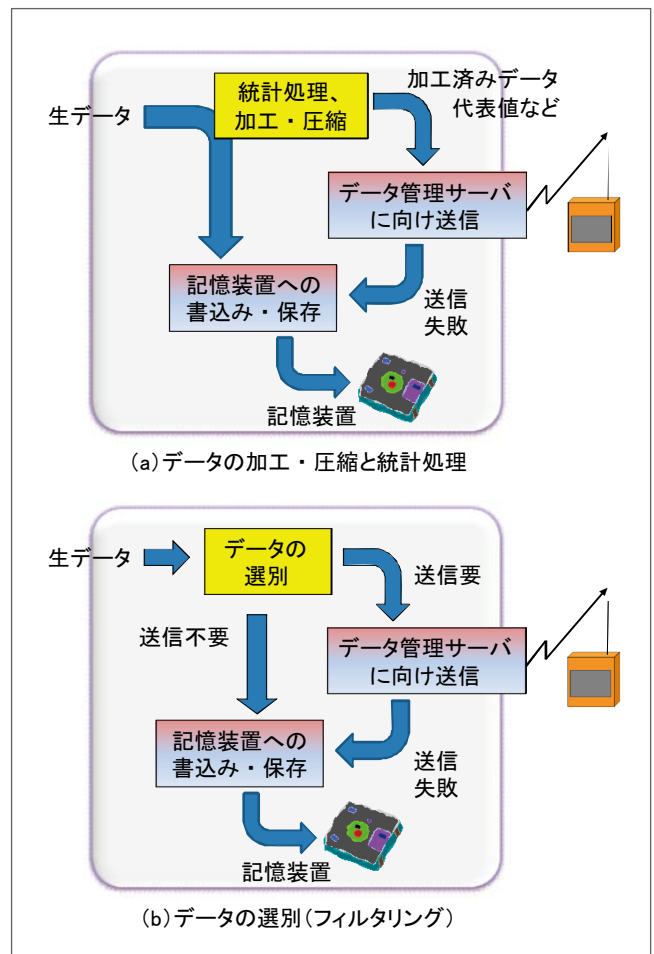


図8 センサノードにおけるストレージの活用

リの大容量化、低消費電力化が急速に進展しつつあることも、このようなストレージ中心型のセンサネットワークに対する追い風になっています。ストレージ中心型のセンサネットワークにおいては、ストレージへの蓄積とデータ伝送の間の適切な役割分担を決める必要があります。具体的には、消費電力はもとより、要求される監視レベル（検知したい異常のレベル、異常発生から検知までに要する時間の許容値）なども勘案した上で最適なシステムを設計する必要があります。ここでも最適化技術の活用が期待されます。

おわりに

鉄道でのIT利用に関わる「最適化」の一例として、各種設備の状態監視用の無線センサネットワーク導入における最適化について紹介しました。今後は、太陽光発電や振動発電などの自然エネルギーの活用を前提にしたセンサネットワークの最適化の検討も進めていきたいと思ひます。

RRR