

センサネットワーク研究の最新動向と その鉄道への適用可能性

土屋 隆司*

Current Status of Sensor Network Research and its Applicability to Railways

Ryuji TSUCHIYA

This paper describes the state of the art of the sensor network technologies which is applicable to railways, particularly focusing on the application to monitoring of railway infrastructures. First, we give an overview of ongoing activities in sensor network research community both in academics and in industries. This paper covers not only the hardware aspect of sensing devices and sensor networks but also the issues related to software platforms and interface designs which are essential parts of the sensing/monitoring systems. In the latter half of this paper, we discuss the applicability of sensor network technologies to railways and identify the issues that we have to cope with in order to deploy sensor networks in railway environment.

キーワード：センサネットワーク，モニタリングシステム，データストリームマイニング，ストレージ中心型センサネットワーク

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，社会のさまざまな環境に多数のセンサをネットワーク化し配置した，いわゆるユビキタスセンサネットワークに関する研究開発がさかんに行なわれるようになった^{1) 2)}。センサネットワークは，環境モニタリング³⁾，農作物の管理⁴⁾，防犯・防災⁵⁾等をはじめとする様々な応用分野が想定されており，産官学での研究開発が盛んに進められている。中でも近年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)⁶⁾である。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，中には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，Mote⁷⁾やSun SPOT⁸⁾等，安価な小型無線センサノードが容易に入手可能になるにつれ，無線センサネットワークの適用範囲の広がりへの期待も高まっている。

鉄道分野においても構造物をはじめとするさまざまな沿線設備を最新のセンシング・通信技術を用いて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試みが行なわれ始めている⁹⁾。このような状況を踏まえ，センサネットワーク用ソフトウェア開発環境，最適化技術のセンサネットワーク設計への適用，センサ/中継機

器等の自律制御やストレージ中心型センサネットワークの提案等を中心に，センサネットワーク研究に関する最新動向を調査したので報告する。また，センサネットワークの鉄道への適用可能性と課題についても整理したので合わせて報告する。

2. センサネットワークの通信技術

2.1 省電力性と可用性

センサネットワークの研究では，従来から通信技術，ネットワーク技術に関するものが主流を占めてきた。これまでの一般的な無線通信ネットワークと比較すると，センサネットワークでは電力資源，計算資源が大きく制約されることから，ネットワークの設計および運用における，これら資源消費の最適化が最重要課題のひとつとして盛んに研究されている。特に通信に要する電力は比較的大きいため，電力消費を最小化する効率的な通信方式や経路制御 (ルーティング) 等は，センサネットワークにおける最も活発な研究分野となっている^{10) 11)}。近年では，ソーラーパネルなどにより再充電可能なセンサノードから構成されるネットワークにおいて，電力消費の低減と再充電電力の有効活用とのバランスを取るよう各センサノードのセンシングアクティビティを決定する最適化問題も取り扱われている¹²⁾。

一方，センサノードや中継ノードの数が膨大になり得ること，ノードの追加や故障への対応が必要になること等から，ノード変化に適応可能な「再構成可能なネット

* 輸送情報技術研究部 (設備システム)

特集：輸送情報技術

ワーク」(Reconfigurable Network)に関する研究も多い¹³⁾。また、個々のセンサノードの信頼性はそれほど高くはないため、系全体として信頼性、耐故障性をいかにして確保するかという点も重要な検討課題となっている。無線センサネットワークにおいて、必要な監視レベルを確保しつつネットワークの寿命(有効な監視レベルを維持できる期間)を最大化する研究も行なわれている¹⁴⁾。

2.2 遅延耐性を持つネットワーク

センサネットワークにおける通信を考える上で、もうひとつ重要な視点は遅延耐性(Delay-Tolerance)である。センサネットワークの中にはエンドツーエンドの通信、つまりデータの発生箇所からその利用箇所までリアルタイム通信ができるとは限らないものがある。すなわち、発生したデータを最終消費地(データを活用する場所)に届けるのに著しい遅延が発生する場合である。遅延の規模としては、数時間から、数日、あるいはそれ以上に及ぶケースも想定される。これは現在のインターネットのような常時接続を前提としたネットワークでは考えられない特性である。代表例としては、惑星間通信、軍事用アドホックネットワーク(敵の妨害による通信途絶を考慮)および発展途上国等の貧弱なネットワーク環境下での通信(Challenged Internet¹⁵⁾と呼ぶ)等がある。このように、固定配置されたノード間のリンクが不安定、間欠的である場合だけでなく、モバイルノードを利用してデータを蓄積・運搬・転送するstore-carry-forward型のデータ伝送も含め、2000年頃より、Delay/Disruption/Disconnection Tolerant Network(DTN)の名の下に研究が進められている^{16) 17) 18)}。惑星のようにモバイルノードが周期的な挙動を示す場合など、予測可能な移動性(Predictable Mobility)を活用した効率的な経路制御方式も提案されている¹⁹⁾。モバイルノードとして鉄道やバスなどの公共交通機関を活用する提案もあり、注目される²⁰⁾。

狭義のDTNは、インターネットで利用される各種通信技術を標準化する団体であるIETF(Internet Engineering Task Force)のDTN RG(Delay Tolerant Network, Research Group)²¹⁾により検討されている規格(RFC4838)を指す。RFC4838では、転送すべきデータをバンドル(bundle)と呼ばれる可変長データとして蓄積、伝送する機構により信頼性のある通信を実現する方式であるが、IP(Internet Protocol)上での実装を前提にしている。鉄道沿線等での現実のセンサネットワークへ適用する際には、必ずしもIPを前提にせず、より簡易なプロトコルによる軽い実装も検討する必要があるものと考えられる。

2.3 道路交通における動向

移動体との通信としては、ITS(Intelligent Transport System)²²⁾で検討されているDSRC(Dedicated Short

Range Communication: 狭帯域通信)がある。DSRCは、自動車内に設置された車載機と地上側の無線機との間での通信(いわゆる路車間通信)の規格であり、これまでは、ETC(Electronic Toll Collection: 自動料金収受システム)での利用が中心であったが、近年では、ETC以外への適用(多目的化)も進められている²³⁾。具体的には、駐車場の入退出の管理やインターネット接続、ガソリンスタンド等での決済、個人向け情報配信サービス等への適用が拡大することが期待されている。今後はセンシング/モニタリングシステムとしての活用の可能性もあると考えられる。

一方、道路を構成する様々な構造物(部材、設備等)にタグを取り付け、高速(約80km/h)走行車両や携帯端末から各種情報を収集するシステム(ユビキタス道路メンテナンス情報システム)も開発中である²⁴⁾。鉄道分野で検討されている構造物モニタリングシステムに近いコンセプトのシステムであり、その動向には引き続き注目していきたい。

3. センサネットワークにおけるデータ管理技術

3.1 センサからのデータストリームの分析

近年では、センサネットワークを用いて収集されるデータの管理や分析に関わる技術に関する研究も盛んになりつつある。センサから収集される時系列データの分析には統計学や人工知能の伝統的な手法の適用が考えられるが、次々と流れ込んでくるデータ(データストリームと呼ぶ)をどう効率的に処理するかが課題となる。センサからのデータストリームを効率的、効果的に分析する技術はデータストリームマイニングと呼ばれ、トレンド分析、データ学習およびそれらに基づく予測等、さまざまな視点から研究が進められている^{25) 26)}。また、センサからのデータストリームに対して限られた時間とメモリ制約で処理をする工夫が必要な場面(発生するデータを各センサノードや中継ノード等で即座に処理したい場合など)も想定され、新たな研究分野として注目されている。

3.2 分散データベースとしてのセンサネットワーク

従来のセンサデータ管理システムでは、センサデータを、センサからユーザ(情報の利用者)に向けて流れる連続的なデータストリームと見なすのが一般的であった。これに対して、センサネットワーク全体を一種の分散データベースと見なすことにより、データを保管する各ノードに対してオンデマンドで問い合わせ処理を発行し、必要な情報を取得するといったアプローチも台頭してきている^{27) 28)}。たとえばコーネル大学のCougar²⁹⁾というシステムは、センサネットワークへの問い合わせ処理を並列的に実行するためのアーキテクチャとして知られている。同様の問い合わせ処理システムとしては、セン

サネットワーク用のオペレーティングシステムである TinyOS³⁰⁾ 上で動作する TinyDB³¹⁾ が知られている。このような問い合わせ処理は一般的には、データベース検索で用いられる問い合わせ言語風のものなど、宣言的な検索要求記述ができるようなものが主流である。また、センサノード・中継ノードでの知的な振舞いを可能にする手段として、事象の発生条件や状態遷移を記述するルール記述言語の提案もある³²⁾。このような技術を使うことにより、センシング結果に応じて事象の重大性や緊急度を自律的に判断してセンシング頻度を上げたり、サーバに警告メッセージを上げたりといった制御ロジックを容易に実装可能になると考えられる。

3.3 ストレージ中心型センサネットワーク

センサノードにおける処理について検討する上で注目すべきは、プロセッサ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（新世代のNANDフラッシュメモリの出現）である。要するに、各ノードにおけるデータ蓄積（ストレージへの書き込み）と通信のそれぞれに要する消費電力を比較すると、前者の方が相対的に有利になりつつあるということである。このような背景の下、各ノードでのローカルストレージへのデータ蓄積機能を有するストレージ中心センサネットワーク（Storage-centric Sensor Network）の概念が提案されている³³⁾ ³⁴⁾。ストレージ中心センサネットワークでは、発生データは基本的にはストレージに蓄積（後日回収）されるが、必要に応じて（たとえば、異常を検知した場合には）即座にセンターに送信されるといったような処理を実現することも可能である。また、センサが計測した生データを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ーに送るといった運用にすれば、日々のモニタリングのニーズに応える一方で、定期的に回収される生データによる詳細な分析を行なうことも可能になる。これは、モニタリングデータに変化が少ない監視対象物に対する効率的なモニタリング手法として検討に値する。

4. センサデバイス

4.1 センサネットワーク普及への障壁

無線センサネットワークの主要な構成要素である無線センサデバイスは、デバイス自体の小型化、CPUの性能向上、無線LAN、Bluetooth、ZigBee等の無線通信技術の普及に伴い、環境モニタリングをはじめとするさまざまな分野での活用が検討されている。しかし、現状ではまだ応用を模索している段階であり広く普及するまでには至っていない。無線センサデバイスの広範な普及展開を妨げている要因のひとつは、開発ツールを含めたアプ

リケーション開発環境の使いやすさや開発の生産性が一般的なアプリケーション開発に比べて不十分であることが挙げられる。センサデバイスを用いたアプリケーション開発はどちらかと言えば組み込み系の開発の一種と位置付けられることが多く、ベンダー固有の環境やハードウェアの知識の必要性等もあるため、その開発は容易ではない。

4.2 センサデバイス用ソフトウェア開発環境

前述のような課題に対応するために通常のPC等と同様のソフトウェア開発環境を有するセンサデバイスの開発も進められている。Mote⁷⁾ や Sun SPOT⁸⁾ などがその代表例である。中でも Sun SPOT (Sun Small Programmable Object Technology) は小型デバイス向けのJava仮想機械 (Virtual Machine) を搭載し、センサや入出力インタフェースにアクセスするための、抽象度の高いJavaライブラリを提供している。また、ソフトウェアのオープンソース化も進められており、現行の Sun SPOT を拡張する新しいデバイス³⁵⁾ やライブラリ等も登場しつつある。また、プログラムの開発、デバッグ、Sun SPOT への配備、実行から監視までの一連のプロセスを支援するツールなど、開発者に対してより使いやすい開発環境が提供されており、ソフトウェア開発の生産性向上につながる。このようなセンサネットワーク向けの開発環境の整備は、単に開発の生産性向上のみならず、今後のセンサネットワーク応用の裾野の広がりにも寄与するものと期待されている。

鉄道沿線に設置されるセンシング/モニタリングシステムにおいても上記のような、安価なセンサデバイスと、生産性の高いソフトウェア開発環境の活用の組合せにより、低コスト化を図ることが期待される。

5. センサネットワークの鉄道への適用可能性

5.1 適用にあたっての要件と課題

無線センサネットワークは、その注目度の高さとはいずれも裏腹に、その活用事例はあまり多くはない。現時点では、気象、農業等の分野で環境モニタリング用に活用され始めている程度である。しかし、鉄道の各分野および他の業界においても多くの分野ではすでに（センサネットワークの範疇に入らないものも含めて）監視システム、モニタリングシステム自体は活用されている。具体的には車両状態の監視と故障通知、変電所等の監視システム、踏切の監視システム、各種設備のリアルタイムモニタリングシステム、防災用監視システム等である。また、すでに述べたように、鉄道構造物に対してセンシングデバイスを埋め込み、継続的にモニタリングするシステムの研究開発も進められている。今後、センサネットワークの活用により、既存システムの高度化、導入・運用コスト

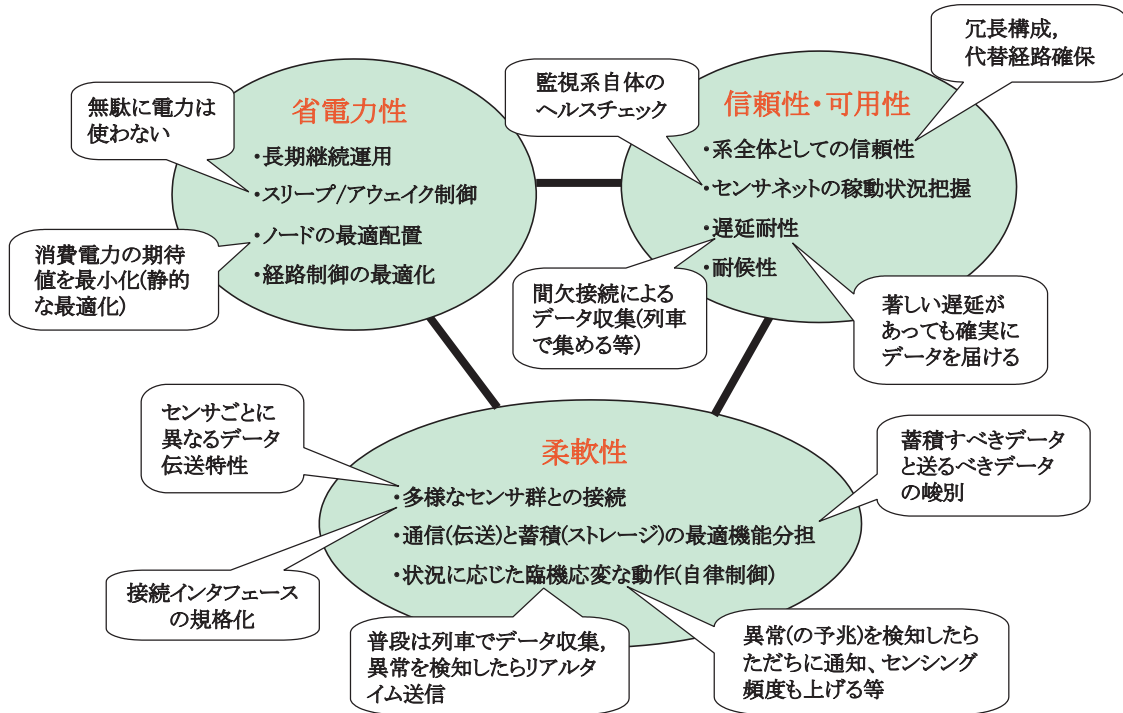


図1 センサネットワークの鉄道への適用における要件・課題

の低減に加えて新たな監視ニーズへの対応等も可能になるものと期待される。そこで上記調査結果も踏まえた上で、鉄道環境におけるセンシング/モニタリングシステムの基盤としてセンサネットワークを適用する際の要件と課題について図1にまとめた。ここでは省電力性、信頼性・可用性、柔軟性の観点から要件・課題を整理している。

(1) 省電力性

利用可能な外部電源が期待できないことが多い鉄道環境においてセンサネットワークを展開する場合に省電力性が重要なのは言うまでもないだろう。

高い省電力性により長期継続運用を実現するためには、センサノード、中継ノード等の機器のスリープ/アウェイク制御(必要なとき以外は休止状態にして消費電力を節約する制御)は不可欠である。現在利用可能な多くのセンサネットワーク関連機器は、スリープモードを有しており、一定周期で行なわれるセンシング/データ伝送/ヘルスチェック等のタイミングのみアウェイク状態とし、それ以外の時間はスリープ状態で電力消費を最小化する制御が可能となっている。しかしながら、省電力性を重視し、機器のアウェイク間隔を長くすればするほど、監視システムとしての見過りリスクや情報伝達遅延が大きくなるという課題もある。対象となる設備や構造物、あるいは、用途(常時の監視なのか、異常時の警報なのか等)に応じて、省電力性とモニタリングシステムの性能との間の最適なトレードオフ点を決定する必要があるだろう。

また、経路制御等において電力消費の最適化を行なう研究が盛んに行なわれていることはすでに紹介したが、このような運用段階での最適化に加え、機器設置段階で

の最適化(運用場面での電力消費の期待値を最小化するように機器配置やデータ伝送経路を決定する)も重要である。鉄道総研では、現在、トンネル等、監視対象となる構造物を具体的に想定したセンサネットワーク配置の最適化の問題に取り組んでおり、結果がまとまり次第、別稿で報告したい。

(2) 信頼性・可用性

各設備や構造物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・可用性も重要となる。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、個々の機器の稼動状況を、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。我々が構造物等の鉄道設備を対象に開発しているモニタリングシステムでは、中継局に一旦集約したセンシングデータを、携帯電話のパケット網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駅等に伝送する方式などを開発中である。複数の通信手段を動的に切り替える方式についても検討中である。

(3) 柔軟性

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ーに収集するだけでよい場合とセンター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変わってくる。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ーに通知し、センシング頻度やセンターへのデータ伝送頻度を上げるといったことが必要な場合も想定される。あるいは、平常時は、データ伝送遅延は大きいものの通信コストが低い、列車によるデータ収集を利用しつつ、緊急時には、コストはかかるが即時性のある、携帯電話を用いた直接通信に自動的に切り替えるといった動的経路選択の機能も求められるだろう。

以上のようなニーズに対応するためには、対象、用途に応じて個別にネットワークを設計・実装するという方法もあるが、費用対効果を考えて、多様なデータ通信ニーズに対応可能なカスタマイズ性を有する柔軟なネットワークシステムを構築することが望ましいと考えられる。

の知的な振舞いが可能なセンサネットワークの構築を進めている。その際、さまざまなセンシング/モニタリングシステムで伝送系、処理系を共有化し、システム構築・運用コストを低減するため、サブシステム間インタフェースを明確に定義した上で可能な限り汎用品を活用したシステム構成とする計画である（図3）。

6. おわりに

本稿では、センサネットワーク研究の最近の動向を概観した。従来から行なわれてきた消費電力低減へ向けたさまざまな取り組みに加えて、遅延耐性ネットワーク、データストリーム分析、分散データベースとしてのセンサネットワーク、そしてストレージ中心型センサネットワーク等、比較的新しい分野での活発な研究開発動向を確認した。また、構造物等、各種鉄道インフラのモニタリングシステムの基盤としてセンサネットワークを適用するにあたっての要件・課題を、省電力性、信頼性・可用性および柔軟性の各観点から整理した。現在、鉄道のさまざまな分野で開発されている高度なセンサ群を効果的に活用するための基盤としてのセンサネットワーク技

5.2 鉄道向けセンサネットワークのイメージ

現在、鉄道総研では、鉄道構造物等のセンシング/モニタリングに適用可能なデータ処理・表示システムを開発中である（図2）。データ処理システムは、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ものである。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（図2の「異常タイプ」）。

これまでに開発したシステムは、センサからのセンター側への一方通行のデータ伝送とサーバマシン上での一括処理というオーソドックスな形態を取っている。しかし、現在は、サーバ側だけでなく、センサノードや中継ノード上での異常判定、緊急度に応じたデータ配送優先度やセンシング頻度の設定等

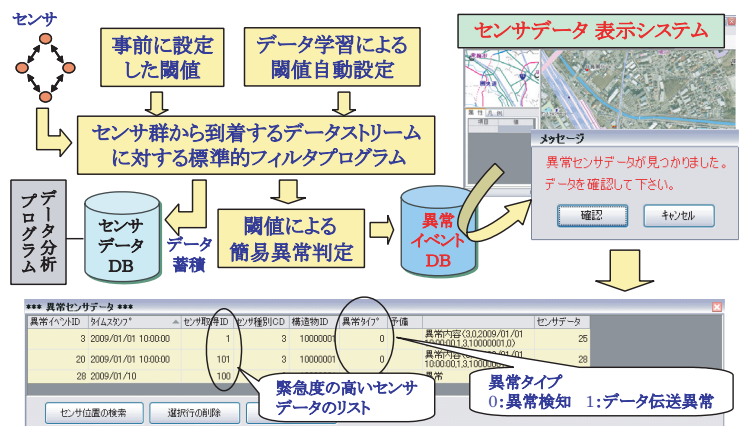


図2 センサデータ処理・表示システム

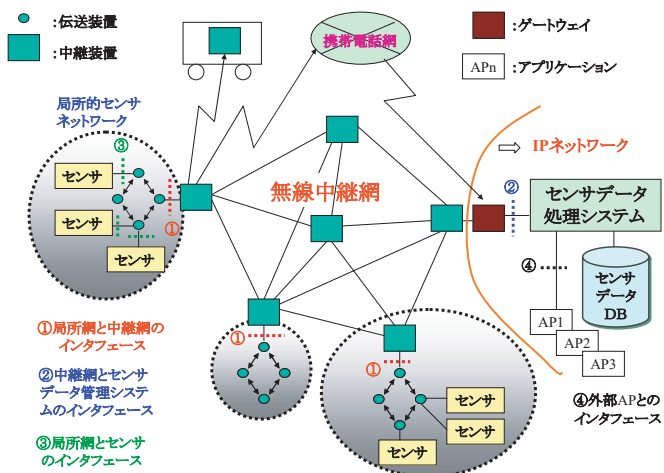


図3 センサネットワークと各種伝送インタフェース

特集：輸送情報技術

術を確立すべく、引き続き研究開発を続けていきたい。

なお、本稿の内容は、鉄道総研設備システム研究室の各メンバーによる技術動向調査および議論の結果を取りまとめたものであることを付記する。

文 献

- 1) 安藤繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南正輝: センサネットワーク技術, 東京電機大学出版局, 2005
- 2) http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/051020_2_3_3.html
- 3) 豊田新: センサネットワークを活用した環境モニタリングシステム, 電子情報通信学会誌 Vol. 89 No.5, pp.419-423, 2006
- 4) 藤雅之: フィールドサーバによるユビキタス環境とセンサネットワークの構築, 電子情報通信学会, 第18回回路とシステム軽井沢ワークショップ論文集, pp. 175-180, 2004
- 5) 倉田 成人: 建設分野におけるセンサネットワークの応用, 電子情報通信学会誌 Vol. 89 No.5, pp.419-423, 2006
- 6) 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
- 7) <http://www.xbow.jp/motemica.html>
- 8) <http://jp.sun.com/products/software/sunspot/>
- 9) 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 Vol. 22, No.6, 2008
- 10) Li, Y. Harms, J. Holte, R., Optimal Traffic-Oblivious Energy-Aware Routing for Multihop Wireless Networks, 25th IEEE International Conference on Computer Communications, 2006.
- 11) Mahlke, S. Madani, S.A. Roetzer, M. Energy Aware Distance Vector Routing Scheme for Data Centric Low Power Wireless Sensor Networks, IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2006.
- 12) Kai-Wei Fan Et al., Steady and Fair Rate Allocation for Rechargeable Sensors in Perpetual Sensor Networks, SenSys'08, 2008.
- 13) 西尾信彦: 自律的に再構成する無線センサネットワーク, さきがけライブ2004, 「強調と制御」領域 研究報告会講演要旨集 インタラクションとコミュニケーション ～主観の客観科学を目指して～, pp.68-76, 2005
- 14) A. Alfieri, A. Bianco, P. Brandimarte, C.F. Chiasserini, Maximizing System Lifetime in Wireless Sensor Networks, European Journal of Operational Research, 181, pp.390-402, 2007.
- 15) Alex, Pentland, Richard Fletcher, "DakNet: Rethinking Connectivity in Developing Nations", IEEE Computer pp.4-9, 2004.
- 16) Kevin Fall, "A Message-Switched Architecture for Challenged Internets", IRB-TR-02-010, 2002.
- 17) Kevin Fall, "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets", IRB-TR-03-003.
- 18) 森山敦文, "DTN (Delay Tolerant Network) におけるメッセージ転送技術の研究動向", 九州リサーチセンターワークショップ～情報ネットワーク技術の新潮流～, 2008/02/01
- 19) Shashidhar Merugu, et al., "Routing in Space and Time in Networks with Predictable Mobility", College of Computing Technical Reports, The Georgia Institute of Technology, GIT-CC-04-07 (2004).
- 20) A. Seth, D. Kroeker, M. Zaharia, S. Guo, S. Keshav, "Low-cost Communication for Rural Internet Kiosks Using Mechanical Backhaul", Proc. MOBICOM 2006, 2006.
- 21) Delay Tolerant Networking Research Group <http://www.dtnrg.org/wiki>
- 22) <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/>
- 23) 伊川雅彦, 後藤幸夫, 熊澤宏之, 津田喜秋, 岡賢一郎: DSRCの多目的利用を実現する路車間通信の環境に適した通信プロトコルの設計と実装, 電子情報通信学会論文誌 A, Volume J88-A, No.2
- 24) http://www.catalog.extec.or.jp/public/catalog_detail.php?id=10010111
- 25) 櫻井保志: 時系列データのためのストリームマイニング技術, 情報処理 Vol.47, No.7, pp.755-761
- 26) 有村博紀, 喜田拓也: データストリームのためのマイニング技術, 情報処理, Vol.46, No.1 pp.4-11, 2005
- 27) Gehrke, J., Madden, S., Query Processing in Sensor Networks, IEEE Pervasive Computing, Vol.3, No.1, pp.46-55, 2004.
- 28) 白石陽: センサネットワークのためのデータベース技術, 情報処理, Vol.47 No.4, 2006
- 29) A Demers, J. Gehrke, R. Rajaraman, N. Trigoni, Y. Yao, The Cougar Project: a work-in-progress report, ACM SIGMOD, Vol.31, No.3, pp.9-18, 2002.
- 30) Alec Woo, Seth Hollar, David Culler, Kristofer Pister, System Architecture Directions for Networked Sensors, 9th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, pp.93-104, 2000.
- 31) S. Madden, M. Franklin, J. Hellerstein, W. Hong: TinyDB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks, ACM Transactions on Database Systems, 2005.
- 32) 富森他: センサノード上の時系列データに対するルールベースの問合せ処理, 第19回データワークショップ2008
- 33) Mathur, G., et al., Capsule: an energy-optimized object storage system for memory-constrained sensor devices, 4th international Conference on Embedded Networked Sensor Systems (2006), SenSys '06. ACM, pp.195-208, 2006.
- 34) Yanlei Diao et al., Rethinking Data Management for Storage-centric Sensor Networks", 3rd Biennial Conference on Innovative Data Systems Research(CIDR), Asilomar, 2007.
- 35) <https://spots-hardware.dev.java.net/>