

解 説

ユビキタスセンサネットワーク

Ubiquitous Sensor Networks

猿 渡 俊 介* 森 川 博 之* *東京大学 先端科学技術研究センター
Shunsuke Saruwatari* and Hiroyuki Morikawa* *RCAST, The University of Tokyo

1. ユビキタスセンサネットワーク

人類の知的生産性は、パーソナルコンピュータによって飛躍的に高められた。1970年代にパーソナルコンピュータのコンセプトが打ち出された後、半導体技術の進展により、コンピュータの計算能力は向上し続けてきた。しかしながら、現在のパーソナルコンピュータで実現できることの根本的な部分は1970年代と大きな違いは無い。コンピュータの新しい応用を切り拓くためには、計算能力の向上よりもコンピュータの入出力機能に目を向ける必要がある。

同じく半導体技術の進歩により、超小型かつ低消費電力のCPUモジュール、無線通信モジュール、センサモジュールを開発することができるようになった。これらのモジュールの出現によって生み出されたのがセンサネットワークである。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介し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。

豊富な入力によってもたらされる膨大な量のデータと、コンピュータの持つ蓄積・解析能力が組み合わせることで、新しい知識が生まれる。たとえば、河川に展開された水量を測るセンサネットワークからの情報を蓄積・解析することで河川の氾濫を高精度に予測・検知できるようになる。家庭での消費電力量や使用水量の情報を蓄積・解析すれば、資源をより効率よく利用するためのアイデアも生み出せるであろう。すでにウェブの世界では、たとえば検索エンジンは、膨大な量のホームページを蓄積・解析し、「検索語に関連するサイト」という新しい知識をわれわれに提供している。実空間に存在するデータ量はサイバー空間に存在するデータ量よりもはるかに多いため、センサネットワークの実現によって今後新しい知識が膨大に生み出されることになる。

原稿受付

キーワード: Ubiquitous Sensor Networks, Network Robots, Cyber Physical Systems

*東京都目黒区駒場 4-6-1

*4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo

ロボット技術による入出力機能をコンピュータが持つことで、センサネットワークによって得られた新しい知識を新しいサービスに発展させることができる。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、応用は多岐に渡る。これに向け、ネットワークロボット[12]やCyber Physical Systems[8]というキーワードを基に、センサネットワーク、コンピュータ、ロボットの融合を目指して研究開発が進められている。

2. センサネットワークとロボット

センサネットワークとロボットは親和性が高い。ロボットは通常、カメラ、マイク、レーダーなどさまざまなセンサを入力機能として持っており、環境から情報を収集して動作する。センサネットワークからロボットを見た場合、ロボット自体が1つのセンサノードであると見なす事ができる。本論では、このようなセンサノードが移動するセンサネットワークを寄生型と定義する。また、センサノードが静的に空間に埋め込まれるセンサネットワークを、電力線接続型とバッテリー駆動型の2つに分類する。

2.1 寄生型

寄生型のセンサネットワークは最もロボット技術との関係が深く、携帯電話、自動車、UAV (Unmanned Air Vehicle)、ロボットなど、センサノードが組み込まれたオブジェクトから電力を得て動作するセンサネットワークである。寄生型のセンサネットワークは、電源に対する心配が不要であり、かつ寄生したオブジェクトが移動した先々でセンシングを行うことができるというメリットがある。その一方で、寄生したオブジェクトが移動した場所の移動したその瞬間のデータしか取れないという制限もある。

寄生型のセンサネットワークの例としては、空中モニタリング[1]、道路モニタリング[3]、ユーザ参加型センシング[2]などが挙げられる。Allredらの空中モニタリングでは、大気汚染状況をセンシングするためのセンサとGPSを具備したセンサノードを鳥サイズのMAV (Micro Air Vehicle) に組み込み、大気中を3次元的に移動しながらセンサ情報を収集している[1]。Erikssonらの道路モニタリ



図 1 地震モニタリング

ングでは、7 台のタクシーに加速度センサと GPS を具備したセンサノードを設置し、ボストン市内の道路の状態を取得しており、実際に道路に空いた穴の検出に成功している [3]。Burke らのユーザ参加型センシングでは、ユーザが持ち歩いている携帯電話が具備するカメラ、マイク、加速度センサからデータを取得して分析することで医療、都市計画、社会学、資源のリサイクルなどのサービスの提供を目指している [2]。

2.2 電力線接続型

電力線接続型のセンサネットワークとは、電力を電力線から得て駆動するタイプのセンサネットワークであり、長期間サービスを提供するアプリケーションに利用される。電力線接続型は、バッテリー駆動型に比べて電源に対する心配が不要である。その一方で、センサノードの設置場所が電力線に接続可能な場所ではしか用いることができないため、展開場所が建物内や建物近辺に限られる。

電力線接続型のセンサネットワークの例としては、地震モニタリング [7]、電力モニタリング [4] が挙げられる。筆者らが研究開発を進めている地震モニタリングでは、地震による振動を建物に埋め込まれた加速度センサで計測する (図 1)。耐震技術の基盤である地震モニタリングを低コスト・高密度化したいという要求は強く、有線敷設が不要な無線センサネットワークでシステムを構築することの意義は大きい。建物の構造解析に必要な測定精度を確保するために、数十ホップでも $10\mu\text{s}$ の精度を実現する時刻同期プロトコル、全てのノードで同じタイミングでサンプリングを行う同期サンプリングの研究を進めている [7]。

センサネットワークのカラー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に応用可能な電力モニタリングである。スマートグリッドでは、通常の発電機で生成される電力、太陽電池や風力発電などのクリーンエネルギー、電気自動車に蓄積された電力、家庭内で利用される電力をリアルタイムに取得して電力の蓄積と使用の最適化を目指している。これに向け、米国の Silver Spring Networks 社を中心に、電力メータのセンサネットワーク化を実現するスマートメータが展開されている。

スマートグリッドという観点では、ロボットは移動可能な充電器である。センサネットワークを用いた電力モニタリングによって電力の情報をリアルタイムに収集・公開す

ることができれば、電力を必要としている場所にロボットが移動して電力を提供したり、過剰に電力が生成されている場所に移動して充電を行うようになるであろう。

2.3 バッテリー駆動型

バッテリー駆動型のセンサネットワークは、1 次電池や 2 次電池で駆動するセンサノードで構成される。バッテリー駆動のセンサノードは、電力網の配備が難しいようなところでも展開が容易であるため、設置の自由度が極めて高いという特性を持つ。一方で、バッテリー駆動ゆえに駆動時間に制限がある。そのため、バッテリー駆動型のセンサネットワークは通常は計測することのできない現象を短・中期的に観測する自然科学用途や構造ヘルスマニタリングなどに用いられる。

自然科学用途の例として、生態モニタリングと火山モニタリングが挙げられる [14]。Mainwaring らが生命科学の研究者と共同で行っている生態モニタリングでは、温度センサ、照度センサ、気圧センサ、湿度センサ、赤外線センサを具備した 32 台のセンサノードを Great Duck Island と呼ばれる米国の島に展開し、6ヶ月間、島の気象状況などの生態系の情報を収集している。Werner-Allen らの火山モニタリングでは、加速度センサとマイクを具備した 16 台のセンサノードをエクアドルの火山に展開し、19 日間で 229 回の地震データの取得に成功している。Kim らの構造ヘルスマニタリングでは、加速度センサと温度センサを具備したセンサノード 64 台を全長約 1.2 キロメートルのゴールデンゲートブリッジに設置して 46 ホップのセンサネットワークを構築し、鉄橋の常時微動を取得することで鉄橋の健全性の診断を行っている [5]。

3. 今後の課題とアプローチ

センサネットワークとロボットは親和性は高いものの、まだ融合するまでには至っていない。まず、真の意味でのユビキタスセンサネットワークを実現するために、さらなる低消費電力性を実現する必要がある。また、極限まで消費電力を削減したとしても、センサノードから得られた情報をロボットで利用するためには計算処理や通信のリアルタイム性をシステム全体で実現しなければならない。本節では、これら低消費電力性とリアルタイム性の 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 低消費電力性

センサネットワークの設置の自由度が高いという特性を最大限に利用しようとした場合に、本質的な問題となるのが電源である。電源の問題を解決できないうちには、センサネットワーク技術が完成したとは言えない。これに向け、無線通信、CPU、センシングに必要な電力を最小化すると同時に、環境から電力を取得する環境発電技術、遠隔からエネルギーを送信する電力伝送技術 [6] などの研究開発が

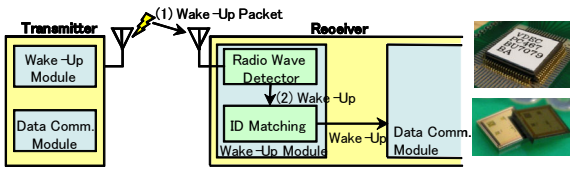


図2 ウェイクアップ型無線通信システム

求められる。

ウェイクアップ型無線通信システム

無線通信では、送受信時のみならず、通信を待ち受けている時にもデータ送受信時と同程度の電力を消費している。これに対し、通信開始のトリガとしての機能に特化し、数十 μW で受信待機可能なウェイクアップ無線通信モジュールの開発を進めている(図2)。すれ違い通信端末、家庭用無線 LAN 基地局、フェムトセル基地局、無線センサノードなど受信待機している時間がデータの送受信時間よりも長いと想定される通信機器への応用を目指している。ウェイクアップ無線通信モジュールのフロントエンド部およびベースバンド部の回路設計、ウェイクアップさせる端末を効率良く柔軟に指定可能な Bloom Filter を用いた ID マッチング機構の研究開発、LSI チップ上への実装を進めている [11]。

バッテリーレス無線センサネットワーク

これまでのセンサネットワークは、バッテリー駆動が前提とされてきた。しかしながら、バッテリー交換のコストや環境への負荷を考慮すると、バッテリーを搭載したセンサノードを数多く環境に配布することは現実的ではない。このような観点から、太陽電池と電気二重層キャパシタを具備し、バッテリーの交換を行わずとも半永久的に動作するバッテリーレス無線センサノード「Solar Biscuit」の開発を進めている(図3)。広大な農場での農作物に対する日照状況の収集や、森林のエコシステムの状態の指標として用いられる林冠閉鎖率の測定への応用を目指している。Solar Biscuit では太陽電池から得られる電力が微少かつ不安定にならざるを得ないことから、不安定な電力下でも動作可能なデータ収集プロトコルの研究を進めている [9]。

3.2 リアルタイム性

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

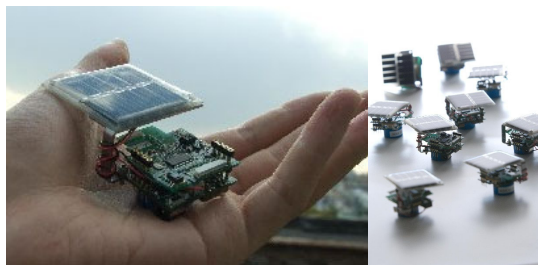


図3 バッテリーレス無線センサネットワーク

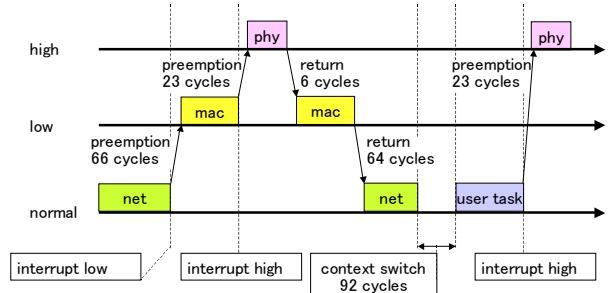


図4 省資源型ハードリアルタイム OS

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。たとえば、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、計算処理や通信にかかる時間を保証することができなければ電力が最適化されるところが無駄な電力を消費してしまふことになりかねない。また、センサネットワークで取得した情報を利用してロボットを制御する場合にも、安全性の観点から信頼性の高いリアルタイム性を提供することは必須である。

省資源型ハードリアルタイム OS

TinyOS 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4)。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もハードリアルタイム処理を実現する [10]。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も有する。

リアルタイムワイヤレス

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

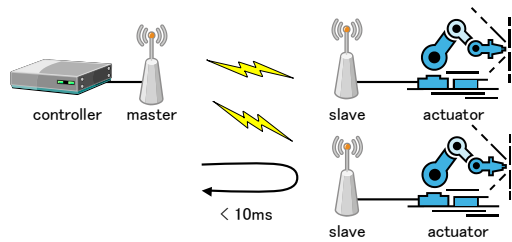


図5 リアルタイムワイヤレス

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5)。具体的には、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プリアンプル削減手法の有効性を明らかにしている[13]。

4. 未来を創る

ピーター・ドラッカーは「蒸気機関が鉄道の登場を促し、鉄道の登場がめぐりめぐって郵便、銀行、新聞などの登場につながった」と喝破した。この言葉を現在のICT分野にあてはめると、「ICT技術がインターネットや携帯電話の登場を促し、インターネットや携帯電話の登場がめぐりめぐって、
、
などの登場につながった」となる。ユビキタスネットワークの時代に入り、センサなどからの実空間情報を入手できるようになってきた。これらを農業、医療、介護、都市、交通などといった産業に適用する際には、まずはICTを利用して多種多様なデータを集めることが重要である。そして、これらの利用方法を第三者と一緒に考える仕組みを構築していかなければならない。

米国で検索サービスが開いた契機が、蓄積されていたデータ量であるとの説がある。どれだけデータを集められるかが鍵となろう。データを集めるだけではビジネスになりにくいいため、産学官が連携してデータを集め、新たな産業の創出につなげていかなければならない。「客にいくら尋ねても、自動車が欲しいという答えは返ってこない。なぜなら客は馬車しか知らないからだ」とは、ヘンリー・フォードの言葉である。未来を予測することは難しいが、未来を創ることはできる。技術は社会を変える力を有しているためである。変わりつつある時代の中で、10年、20年、50年後を夢想するマインドでもって、産業、経済、社会が変わるプロセスに寄与していきたいものである。

参 考 文 献

- [1] J. Allred, A. Hasan, S. Panichsakul, W. Pisano, P. Gray, J. Huang, R. Han, D. Lawrence, and K. Mohseni: "SensorFlock: An airborne wireless sensor network of micro-air vehicles," In Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'07), pp. 117-129, 2007.
- [2] J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, A. Parker, N. Ramanathan, S. Reddy, and M. B. Srivastava: "Participatory sensing," In ACM SenSys Workshop on World-Sensor-Web (WSW'06), 2006.
- [3] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan: "The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring," In Proceeding of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'08), pp. 29-39, 2008.
- [4] X. Jiang, M. V. Ly, J. Taneja, P. Dutta, and D. Culler: "Experiences with a high-fidelity wireless building energy auditing network," In Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'09), 2009.
- [5] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, and M. Turon: "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks," In Proceedings of the 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'07), 2007.
- [6] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić: "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 34, 2008.
- [7] N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa: "Actual application of ubiquitous structural monitoring system using wireless sensor networks," In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), 2008.
- [8] 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.
- [9] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama: "Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications," In Proceedings of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS'05), 2005.
- [10] S. Saruwatari, M. Suzuki, and H. Morikawa: "A compact hard real-time operating system for wireless sensor networks," In Proceedings of the 6th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS'09), 2009.
- [11] T. Takiguchi, S. Saruwatari, T. Morito, S. Ishida, M. Minami, and H. Morikawa: "A novel wireless wake-up mechanism for energy-efficient ubiquitous networks," In Proceedings of the 1st International Workshop on Green Communications (GreenComm'09), 2009.
- [12] 荻田: "ネットワークロボット概論", 電子情報通信学会誌, vol. 91, no. 5, pp. 356-352, 2008.
- [13] 千家, 猿渡, 森川: "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.
- [14] 森戸, 猿渡, 南, 森川: "無線センサネットワークを用いたアプリケーションに関する研究動向", 森川研究室 技術研究報告書, no. 2008002, 2008.

猿 渡 俊 介 (Shunsuke Saruwatari)

2007年東京大学大学院博士課程修了。2003年～2004年IPA未踏ソフトウェア創造事業、2006年～2008年日本学術振興会学振特別研究員、2007年～2008年イリノイ大学客員研究員、現在、東京大学先端科学技術研究センター助教。専門はワイヤレスネットワーク、センサネットワーク、システムソフトウェアなど。

森 川 博 之 (Hiroyuki Morikawa)

1987年東京大学工学部電子工学科卒業。1992年同大学院博士課程終了。1997年～1998年コロンビア大学客員研究員。2002年～2006年情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダ兼務。現在、東京大学先端科学技術研究センター教授。専門はユビキタスネットワーク、モバイルコンピューティング、ワイヤレスネットワーク、フォトニックインターネットなど。電子情報通信学会論文賞(2回)、情報処理学会論文賞、情報通信月間推進協議会情報通信功績賞、ドコモモバイルサイエンス賞など受賞。電子情報通信学会フェロー。IEEE、ACM、ISOC、情報処理学会、映像情報メディア学会各会員。