

鉄道トンネルにおけるストレージ指向 センサネットワークシステムの設計手法

羽田 明生[†] 土屋 隆司[†] 平井 力[†] 小林 裕介[†]

[†] 財団法人 鉄道総合技術研究所

1. はじめに

従来のセンサネットワークにおいては、センサで収集したデータは、ゲートウェイを経由して管理サーバに伝送するのが一般的である。ところが、近年の CPU 性能の向上とフラッシュメモリの大容量化・低消費電力化により、ローカルストレージを利用するとネットワークの運用コストを低減できるようになってきている。つまり、センシングデータを連続的に管理サーバに伝送するよりも、それをローカルストレージに蓄積しておき、後で回収した方が経済的になってきている。このように、“送る”よりも“貯める”ことを重視したセンサネットワークをストレージ指向センサネットワーク (Storage-centric Sensor Network, SSN) と呼ぶ[1]。この SSN に関する研究が近年活発に行われており、その設計手法に関しても多くの提案がなされている[2]。

一方で、構造物の維持管理におけるニーズとしては、地震時などの突発的な異常に対してはリアルタイムで異常を検知する必要があるが、構造物の長期的な劣化傾向を把握する目的のセンシングでは、リアルタイムに情報を収集する必要はなく一定間隔ごとでよい。従って、異常時の警報は即発信し、それ以外のセンシングデータは一定期間蓄積しておく手法が効率的かつ効果的であり、SSN を構造物の状態監視に適用する利点は非常に大きい。そこで本発表では、鉄道トンネルの状態監視システムを取り上げ、そこでの SSN を数理的に設計する方法を提案する。

2. 問題設定

センサとゲートウェイはそれぞれ複数あり、それらの設置場所は与えられているものとする。また、各ゲートウェイにはストレージが布置さ

れていて、センサで取得したデータ量とデータ伝送成功率より定まるデータ量がそこに蓄積されるものとする。また次を確認しておく。

- 各ストレージに蓄積できるデータ量には上限がある。
- 各ゲートウェイで同時に処理できるデータ量には上限がある。

このとき、鉄道トンネルの状態監視システムにおける次のような SSN について考える。

1. 各センサはある一定の周期で同時にデータをセンシングする。
2. 各センサで取得したデータはいずれか1つのゲートウェイに無線伝送される。
3. ゲートウェイでは伝送されたデータを処理し、異常が無いかを判定する。異常があると判定された場合は、ゲートウェイを介して中央の管理サーバに既存の通信網を用いて異常データを伝送する。他方、異常がないと判定された場合は、ストレージにデータを蓄積する。
4. 各ストレージに蓄積されたデータは後日保守作業員等により回収される。

この SSN においては、各ストレージに蓄積されたデータを保守作業員等が現場を巡回して回収する必要がある。しかし、鉄道トンネルは僻地に設置されることも多く、現場の巡回には比較的高いコストが要求される。このため、鉄道トンネルの状態監視システムにおいては、現場を巡回する回数ができるだけ少なくなるように、つまり巡回間隔ができるだけ長くなるように SSN を設計することが求められる。他方、巡回は各ストレージに蓄積されるデータ量が各ストレージの容量を超えない間隔で行わなければならない。それゆえ、巡回間隔をできるだけ長くするためには、各ストレージに蓄積されるデータ量をできるだけ平準化すればよいことになる。

そこで本発表では、各ストレージに蓄積されるデータ量の平準化を目的とする。

A Design Method of the Storage-centric Sensor Network System for the Railway Tunnel

[†] Akio Hada

[†] Ryuji Tsuchiya

[†] Chikara Hirai

[†] Yusuke Kobayashi

Railway Technical Research Institute (†)

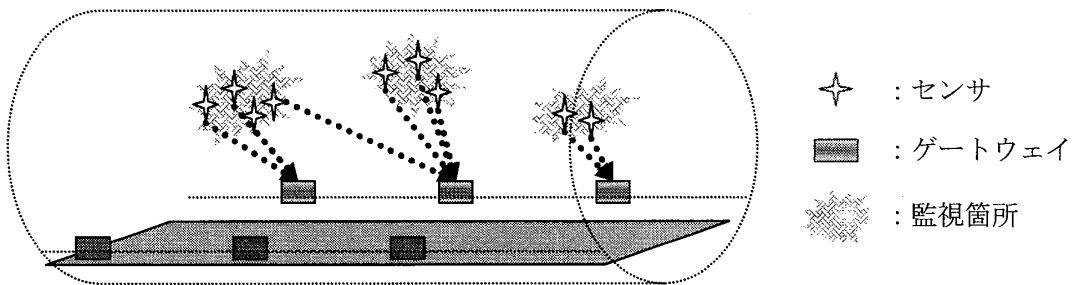


図1 鉄道トンネルにおけるSSNシステム

3. 定式化

センサの集合を N , ゲートウェイの集合を M とする. また, センサ $j \in N$ のセンシングデータ量を a_j , ゲートウェイ $i \in M$ で一度に処理できるデータ量の上限を b_i とする. さらに, センサ $j \in N$ のセンシングデータをゲートウェイ $i \in M$ に伝送した場合に, ゲートウェイ $i \in M$ のストレージに蓄積されるデータ量を c_{ij} とする. このとき, 各ストレージに蓄積されるデータ量を平準化する問題は次のように定式化される.

$$\begin{aligned}
 \text{(P)} \quad & \min \max_{i \in M} \left\{ \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \right\} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in N} a_j x_{ij} \leq b_i, \quad i \in M \\
 & \sum_{i \in M} x_{ij} = 1, \quad j \in N \\
 & x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i \in M, j \in N
 \end{aligned}$$

ここで, 変数 (x_{ij}) はセンサ $j \in N$ のセンシングデータをゲートウェイ $i \in M$ に伝送するとき 1, その他の場合は 0 を取る 2 値変数である.

4. アルゴリズム

上述の問題 (P) は, Mazzola らが提起したエージェントボトルネック一般化割当問題である [3]. しかし, この問題に関する解法アルゴリズムは未だ提案されていない. また, この問題は NP 完全問題である 2 分割問題から多項式時間リダクション可能であるので, 明らかに NP 困難な問題である. そこで本発表では, この問題に対する次のような準最適解法を提案する.

S1. ラグランジュ乗数 $u (\geq 0), w$ を用いて生成した問題 (P) の緩和問題に対する 2 つの分解問題 $(RX(u, w))$, $(RY(w))$ を解くことにより問題 (P) の下界値を得る.

$$\begin{aligned}
 \text{(RX}(u, w)) \quad & \min \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} (u_i c_{ij} - w_{ij}) x_{ij} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in N} a_j x_{ij} \leq b_i, \quad i \in M, \\
 & x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i \in M, j \in N.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{(RY}(w)) \quad & \min \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} w_{ij} y_{ij} \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in N} c_{ij} y_{ij} \leq z_U, \quad i \in M, \\
 & \sum_{i \in M} y_{ij} = 1, \quad j \in N, \\
 & y_{ij} \in \{0,1\}, \quad i \in M, j \in N.
 \end{aligned}$$

- S2. 上記分解問題の最適解を利用して, 問題 (P) の近似解と近似値 (上界値) を求める.
 S3. 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.
 S4. ラグランジュ乗数を劣勾配法で更新して, S1 に戻る.

5. 数値実験

提案手法の有効性を検証するために, 数値実験を実施した.

6. おわりに

本発表では, ラグランジアンヒューリスティック法に基づく鉄道トンネルにおける SSN の設計手法を提案した. 今後は実データによる検証を行う予定である.

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大変貴重なご意見を頂きました. この場を借りて感謝の意を表します.

参考文献

- [1] Yanlei Diao et al, "Rethinking Data Management for Storage-centric Sensor Networks", CIDR 2007, pp.22-31(2007).
 [2] Liqian Luo et al, "EnviroStore: A Cooperative Storage System for Disconnected Operation in Sensor Networks", INFOCOM 2007 IEEE International Conference on Computer Communications, pp.1802-1810(2007).
 [3] Mazzola et al, "Bottleneck Generalized Assignment Problem", Engineering Costs and Production Economics, 14, pp.61-65(1988).