

異種センサネットワークを統合する鉄道設備モニタリングシステム

○正 [土] 野末 道子 (鉄道総研)

正 [電] 土屋 隆司 (鉄道総研)

佐藤 紀生 (鉄道総研)

渡辺 義大 (鉄道総研)

Monitoring system for railway facilities based on integrated heterogeneous sensor networks

Michiko NOZUE, Railway Technical Research Institute 2-8-38 Hikaricho Kokubunjishi, Tokyo

Ryuji TSUCHIYA, Railway Technical Research Institute

Norio SATO, Railway Technical Research Institute

Yoshihiro WATANABE, Railway Technical Research Institute

Recent progress in information and sensing technologies accelerated the emergence of various types of monitoring systems for use in the maintenance of social infrastructures. This paper covers the sensor network system which we are currently developing for the monitoring of railway facilities including various types of civil-engineering structures and tracks. The particular focus is on the practical developing methodologies for integrating a variety of sensors and several communication media into a unified network system while satisfying the requirements from typical monitoring applications

Keywords: wireless sensor network, monitoring system, data stream mining, facility management, adhoc network

1. はじめに

近年の情報通信技術、センサ技術の急速な進展を背景に、鉄道分野においても構造物を始めとするさまざまな沿線設備をモニタリングすることにより、設備の維持管理を効率化する研究が行なわれている¹⁾。中でも注目されているのが、無線通信機能を持つ多数のセンサノード群から構成される無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network)²⁾である。各センサノードは、センサ機能に加えて、無線通信機能、計算機能 (プロセッサ)、電源等を備えた小型の機器であり、外部のセンサを接続する汎用インタフェースを有するものもある。近年、Mote³⁾や Sun SPOT⁴⁾等、安価な小型無線センサノードが容易に入手可能になりつつあり、鉄道分野においてもこれらの汎用センサノードの活用に関する検討が進められている。センサおよびセンサネットワークは、センシング対象物やその環境に応じて個別に選定、最適化される場合が多く、使用するセンサノードや通信手順もさまざまである。また、センサネットワーク (局所網) と既存ネットワーク (イントラ/インターネット等の広域網) とを結合するためのゲートウェイ機能の実現も重要であるが、その設計にあたっては、多様なセンサネットワークや通信手段に対応する柔軟性、拡張性を確保する必要がある。

我々は、鉄道設備のモニタリングのために、様々なタイプのセンサおよび無線システムを収容可能で、かつモニタリングアプリケーションからの多様な送受信要求にも応えることが可能なゲートウェイ装置を開発している。本稿では、このゲートウェイ装置設計にあたっての要件整理結果とその基本アーキテクチャについて紹介する。

2. センサネットワークの鉄道への適用にあたっての要件の整理

鉄道設備のモニタリングでは、取り扱うセンサが多岐

に渡るため、その特性、用途に応じたデータ通信機能の提供が必要となる。たとえば、一方的にデータをセンタに収集するだけでよい場合とセンタ側からのデータ要求にセンサが応答する必要がある場合とでは、センサネットワークの要求仕様は大きく異なる。また、センサ自体の設定変更 (たとえば、センシング周期や伝送周期等の変更) を含む遠隔制御が必要な場合には、より複雑な手順が必要となる。また、センサが異常 (あるいはその予兆) を検知した段階でただちにセンタに通知し、センシング頻度やセンタへのデータ伝送頻度を上げるといった自律的な制御が必要な場面も想定される。

一方、モニタリングにより大量に獲得されるデータを、ネットワークを介してただちに送らなければならないとは限らない。たとえば、センサが計測したデータをローカルストレージに蓄積しつつ、統計情報 (平均、分散、カウント値等) や所定の閾値を超えたデータのみセンタサーバに送信するといった運用もあり得る。これにより日々のモニタリングニーズ (異常あるいはその予兆の早期検知等) に対応しつつ、後日、保守担当者等により回収される生データを用いた詳細な分析が可能となる。モニタリングデータに変化が少ない監視対象物については、このようなモニタリング手法の方が効率的であろう。

各設備の状態を継続的に把握していくためには、センシング/モニタリングシステム自体の信頼性も重要である。個々のセンサの信頼性は言うまでもないが、センシングデータを伝送するネットワークシステムの信頼性をいかに確保するかも課題である。そのためには、個々の機器の稼働状況を、当該ネットワーク自体を用いて確認することが望ましい。たとえば、データの到着周期やヘルスチェック信号を監視し、ネットワークの異常を検知するといった方法が考えられる。これは、設置されるセンサや中継ノード等、センサネットワークを構成する各機器自体

のメンテナンスを効率的に行う上でも重要な機能である。また、データ伝送系の冗長化により信頼性を確保する方法も考えられる。我々が開発中のシステムでは、中継局に一旦集約したセンシングデータを、携帯電話のネットワークを介して伝送する方式に加え、列車を用いて収集したり、マルチホップ伝送等により最寄りの拠点に伝送する方式などを並行して開発中であり、これらを動的に切り替える方式についても検討中である。

センサデータ伝送システムの設計にあたっては、上のような多様なモニタリングニーズやデータ通信ニーズに対応可能な高い柔軟性、拡張性を確保することが重要である。

3. 鉄道設備モニタリングシステムの基本構成

鉄道設備モニタリングシステムのネットワーク部分の基本構成をFigure 1に示す。このネットワークでは、沿線の各設備に付帯して設置されるさまざまなセンサからの情報を集約してセンサのサーバに向け、伝送する「センサ側ゲートウェイ」および各地から受信したセンサデータをIPネットワーク上のセンサデータ管理システム（センサDB）にフォワードするための「サーバ側ゲートウェイ」が中心的な役割を果たしている。センサ側ゲートウェイとサーバ側ゲートウェイの間の通信は、私設の無線通信網（アドホック無線ネットワークを含む）による接続に加え、走行列車を用いたデータ取得・運搬も可能としている。

センサ側ゲートウェイへのセンサの収容方法は、アナログインタフェースによる接続、デジタルインタフェースによる接続（シリアルポート）、および局所センサ網による無線通信の3種類をサポートしており、センサの特性や設置環境に応じて適当な方式を選択することが可能である。このゲートウェイでは、各センサからのデータを集約し、サーバに向けて送信するだけでなく、サーバ側からセンサに向けた制御コマンド（データ取得要求、センシング頻度変更等）を転送する機能やセンサからのデータに基づいて（閾値判定等の結果に基づいて）自律的にセンサを制御する機能も有している。

サーバ側ゲートウェイは、センサネットワークと既存のIPネットワーク（イントラネット等）との接点となるものであり、センサから到着したデータをセンサデータ管理システムに転送する。これにより各センサのデータがセンサデータDBで一元管理される。

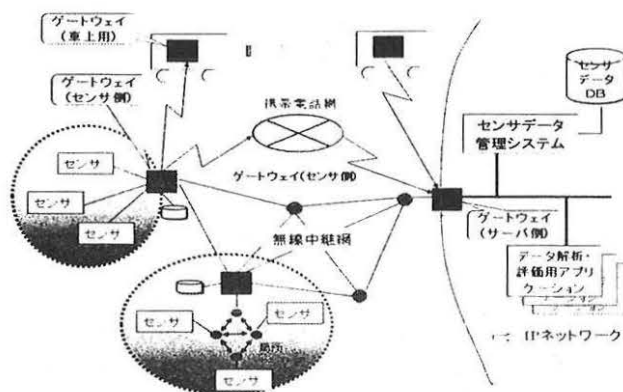


Figure 1 Basic Structure of Railway Facility Monitoring System

4. モニタリングシステム用ゲートウェイの設計と実装

以下では、開発したモニタリングシステムのデータ伝送処理において中心的な役割を果たす、センサ側ゲートウェイ装置およびサーバ側ゲートウェイ装置について、より詳しく報告する。また、収集されたセンサデータを管理するためのセンサデータ管理システムについても簡単に紹介する。

4.1 センサ側ゲートウェイ

センサ側ゲートウェイのソフトウェア構成についてFigure 2に示す。

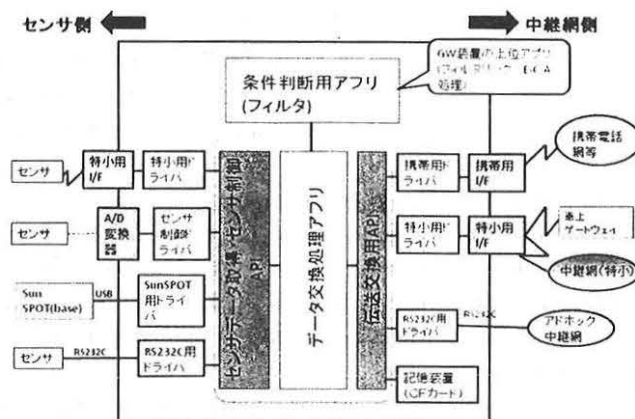


Figure 2 Software Structure of Sensor-side Gateway

(1) センサ側のインタフェース

センサ側のインタフェースとしては、RS232Cによる接続を基本としており、所定の手順に従うことにより、いかなるセンサでもゲートウェイとの間でデータ/コマンドの転送を行うことができる。また、特定小電力無線によるワイヤレス接続や、アナログインタフェースを介したセンサ直結も可能である。ただし、アナログ接続の場合には、接続するセンサの仕様に合わせたドライバを個別に作り込む必要がある。

また、現在は未実装であるが、市販の無線センサネットワーク（図中のSunSPOT）をゲートウェイに収容する計画もある。これにより、特定のエリア内のセンサデータを無線で一括して収集するといったことも容易になると考えられる。

センサからのデータ取得、センサへのコマンド送信に関しては、センサIDをキーにした共通のアクセスメソッドを提供するAPI(Application Program Interface)を構築した。これにより、各センサのゲートウェイ装置への接続形態の違いを吸収することが可能となり、データ交換処理の実装を容易化することができた。

(2) 中継網側のインタフェース

中継網側については、携帯電話網（FOMA網）、特定小電力無線（429MHz帯）、無線アドホック網（2.4GHz帯）等とのインタフェースをサポートしている。特定小電力無線は、中継網（固定網）を介した、サーバ側ゲートウェイとの通信に加えて、車上のゲートウェイとの通信により、走行列車によるセンサデータの収集に用いることも可能である。また、無線アドホック網を用いることにより、センサを一時的に設置して一定期間のみデータ収集を行うような場面で簡易にシステムを構築できるというメリ

ットもある。

多様な通信手段をサポートすることにより、ゲートウェイ装置の設置環境に応じて適切な通信路を構成し、効率的なセンサデータ収集システムを構築することが可能となる。また、複数の通信手段が利用可能な環境下では、通信手段間の優先順位付けに基づいた通信路の動的な選択や、異常時の経路自動切替を行うことも可能である。センサ側のインタフェースと同様に、通信手段の違いを吸収するための API（伝送交換用 API）を構築している。

(3) ローカルストレージへの書き込み

すでに述べたように、取得したセンサデータは必ずしも「すべて」「瞬時」にサーバに伝送されなければならないというものでもない。緊急性のあるデータや統計処理された後の情報のみをサーバ向けに伝送し、残りのデータはゲートウェイのローカルストレージに蓄積しておくことにより、不要なデータ伝送を減らすことが可能となる。そこで本ゲートウェイでは、「ローカルストレージへの書き込み」を通信手段の代替案のひとつとして選択できるようにしている。デフォルトでは、ストレージへの書き込みは最も優先順位の低い代替案としているため、たとえば、センサデータのサーバへの送出がすべて失敗した場合などには、当該データはストレージに記録されることになる。なお、ストレージデバイスとしては、コンパクトフラッシュを使用している。

(4) 条件判断機能

モニタリングシステムでは、発生した事象（および発生時の条件）に応じてシステムが適切な処理を実行することが必要となる。たとえば、「〇〇センサの計測値が△△を超えたらアラームで知らせる」「〇〇センサからのデータが到着したら、ただちに、近接エリアのすべての××センサによる計測を開始する」「選択した中継網に送信したデータがエラーとなった場合は、所定の優先順位に従って代替通信路で再送する」等といったような処理を円滑に実行することが求められる。このようなイベント駆動型の処理をユーザレベルで簡単に指定することができるしくみを上記ゲートウェイに実装することを現在検討中である。

(5) ゲートウェイ装置のハードウェア仕様等

開発したゲートウェイ装置では、低消費電力性、高信頼性を考慮し、ファンレス設計、ハードディスクレスのハードウェアを採用している。ハードウェア仕様の概要を Table 1 に、外観を Figure 3 に示す。

Table 1 Hardware Specifications of Sensor-side Gateway

項目	仕様
CPU	Intel XScaleXP-425, 533MHz
メモリ	オンボード 128 MB RAM, 32 MB フラッシュディスク
シリアルポート	RS-232/422/485, 8 ピン RJ45×8
USB	USB 2.0 host×2
拡張メモリ	CompactFlash
他の外部 I/F	PCMCIA
ユーザ I/F	LCM ディスプレイ & HMI 用のキーパッド
OS	Linux

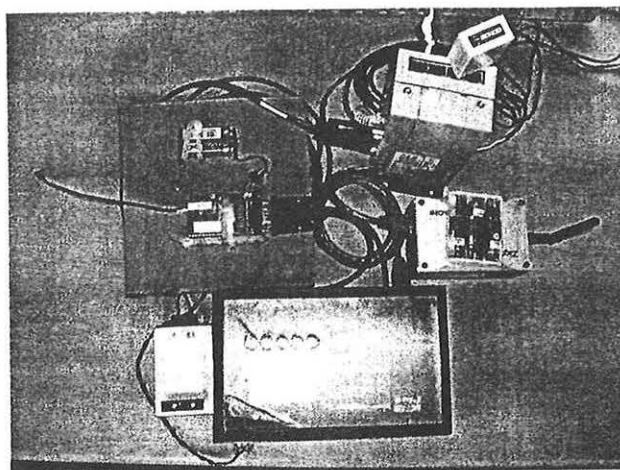


Figure 3 Appearance of the Sensor-side Gateway

4.2 サーバ側ゲートウェイ

サーバ側ゲートウェイでは、センサ側ゲートウェイと同様に、携帯電話網（FOMA 網）、特定小電力無線、無線アドホック網（ZigBee 等）などのインタフェースをサポートしている。サーバ側では、IP ネットワーク上にセンサデータ管理システム（センサデータ DB）や各種のデータ解析・評価用アプリケーションを搭載した計算機が接続されるため、本ゲートウェイ装置では、上記中継網と IP ネットワークとの間のプロトコル変換を行う機能を提供している。

サーバ側ゲートウェイでは、センサ側ゲートウェイとほぼ同様の仕様のハードウェアを使用しているが、OS としては Windows XP を使用している。

センサ側ゲートウェイと同様に、サーバ側ゲートウェイにおいても、各センサはあらかじめ定められたセンサ ID を用いて同定可能である。したがって、サーバ上のアプリケーションプログラムは、センサがどのネットワークを介してどのように接続されているか（ネットワークの構成）を一切意識する必要がない。これは、各ゲートウェイ上に、センサ ID と当該センサへのアクセスメソッド（アクセス I/F）の対応表を保持することによって実現している¹。

4.3 センサデータ管理システム

サーバ側ゲートウェイからセンサデータ DB に取り込まれたセンサデータは、センサデータ管理システム⁵⁾により管理される (Figure 4)。このシステムでは、センサから収集されるデータストリームに対して閾値判定を行なうフィルタープログラムを介して異常判定を行ない、必要に応じて数段階での警告メッセージを表示する機能を有する。閾値は事前に設定したものを使うこともできるが、データ学習機能により自動設定することも可能である。センシングデータそのものおよび上記のような警告メッセージは、センサデータ表示システムの GIS 画面上に表示される。また、センサから取得したデータそのものが対象物の異常（の予兆）を示している場合とデータ伝送が異常（所定の周期でデータが到着しない）の場合とは区別して表示される。

¹ 現時点では、この対応表は手動作成となっており、ネットワーク構成やセンサ接続形態の変化に自動的に追従できるものにはなっていない。構成変更への対応の自動化は今後取り組むべき課題のひとつである。

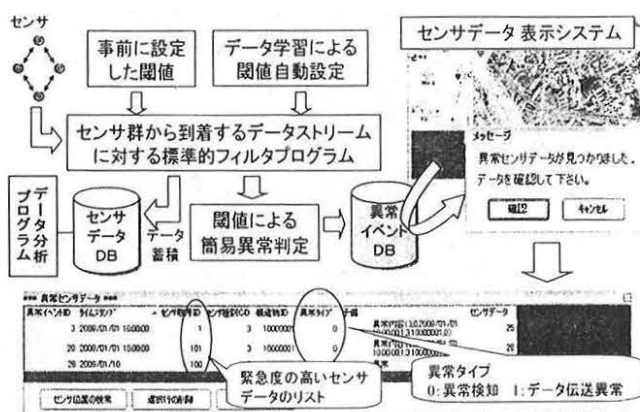


Figure 4 Major Features of Sensor Data Management System

5. 今後の計画

5.1 センサネットワークのテストベッド構築

今回開発したゲートウェイ装置、各種センサ、サーバ側システム等を統合化したセンサネットワークのテストベッドを鉄道総研構内に構築中であり、2009年12月以降、試験運用を実施する予定である。監視対象とする設備、計測方法等はTable 2に示す通りである。なお、鉄道総研構内に対象設備がない場合はダミーデータを用いたデータ伝送の試験のみ実施する予定である。

Table 2 Target Objects and Sensing Methodologies

対象	使用条件	検査目的	計測・検査方法
高架橋	異常時	高架橋柱の損傷度の把握	ピークセンサによる最大応答部材角の計測
鋼橋	常時	鋼桁の疲労亀裂の有無および進展の把握	導電塗料の抵抗値の測定
橋台	異常時	基礎構造物の健全度診断	パッシブ式損傷検知センサによる計測
トンネル	常時・異常時	トンネル覆工のクラック監視	π ゲージセンサによる計測
駅舎	常時	建築部材の損傷度の把握	ひずみセンサ、加速度センサにより計測
橋梁	異常時	河川増水時における橋梁基礎の健全度評価	水位計、速度センサによる計測
レール	常時	レール温度管理	熱電対センサによる接触式レール温度測定

5.2 センサネットワーク監視

すでに述べたように、センシングデータを伝送するネットワークの監視は、モニタリングシステムの信頼性確保のためには不可欠な要素である。サーバ側でのデータ到着監視（実装済み）に加えて、経路情報を用いた障害箇所推定、代替経路を用いた障害情報の通知等の機能によ

り、ネットワーク全体のヘルスチェックを行うしくみを実現することを検討している。

6. おわりに

さまざまなタイプのセンサおよび無線システムを収容可能で、かつモニタリングアプリケーションからの多様な送受信要求にも応えることが可能な、鉄道設備モニタリングシステム用ゲートウェイ装置を開発した。本稿では、このゲートウェイ装置設計にあたっての要件整理結果とその基本アーキテクチャについて概要を紹介した。今後、鉄道総研構内での試験運用を行う予定であり、その結果がまとまった段階であらためて報告したい。

参考文献

- 1) 佐藤紀生, 仁平達也, 磯野純治, 仲山貴司, 渡辺義大: 土木構造物センサデータ収集システムの開発, 鉄道総研報告 第22巻 第6号(2008)
- 2) 戸辺義人: 無線センサネットワークの技術動向, 電子情報通信学会論文誌 A Vol.J90-B No.8 pp.711-719, 2007
- 3) <http://www.xbow.jp/motemica.html>
- 4) <http://jp.sun.com/products/software/sunspot/>
- 5) 渡辺, 土屋, 佐藤: 鉄道構造物の状態監視のためのセンサデータ管理システム, 電気学会交通・電気鉄道研究会, 2009年9月, TER-09-47