

道具化するセンサネットワーク

Sensor Networks as a Tool

猿渡 俊介* 南 正輝*

キーワード：センサネットワーク，ユビキタス，アプリケーション，要素技術，課題

1. まえがき

Smart Dust⁴⁾ の概念が提唱されてから 10 年，センサネットワークはスマートグリッドを始めとする環境技術の一要素技術として注目されており，実用化に向けて加速化している．センサネットワークは，センサを具備した小型コンピュータが無線を通じて相互に通信を行いながら実空間上の情報をサイバー空間に取り込むための技術であり，コンピュータに対して圧倒的な数と種類の入力を提供する点に特徴がある．このような特徴を最大限に発揮できる領域の発掘を目指し，センサネットワークの研究コミュニティでは，アプリケーションに焦点を当てたアプリケーション指向¹³⁾ の観点から研究開発が進められてきた．

多様なアプリケーションが提案・実証されていく中で，次の 2 つが明確化されて行った．1 つ目は，各アプリケーションで共通に利用可能な技術の明確化である．限られた電力資源で効率的にデータを収集するための MAC プロトコル，ルーティングプロトコル，時刻同期プロトコル，ハードウェアは研究としては収束しつつあり，一部は実用化や標準化のフェーズにある．2 つ目は課題の明確化である．現状のセンサネットワークはデータを簡単に取得するという観点からは有用であるが，取得したデータの精度や，サービスにフィードバックを返すためのリアルタイム性の観点からは乗り越えなければならない課題が多い．これに向けては，Cyber Physical Systems⁷⁾ をキーワードとして研究が活発化している．

このような観点から，本稿では，センサネットワークにおいて，現状の技術で可能であることと，現状の課題を明確化することを目的とする．具体的には，センサネットワークを道具として使用する場合に，どの要素技術を用いれば良いのか，何ができるかといった，これまでの 10 年間で

センサネットワークが確立したことについて述べる．また，センサネットワークの応用分野ではあるものの，現状ではまだ実現が難しい領域についても議論し，今後 10 年でセンサネットワークが取り組むべき課題についても述べる．

2. アプリケーション指向センサネットワーク

この 10 年，アプリケーション指向で研究開発が進められてきたセンサネットワークは，応用の広さが実証されると同時に，技術課題の抽出と要素技術の確立を繰り返しながら成長してきた．本節では，今まさにキラアアプリケーションとして実用化されつつある環境技術への適用例と，これまでに確立されたセンサネットワークの要素技術を示す．

2.1 アプリケーション センサネットワークのアプリケーションは，時系列で 3 世代に分類することができる．第 1 世代は動植物の生態観測など主に科学用途のアプリケーション，第 2 世代は建造物の安全性監視などの人々の安心や安全に関わるアプリケーション，第 3 世代はビルの各機器の消費電力を監視する電力モニタリングなどのわれわれの身近で役に立つアプリケーションである．アプリケーション全体の動向に関する詳細は文献 13) を参照されたい．

センサネットワークの幅広いアプリケーション領域の中でも，キラアアプリケーションと目されているのがスマートグリッドを始めとした環境技術への適用である．現在，電力メータやガスメータのセンサネットワーク化がスマートメータとして進められている．また，家庭内やビルにおける資源の消費をより詳細にモニタリングする試みもなされている．例えば，電力モニタリング³⁾ や水量モニタリング⁵⁾ では，電力や水量を直接計測するセンサを用いるだけでなく，多様なセンサを用いて間接的に電力や水の消費量を推定する．Jiang らの電力モニタリングでは，加速度センサや照度センサを用いて空調の使用や照明の使用を推定し，使用電力の算出を行う³⁾．Kim らの水量モニタリングでは，加速度センサを水道パイプに設置し，水道パイプの振動から水量を推定する⁵⁾．これらのセンサネットワークは展開が容易であるという特徴を持っているため，既存の

* 東京大学 先端科学技術研究センター
〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7-2
RCAST, The University of Tokyo, Ltd.
7-2, Gobancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0076

家やビルなどの建物にも低コストで導入することができる。

このようにして取得されたデータを用いて、電力資源や水資源の有効利用に役立てることができる。Google PowerMeter²⁾では、家庭内での消費電力の情報や、各家庭の太陽電池で発電された電力、電気自動車に蓄積された電力の情報をクラウド側に収集し、収集した情報を用いて電力の配送や機器のオンオフを制御することで、街規模での電力の最適化を行うことを目指している。

2.2 基盤技術 2.1に示したように、情報を収集するという目的だけであるならば、センサネットワークは既に実用的な技術となっている。特に数週間から数ヶ月程度で、すばやく展開してモニタリングをするという用途にはセンサネットワークは有用である。数年単位モニタリングする場合でも、ソーラーパネルや風力発電を利用したり、屋内であれば電力の取得は比較的容易であるので、場所を限定すればセンサネットワークの展開は容易である。

最も簡単にセンサネットワークを用いてモニタリングシステムを構築する方法は、ハードウェアとしてMICAz、ソフトウェアとしてTinyOS⁸⁾を用いることである。TinyOSでは、標準化段階や研究段階の技術でも実装が多く公開されているため、最先端の通信プロトコルをすぐにでも利用することができる。

ハードウェア MICAzを始めとして、センサノードは無線通信モジュール、マイクロコントローラ、センサの3つによって構成されるのが一般的である。無線通信モジュールは、IEEE 802.15.4 互換チップを用いる。IEEE 802.15.4 互換チップは250kbpsで見通し数百メートルの通信距離を持ち、さまざまな企業から販売されている。CPUはATMELのATmega128、MicrochipのPIC18、TIのMSP430などの8bitの低消費電力マイクロコントローラを用いる。センサノードは細かい時間単位でスリープとウェイクを繰り返しながら低消費電力性を実現するため、CPUの選定では、スリープ時の消費電力とスリープからの復帰時間が重要となる。

通信プロトコル 無線通信モジュールにIEEE 802.15.4 互換チップを用いることから分かるように、現在のセンサネットワークでは、無線の物理層、MAC層にIEEE 802.15.4を用いる。また、センサノード間でホップバイホップでデータを転送し、数ホップから数十ホップのネットワークを構成するのが一般的な形態である。現在確認されている最も大きなセンサネットワークとしては、カリフォルニア大学バークレー校で実証されたゴールデンゲートブリッジの端から端まで約1.2kmに構築された46ホップの橋梁モニタリングシステムが挙げられる。テストベッドレベルでは、

310台のセンサノードで構築されたネットワークの動作も確認されている¹⁾。

センサノードのIPv6対応も進められており、インターネットで利用される技術の標準化を行う組織であるIETFでは、既にIEEE 802.15.4上でIPv6を動作させるためのヘッダ圧縮方法が6LoWPANとして標準化されている。また、IETFの作業部会であるRoll(Routing Over Low power and Lossy networks)では、ルーティングプロトコルが議論されている。TinyOS⁸⁾でもRollで議論中のルーティングプロトコルと近い機能を備えたCTP(Collection Tree Protocol)¹⁾が提供されている。ルーティングプロトコルではベクトル型が用いられ、特にチャネルの急激な変化により、リンクが切れた場合の障害復旧が重視されている。

時刻同期プロトコル センサネットワークは、ただ単にセンサから値を取得してセンサデータを集めれば良いというわけでは無い。センサデータは実空間情報であるので、時刻情報の付与が不可欠である。例えば2つの地点に設置されたマイクで音を検出した時刻の履歴から高速に移動する飛行物の移動軌跡を抽出するアプリケーションでは、各センサノードは高精度に時刻同期する必要がある。時刻同期プロトコルとして標準的に使われているのは、FTSP(Flooding Time Synchronization Protocol)⁹⁾である。FTSPはMAC層でのタイムスタンプとフラッディングを基盤とした単純な仕組みによって、ネットワーク全体で数マイクロ秒の精度で同期を取ることができる。

位置検出 時刻情報に加えて、センサデータは位置情報にも対応付けて使用されるため、センサノードの位置検出が必要となる。例えば、自動車などの移動するオブジェクトに埋め込まれたセンサノードで取得する加速度データから道路の状態を検出するアプリケーションでは、センサノードが今どこにいるかを検出するための技術が必要となる。現在、位置検出に標準的に使われているのはGPSである。しかしながら、GPSは屋外でしか使用することができないため、超音波や電波強度を用いた位置検出手法が今なお研究され続けている。

3. 残された課題とアプローチ

データを収集する道具という観点からはセンサネットワークはもはや成熟したように見える。しかしながら、センサネットワークの応用をさらに広げるためには信頼性とリアルタイム性の2つの課題を解決する必要がある。本節では、これら2つの課題に対する筆者らの研究開発事例の一部を示す。

3.1 信頼性 信頼性とは、センサデータの品質を

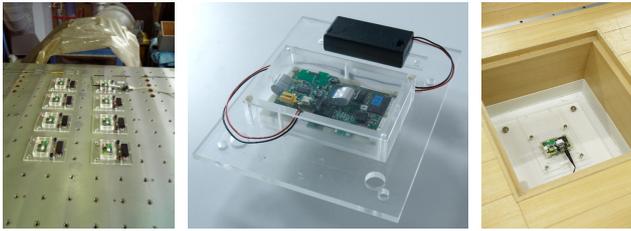


図-1 地震モニタリングシステム

どのくらい保証することができるかを意味し、センサネットワークを計測器として扱えるようにするために必要となる。現在のセンサネットワークでは、センサノードでセンサからデータを取得して収集するという機能は実現されているものの、得られたセンサデータの質を保証することができない。例えば、家庭で消費している電力量、電気自動車に蓄積された電力・蓄積可能な電力、太陽電池などで生産している電力を電力モニタリングで収集し、家庭内の機器の動作や電力の伝送を最適化する場合を考える。この場合、取得したセンサデータの信頼性を保証できなければ電力の最適化どころか、誤った情報による誤った電力の伝送によって無駄な電力を消費してしまうことになりかねない。これに向けては、データの信頼性が求められる具体的なアプリケーションを想定し、実証する中で技術課題を再抽出する必要がある。

地震モニタリングシステム 地震モニタリングシステムは、センサデータの信頼性の実現に向けて、アプリケーション指向で垂直統合的にアプローチした研究である。耐震設計の基礎となる技術のひとつで、ビルなどの構造物の健全性判断や、地震後の損傷検知に応用することが期待されているので高い信頼性を必要とする。損傷の程度を正確に把握するためには、各フロアやフロアの複数箇所での高品質なモニタリングを行うことが望ましいが、このような高密度なモニタリングが行われている事例はない。これに向けては、センシングした値の精度のみならず、その値を取得するタイミングの精度も重要となる。そこで、地震モニタリングシステムの研究では、地震波の高精度同期サンプリングに的を絞って技術的な部分での研究を進め、後述するハードリアルタイム OS¹¹⁾ を含めてハードウェアからソフトウェアまで、垂直統合型で設計・実装を行っている(図-1)⁶⁾。また、関連する企業との連携を行い、研究室のみならず、秋葉原ダイビル等に設置し、地震時の振動計測に成功している。

地震モニタリングシステム全体は垂直統合的に構築されているものの、高精度同期サンプリングや、同期サンプリ

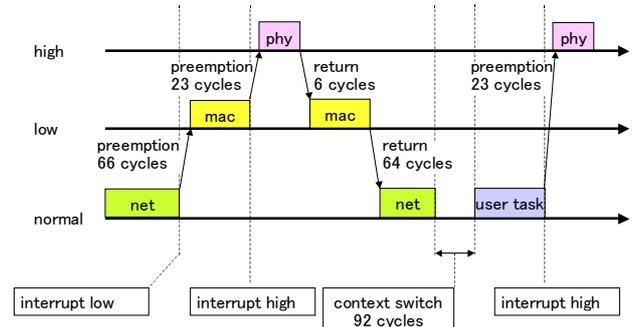


図-2 省資源型ハードリアルタイム OS

ングで利用する時刻同期の技術は地震モニタリング以外にも応用が可能である。そのため、個々の技術の再利用性の観点からの抽象化を進めることが課題である。

3.2 リアルタイム性 リアルタイム性は、ある処理に対して、決められた時間内の実行完了を保証することを意味し、センサとアクチュエータを接続するために必要となる。センサネットワークで実空間上から取得した情報を処理し、サービスにつなげるためには現状のベストエフォートを前提としたコンピューティング技術、ネットワーク技術では不十分である。センサネットワークにリアルタイム性を実現する機能が加わることで、遠隔医療、ホームオートメーション、ITS、スマートグリッド、製造、水資源制御、ホームセキュリティ、農業など多様な分野でのサービスを実現することができる。これに向けては、コンピューティングやネットワークの要素技術それぞれでリアルタイム性を実現する必要がある。

省資源型ハードリアルタイム OS 省資源型ハードリアルタイム OS は、リアルタイム性に対してコンピューティングの観点からアプローチした研究である。TinyOS⁸⁾ を始めとする従来の無線センサノード向けのオペレーティングシステムはベストエフォートによるタスク制御を行っており、頑強性や高精度な計測が必要なアプリケーションには適用できない。このような観点から、センサネットワークで用いられることの多い 8bit マイクロコントローラ上で動作するハードリアルタイムオペレーティングシステムの開発を進めている(図-2)。CPU の機能を積極的に利用してスレッドモデルを構築することで、TinyOS と同等の省資源性や低オーバーヘッド性を提供しながらハードリアルタイム処理を実現する¹¹⁾。また、スレッドによって実現されているため、実装が容易であるという特徴を有する。本システムは高精度なセンシングを必要とする地震モニタリング⁶⁾ に利用されているほか、将来的に登場すると考えられる超小型ロボット¹⁰⁾ などにも利用できると考えている。

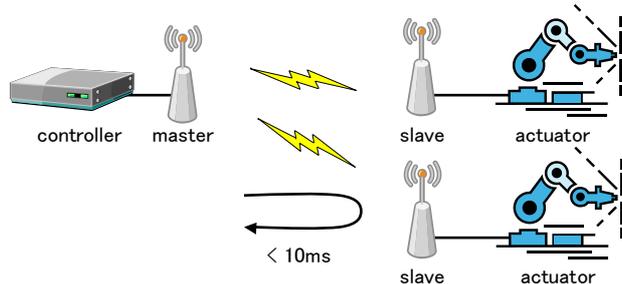


図-3 リアルタイムワイヤレス

リアルタイムワイヤレス リアルタイムワイヤレスは、リアルタイム性に対して無線通信の観点からアプローチした研究である。現在の制御用ネットワークを含む産業用ネットワークでは、有線による機器の配置の制限やワイヤリングコストの問題から、無線通信による解決が求められている。これに向けて、時間制約と高速性を要求する無線制御用ネットワークの実現を目的とし、制御用ネットワークに特化した物理層およびMAC層の研究を包括的に進めている(図-3)。具体的には、往復遅延時間削減のために、TDD/TDMA OFDM方式におけるプリアンプルのオーバーヘッドを送信等化を用いて削減する手法について検討を進め、チャンネル推定性能や同期性能の観点から有効性を明らかにしている¹²⁾。リアルタイムワイヤレスは、産業用ネットワークだけでなく、ITS、車載ネットワークなどの無線通信を用いたM2M(Machine-to-Machine)全般への幅広い応用が期待される。

4. あとがき

本稿では、現状のセンサネットワークで実現可能なアプリケーションについて議論し、データを取得するという用途だけであれば今すぐにでも利用可能であることを述べた。特に環境技術では、積極的にセンサネットワーク技術が利用されている。一方で、センサからデータを取得するだけでなく、計測器として利用する場合や、アクチュエータと連携してフィードバックループを構成するという観点からは、信頼性やリアルタイム性に課題が残ることも述べた。

今後、まず取り組むべきなのは、センサとアクチュエータを連携させる場合のコンポーネントの明確化である。スマートグリッドのようなサービスを想定した場合、センサ、センサデータを配送する機構、センサデータを処理して制御情報を算出する機構、算出した制御情報をアクチュエータに配送する機構、アクチュエータなど多くのコンポーネントから構成される。これらの一連の流れはリアルタイムに実行される必要があるため、まずは各コンポーネント内

でリアルタイム性を保証し、他のコンポーネントとの接続をどのようなインターフェースで実現するかを検討する必要がある。その上で、各コンポーネントを動的に組み合わせ、多様なサービスを実現するための自動設計技術、プラットフォーム技術が必要となると考える。

文 献

- 1) O.Gnawali, et al., "Collection Tree Protocol", Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09), 2009
- 2) Google, "Google Powermeter", <http://www.google.org/powermeter/>.
- 3) X.Jiang, et al., "Experiences with a High-fidelity Wireless Building Energy Auditing Network", Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09), 2009
- 4) J.M.Kahn, et al., "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust", Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), 1999
- 5) Y.Kim, et al., "Nawms: Nonintrusive Autonomous Water Monitoring System", Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'08), 2008
- 6) N.Kurata, et al., "Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System Using Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), 2008
- 7) E.A.Lee, "Cyber Physical Systems: Design Challenges", Technical Report UCB/EECS-2008-8, Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, 2008
- 8) P.Levis, et al., "T2: A Second Generation OS for Embedded Sensor Networks", Technical Report Technical Report TKN-05-007, Telecommunication Networks Group, Technische Universität Berlin, 2005
- 9) M.Maroti, et al., "The Flooding Time Synchronization Protocol", Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04), 2004
- 10) A.Purohit and P.Zhang, "SensorFly: A Controlled-mobile Aerial Sensor Network", Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09), 2009
- 11) S.Saruwatari, et al., "A Compact Hard Real-time Operating System for Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 6th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS'09), 2009
- 12) 千家ほか, 「送信等化を利用したリアルタイム無線通信システムの初期的検討」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2009
- 13) 南, 猿渡, 「アプリケーション指向センサネットワーク」, 計測と制御, Vol. 48, No. 7, 7 2009