

## 第5章 結論

## 5.1 本研究の成果

本論文では無線センサネットワークの基盤技術である PAVENET OS と、無線センサネットワークの応用技術である ANTH について述べた。

PAVENET OS の成果は 3 つある。

1 つ目は無線センサノード用のオペレーティングシステムのアーキテクチャの選択肢を増やしたことである。これまで TinyOS を始め、無線センサノード用のオペレーティングシステムは thread model はタスクスイッチのオーバーヘッドが大きいという理由から event model で開発することが前提であった。それに対して本研究では thread model でも co-operative multithreading を用いることで event model の TinyOS と同等の省資源性と低オーバーヘッドで実現できることを示した。この結果は TinyOS や [59] が event model の方が thread model よりも省資源で低オーバーヘッドだと言う主張を覆すものである。すなわち、1979 年の [58] によって主張された event model と thread model の二重性 (duality) を再び裏付けたと言える。

2 つ目は無線センサネットワークのアプリケーションエリアを広げたことである。PAVENET OS は CPU の機能を積極的に利用することで少ない計算資源でも低オーバーヘッドでハードリアルタイム処理が実現できることを示した。この結果は今後無線センサネットワークにおけるアプリケーションを考える際、CPU 性能だけでなく、機能も含んだ選定も重要であることを示したとも言える。

3 つ目は、PAVENET OS を提供することで無線センサネットワークの応用や基盤技術に関する研究に貢献した。PAVENET OS は地震モニタリング [49]、構造ヘルスモニタリング [93]、4 章で述べたデバイス連携技術 [10]、コンテキストアウェアコンピューティング [12]、実空間志向アクセス制御 [94]、介護ケア [95] などの無線センサノードを用いたアプリケーションに関する研究に使用されているだけでなく、無電源センサネットワーク [50]、シングルホップとマルチホップの比較 [96]、無線衝突検出技術 [13]、無線センサノード用ファイルシステム [12]、無線センサノード用仮想マシン [23] などの無線センサネットワークにおける基盤技術の研究にも利用されている。

ANTH では次の 2 つを示した。

まず 1 つ目は、ユーザが身の回りのオブジェクト同士を連携させてさまざまなサービスを構築可能な環境を実現したことである。ANTH では非常に少ない計算資源と通信資源でデバイス同士を連携させることができる。この省資源性という特徴により、われわれの身の回りに存在するさまざまなオブジェクトに ANTH を組み込むことが可能となった。これにより、ユーザは建築家などの専門家に頼らなくとも自分の欲しいサービスを自分自身の手で構築することができる。また、ANTH をさまざまなオブジェクトに組み込むことで空間のデザインやオブジェクト自体のデザインの自由度が増える。例えば、現在部屋の照明のスイッチはある固定の

場所に設置されているが、ANTHを用いることで壁をノックして部屋のライトを消すといったことが可能になるので固定スイッチは不要となる。

2つ目は、無線センサネットワークにデバイス連携という新しいアプリケーションを示したことである。これまでの無線センサネットワークの研究の多くが、センサノードからデータを収集するといった利用形態であった。それに対してANTHでは、オブジェクトに組み込まれたセンサノード同士が直接通信を行う。このような利用形態はこれまで無線センサネットワークの研究では考慮されておらず、ANTHは無線センサネットワーク技術の新たな可能性を示したと言える。また、ANTHでは既存の無線センサネットワークの研究の成果は役に立たないことから、無線センサネットワークではアプリケーションの視点からトップダウン的に通信プロトコルなどを含めてシステム全体を設計しなければならないことをも示したと言える。

## 5.2 今後の展開

PAVENET OS では今後無線通信プロトコルを充実させる必要がある。現在、CSMA, TDMA, Adaptive Tree Walk, A-MACなどのプロトコルが実装されているが、Chipcon社のCC1000での動作確認しかしていない。現在、2.4GHz帯のCC2400版のPAVENETモジュールも作成中であり、さまざまなハードウェアでも通信プロトコルが使いまわしできるようにしていく予定である。また、現在無線センサネットワークではSP(Sensornet Protocol)と呼ばれるインターネットにおけるIPのような共通プロトコルを作る動きがある[17]。今後はSPのような標準的なプロトコルも取り込んでいく必要がある。

また、現在のPAVENET OSはMicrochip社のPIC18上に商用のコンパイラであるHI-TECH社のPICC-18を用いて実装した。その中で、省資源で使いやすいオペレーティングシステムを開発するためにはCPUのサポートとコンパイラのサポートが必須であるとの知見が得られた。これを踏まえて、今後はCPUやコンパイラの開発も視野に入れる予定である。

加えて、今後はより多くの人に使うってもらうことも考えなければならない。まず、さらに多くの応用や研究で使用することでPAVENET OSの有用性を示す必要がある。また、ソースコードを公開することでユーザを増やすことも考えられる。しかしながら、PAVENET OSはPIC18に特化して設計されていること、PIC18ではフリーで使えるコンパイラが無いことが普及の妨げになると考えられる。今後は、SDCC(Small Device C Compiler)などをPIC18用に移植することも考える必要がある。

ANTHは現在ANTH独自の無線通信プロトコルを用いてANTHに閉じたサービスを提供している。今後は他の技術との相互運用性を視野に入れる必要がある。例えば、インターネットを介してデバイス同士の連携を行うといったANTH over IPが実現可能なプロトコルを実現することも考えられる。

また、PAVENET OSと同様にANTHも多くの人に使うってもらうことを考えなければならない。まず、積極的にデモンストレーションを行い、できるだけ多くの人にANTHを認知してもらう必要がある。現在実装しているANTH対応オブジェクトは10個程度であるが、ANTHの接続の柔軟性の高さによる応用の広さをアピールするためにもよりたくさんのオブジェクトをANTHに対応しなければならない。また、PAVENET OSはPIC18に特化して構築されているがANTHはミドルウェアであるのでPIC18に特化しているわけではない。そのため、MICA2を始め他のプラットフォーム上にANTHを移植するなどして他の人が使いやすい環境を整備する必要がある。さらに、ANTH対応デバイスを販売するというのも考えられる。その際に障害となると考えられるのが無線である。電波法の制限などから無線通信を行うデバイスを販売するにはコストがかかる。そのため、

ZigBee や Bluetooth など既に標準化された無線通信モジュールを利用して ANTH を実現する方法も視野にいれる必要がある。

また、PAVENET OS や ANTH の研究を通して、無線通信に関する研究をもっと行う必要があるとの認識が得られた。特に筆者は無線通信における低消費電力性と信頼性に関する研究が重要であると考えられる。

例えば低消費電力な無線通信モジュールとして売り出している ZigBee は 2.4GHz 帯を用いている。2.4GHz 帯ではスペクトル拡散をかけなければならないため、単純な ASK や FSK などの変調方式に比べて消費電力が大きくなる。さらに、2.4GHz 帯は減衰が激しいため、通信距離を伸ばそうとすればするほど消費電力が大きくなる。このような現状を鑑みると、変調方式や使用する帯域を含めて低消費電力性の指標を示す研究が必要であると言える。

信頼性に関しては、無線通信では信頼性がないというのが世間の認識となっている。この無線通信における信頼性のなさは無線センサネットワークでアプリケーションを実現する際の足かせになっている。無線センサネットワークの応用が広がるにつれ、無線帯域使用率も高くなるため、無線通信の信頼性のなさは今後より顕著になると考えられる。筆者は、SNR が悪い環境でも無線で送られている情報はゼロでは無いとの観点からの研究を進める必要があると考えている。筆者の認識では低消費電力性を実現するためのマルチホップ通信は不必要であるが [96]、信頼性を高めるためのマルチホップ通信は必要である。

以上の議論を踏まえ、今後はデプロイメント的な観点と技術的な観点の 2 つの視点から研究を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] マーシャルマクルーハン. メディア論—人間の拡張の諸相. みすず書房, July 1987.
- [2] クレイトンクリステンセン. イノベーションのジレンマ—技術革新が巨大企業を滅ぼすとき. 翔泳社, 2001.
- [3] クレイトンクリステンセン, マイケルレイナー. イノベーションへの解—利益ある成長に向けて. 翔泳社, December 2003.
- [4] クレイトンクリステンセン, スコットアンソニー, エリックロス. 明日は誰のものか—イノベーションの最終解. 翔泳社, September 2005.
- [5] 河邑厚徳, グループ現代. エンデの遺言—「根源からお金を問うこと」. 日本放送出版協会, February 2000.
- [6] トーマスフリードマン. フラット化する世界. 日本経済新聞社, March 2006.
- [7] Jason Hill and David Culler. MICA: A Wireless Platform For Deeply Embedded Networks. In *IEEE Micro*, Vol. 22, pp. 12–24, November-December 2002.
- [8] David Gay, Philip Levis, and Robert von Behren. The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. In *Proceedings of Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI'03)*, pp. 1–11, San Diego, California, June 2003. ACM.
- [9] Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, Seth Hollar, David Culler, and Kristofer Pister. System Architecture Directions for Networked Sensors. In *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS'00)*, pp. 93–104, Boston, Massachusetts, November 2000. ACM.

- [10] 猿渡俊介, 南正輝, 森川博之. ユーザによる制御が可能なセンサ/アクチュエータネットワークの設計. 電子情報通信学会技術研究報告, 第3回センサネットワーク研究, January 2006.
- [11] 倉田成人, 猿渡俊介, 堀江信吾, 森川博之, 青山友紀. コピキタス・センサネットワーク用 MEMS 加速度センサの振動台実験. 日本建築学会大会学術講演講概集, September 2005.
- [12] Nao Kawanishi, Kim SeungJin, Hua Si, Yoshihiro Kawahara, and Hiroyuki Morikawa. Building Context-Aware Applications and Probe Space Infrastructure. In *In Proceedings of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (IPACS'06)*, pp. 103–106, Yonago, Tottori, December 2006.
- [13] Foo Yee-Loo and Hiroyuki Morikawa. On the use of manchester violation test in anti-collision scheme. In *In Proceedings of the 21st International Conference on Information Networking (ICOIN'07)*, Estril, Portugal, January 2007.
- [14] Joseph M. Kahn, Randy H. Katz, and Kris Pister. Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp. 483–492, Seattle, Washington, August 1999. ACM.
- [15] Deborah Estrin, Ramesh Govindan, John Heidemann, and Satish Kumar. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCom'99)*, pp. 263–270, Seattle, Washington, August 1999. ACM.
- [16] Adam Dunkels, Oliver Schmidt, Thiemo Voigt, and Muneeb Ali. Protothreads: Simplifying Event-Driven Programming of Memory-Constrained Embedded Systems. In *Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*, Boulder, Colorado, November 2006.
- [17] Joseph Polastre, Jonathan Hui, Philip Levis, Jerry Zhao, David CULLER, Scott Shenker, and Ion Stoica. A Unifying Link Abstraction for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'05)*, San Diego, California, November 2005.

- [18] Guangyu Pei, Mario Gerla, and Xiaoyan Hong. Lanmar: Landmark routing for large scale wireless ad hoc networks with group mobility. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC'00)*, pp. 11–18, Boston, Massachusetts, August 2000.
- [19] Gyula Simon, Miklos Maroti, and Akos Ledeczi. Sensor Network-Based Countersniper System. In *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, November 2004.
- [20] Miklos Maroti, Branislav Kusy, Gyula Simon, and Akos Ledeczi. The Flooding Time Synchronization Protocol. In *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, November 2004.
- [21] Alan Mainwaring, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, David Culler, and John Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, Atlanta, Georgia, September 2002.
- [22] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin, and P. Corke. Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network. In *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'05)*, San Diego, California, November 2005.
- [23] Ning Xu, Sumit Rangwata, krishna Kant Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. In *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, November 2004.
- [24] Alec Woo, Terence Tong, and David Culler. Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, California, November 2003.
- [25] Lakshman Krishnamurthy, Robert Adler, Phil Buonadonna, Jasmeet Chhabra, Mick Flanigan, Nandakishore Kushalnagar, Lama Nachman, and Mark Yarvis. Design and Deployment of Industrial Sensor Networks: Experiences from a Semiconductor Plant and the North Sea. In *Proceedings of*

- the 3rd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'05)*, San Diego, California, November 2005.
- [26] Carl Hartung, Richard Han, Carl Seielstad, and Saxon Holbrook. FireWxNet: A Multi-Tiered Portable Wireless System for Monitoring Weather Conditions in Wildland Fire Environments. In *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (Mobisys'06, Poster Presentation)*, Uppsala, Sweden, June 2006.
- [27] Shah Bhatti, James Carlson, Hui Dai, Jing Deng, Jeff Rose, Anmol Sheth, Brian Shucker, Charles Gruenwald, Adam Torgerson, and Richard Han. MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms. *ACM Mobile Networks & Applications (MONET), Special Issue on Wireless Sensor Networks*, Vol. 10, No. 4, pp. 563–579, August 2005.
- [28] Michael Beigl, Hans-Werner Gellersen, and Albrecht Schmidt. Mediacups: Experience with design and use of computer-augmented everyday objects. *Computer Networks, Special Issue on Pervasive Computing*, Vol. 35, No. 4, pp. 401–409, March 2001.
- [29] Anthony LaMarca, David Koizumi, Matt Lease, Stefan Sigurdsson, Gaetano Borriello, Waylon Brunette, Kevin Sikorski, and Dieter Fox. PlantCare: An Investigation in Practical Ubiquitous Systems. Technical report, Intel Research, July 2002. IRS-TR-02-007.
- [30] D. Brinza, G. Calinescu, S. Tongngam, and A. Zelikovsky. Energy-Efficient Continuous and Event-Driven Monitoring. In *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS'05)*, Washington, Washington, November 2005.
- [31] Haiyun Luo, Fan Ye, Jerry Cheng, Songwu Lu, and Lixia Zhang. TTDD: Two-Tier Data Dissemination in Large-Scale Wireless Sensor Networks. In *ACM Wireless Networks*, Vol. 11, pp. 161–175, January 2005.
- [32] Hari Rangarajan and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Reliable Data Delivery in Event-Driven Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 9th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC'04)*, Alexandria, Egypt, June 2004.

- [33] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In *Proc. of MobiCOM'00*, pp. 56–67, Boston, MA, USA, August 2000.
- [34] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, and Stephen Wicker. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the First International Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS'02)*, Vienna, Austria, July 2002.
- [35] Wendi Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp. 483–492, Seattle, Washington, August 1999.
- [36] Narayanan Sadagopan, Bhaskar Krishnamachari, and Ahmed Helmy. The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA'03)*, Anchorage, Alaska, May 2003.
- [37] David Braginsky and Deborah Estrin. Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, pp. 22–31, Atlanta, Georgia, September 2002.
- [38] Maurice Chu, Horst Haussecker, and Feng Zhao. Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks. *International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 6, No. 3, pp. 90–110, August 2002.
- [39] Fan Ye, Alvin Chen, Songwu Lu, and Lixia Zhang. A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensornetworks. In *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'01)*, pp. 304–309, Los Angeles, California, October 2001.
- [40] Curt Schurgers and Mani Srivastava. Energy Efficient Routing In Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM'01)*, pp. 357–361, Vienna, Virginia, October 2001.

- [41] Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Y.C. Tay. Sift: A MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'06)*, pp. 260–275, Zurich, Switzerland, February 2006.
- [42] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, and Jeongki Min. ZMAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'05)*, San Diego, California, November 2005.
- [43] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland, November 2004.
- [44] Tijs van Dam and Koen Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, California, November 2003.
- [45] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, California, November 2003.
- [46] IEEE 802.15.4 Draft Standard. Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
- [47] Jussi Haapola, Zach Shelby, Carlos Pomalaza-Raez, and Petri Mahonen. Cross-layer Energy Analysis of Multi-hop Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'05)*, pp. 33–44, Istanbul, Turkey, February 2005.
- [48] Lizhi Charlie Zhong, Jan M. Rabaey, and Adam Wolisz. Does Proper Coding Make Single Hop Wireless Sensor Networks Reality: The Power Consumption Perspective. In *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'05)*, Vol. 2, pp. 664–669, New Orleans, Los Angeles, March 2005.

- [49] 堀江信吾, 猿渡俊介, 倉田成人, 森川博之, 青山友紀. 無線センサネットワークを用いた地震モニタリングにおける同期性能の評価. 第2回センサネットワーク研究会予稿集, July 2005.
- [50] 森戸貴, 南正輝, 鹿島拓也, 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀. バッテリレス無線センサネットワークの設計と実装. 電子情報通信学会技術研究報告, November 2004.
- [51] J. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter, and B. Heile. IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power, Low-Cost Wireless Personal Area Networks. In *IEEE Network*, Vol. 15, pp. 12–19, September–October 2001.
- [52] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'02)*, pp. 1567–1576, New York, New York, June 2002.
- [53] 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀. 家庭内センサネットワークにおける低消費電力MACプロトコル. 電子情報通信学会総合大会, March 2005.
- [54] Yoshihiro Kawahara, Tomotaka Hayashi, Hiroshi Tamura, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. A Context-Aware Content Delivery Service Using Off-the-shelf Sensors. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (Mobisys'04, Poster Presentation)*, Boston, Massachusetts, June 2004.
- [55] Takuya Kashima, Shunsuke Saruwatari, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. A Bind Control Model For Real-space Programming in Ubiquitous Computing Environment. In *Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'04, poster)*, Nottingham, England, September 2004.
- [56] Shunsuke Saruwatari, Takuya Kashima, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. Pavenet: A Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks. *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers, Volume E-S-1*, No. 1, pp. 74–84, 2006.

- [57] 鈴木誠, 鹿島拓也, 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀. 1チップマイクロコンピュータにおける動的機能モジュール機構の実装と評価. 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2005), July 2005.
- [58] Hugh C. Lauer and Roger M. Needham. On the Duality of Operating System Structure. *ACM SIGOPS Operating System Review*, Vol. 13, No. 2, pp. 3-19, April 1979.
- [59] John Ousterhout. Why Threads Are A Bad Idea (for most purposes). In *USENIX 1996 Annual Technical Conference (Invited Talk)*, San Diego, California, January 1996.
- [60] Rob von Behren, Jeremy Condit, and Eric Brewer. Why Events Are A Bad Idea (for High-Concurrency Server). In *Proceedings of the 9th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS IX)*, Lihue, Hawaii, May 2003.
- [61] Adam Dunkels, Bjorn Gronvall, and Thiemo Voigt. Contiki - a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors. In *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04)*, pp. 455-462, Tampa, Florida, November 2004.
- [62] Michael Beigl, Tobias Zimmer, Albert Krohn, Christian Decker, and Philip Robinson. Smart-Its - Communication and Sensing Technology for UbiComp Environments. Technical Report ISSN 1432-7864, February 2003.
- [63] Chipcon. *CC1000 Datasheet Rev. 2.1*.  
<http://www.chipcon.com/>.
- [64] 長井望, 三田彰, 矢向高弘, 佐藤忠信. 構造ヘルスマニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究. 日本地震工学会論文集, Vol. 3, No. 4, pp. 1-13, 2003.
- [65] Microchip. *PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet*.  
<http://www.microchip.com/>.
- [66] Joseph Y. Leung and Jennifer Whitehead. On the Complexity of Fixed-Priority Scheduling of Periodic, Real-Time Tasks. *Performance Evaluation*, Vol. 2, No. 4, pp. 237-250, December 1982.
- [67] N.C. Audsley, A. Burns, M.F. Richardson, and A.J. Wellings. Hard Real-Time Scheduling: the Deadline-Monotonic Approach. In *Proceedings of the 8th*

- IEEE Workshop on Real-Time Operating Systems and Software (RTOSS'91)*, pp. 133–137, Atlanta, Georgia, May 1991.
- [68] Chih Chieh Han, Ram Kumar, Roy Shea, Eddie Kohler, and Mani B. Srivastava. A Dynamic Operating System for Sensor Nodes. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'05)*, pp. 163–176, Seattle, Washington, June 2005.
- [69] Vince Stanford. Pervasive Computing Goes the Last Hundred Feet with RFID Systems. In *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 2, April-June 2003.
- [70] Oliver Kasten and Kay Romer. Beyond Event Handlers: Programming Wireless Sensors with Attributed State Machines. In *Proceedings of the 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, Los Angeles, California, April 2005.
- [71] Particle Team. PARTiCLE WEB SITE.  
<http://particle.teco.edu/>.
- [72] 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀. シングル CPU で実現される無線センサノードの実装. 電子情報通信学会総合大会, March 2006.
- [73] Masayuki Iwai, Jin Nakazawa, and Hideyuki Tokuda. Flexible Distributed Event-Driven Programming Framework for Networked Appliances and Sensors. In *Short Paper Proceedings of the 3rd International Symposium on Distributed Objects and Applications (DOA'01)*, pp. 61–68, Rome, Italy, September 2001.
- [74] Walter Cazzola, Robert J. Stroud, and Francesco Tisato. CARP@ - A Reflection Based Tool for Observing Jini Services. In *Proceedings of the 1st OOPSLA Workshop on Reflection and Software Engineering (OORaSE'99)*, pp. 209–227, Denver, Colorado, November 1999.
- [75] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System. In *Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00)*, pp. 775–784, Tel-Aviv, Israel, March 2000. IEEE.
- [76] 高島雅弘, 趙大鵬, 柳原健太郎, 福井潔, 福永茂, 原晋介, 北山研一. IEEE 802.15.4 を用いた室内位置推定実験. 第2回センサネットワーク研究会予稿集, July 2005.

- [77] Udana Bandara, Mikio Hasegawa, Masugi Inoue, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. Design and Implementation of a Bluetooth Signal Strength Based Location Sensing System. In *Proceedings of IEEE Radio and Wireless Conference 2004 (RAWCON'04)*, pp. 319–322, Atlanta, Georgia, September 2004.
- [78] Jan M. Rabaey, M. Josie Ammer, Julio L. da Silva Jr, Danny Patel, and Shad Roundy. PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking. In *IEEE Computer Magazine*, Vol. 33, pp. 42–48, July 2000.
- [79] Wendi Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00)*, Maui, Hawaii, USA, January 2000.
- [80] Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, and Mani B. Srivastava. Timing-sync Protocol for Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, California, November 2003.
- [81] Microchip. *PIC16F917/916/914/913 Data Sheet*.  
<http://www.microchip.com/>.
- [82] Tsutomu Terada, Masahiko Tsukamoto, Keisuke Hayakawa, Tomoki Yoshihisa, Yasue Kishino, Atsushi Kashitani, and Shojiro Nishio. Ubiquitous Chip: a Rule-based I/O Control Device for Ubiquitous Computing. In *Proceedings of 2nd International Conference on Pervasive Computing (Pervasive'04)*, pp. 238–253, April 2004.
- [83] Norman Paton and Oscar Diaz. Active Database Systems. In *ACM Computing Surveys*, Vol. 31, pp. 63–103, March 1999.
- [84] UPnP Forum. *UPnP Device Architecture 1.0*, December 2003.
- [85] Jim Waldo. The Jini Architecture for Network-Centric Computing. In *Communications of the ACM*, Vol. 42, pp. 76–82, July 1999.
- [86] Golden G. Richard. Service Advertisement and Discovery: Enabling Universal Device Cooperation. In *IEEE Internet Computing*, Vol. 4, pp. 18–26, September 2000.

- [87] 南正輝, 杉田馨, 森川博之, 青山友紀. ユビキタス環境に向けたインターネットアプリケーションプラットフォーム. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-B, No. 12, pp. 2313–2330, December 2002.
- [88] ECHONET Specification Version 2.11. ECHONET Consortium, April 2002.
- [89] Joel Koshy and Raju Pandey. VM\*: A Scalable Runtime Environment for Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'05)*, San Diego, California, November 2005.
- [90] Philip Levis and David Culler. Mate: A Tiny Virtual Machine for Sensor Networks. In *Proceedings of the 10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS'02)*, pp. 85–95, San Jose, California, October 2002.
- [91] Nicolas Villar, Kiel Gilleade, Devina Raymundy-Ellis, and Hans Gellersen. The voodooio gaming kit: A real-time adaptable gaming controller. In *Proceedings of Advances in Computer Entertainment 2006 (ACE'06)*, Hollywood, USA, June 2006.
- [92] Kristof Van Laerhoven, Nicolas Villar, Albrecht Schmidt, and Hans-Werner Gellersen. Pin&Play: The Surface as Network Medium. In *IEEE Communication Magazine*, Vol. 41, pp. 90–96, April 2003.
- [93] Norito Kurata, Shunsuke Saruwatari, and Hiroyuki Morikawa. Ubiquitous Structure Monitoring using Wireless Sensor Networks. In *In Proceedings of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (IPACS'06)*, Tottori, Japan, December 2006.
- [94] 小森田賢史, 森川博之, 青山友紀. 実空間操作に基づくリンク層におけるデバイスグルーピング機構. 電子情報通信学会技術報告, 情報ネットワーク研究会, pp. 79–84, March 2006.
- [95] 金勝進, 司化, 川西直, 森川博之. A Guidance System based on Q-Learning for Supporting Dementia Patient's Activities of Daily Living. 情報処学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム研究会 (UBI-10-6), pp. 55–60, February 2006.
- [96] 松井壮介, 石田繁巳, 猿渡俊介, 鈴木誠, 森川博之. 無線センサを用いた地震モニタリングにおけるサンプリング周波数に関する検討. 電子情報通信学会総合大会, March 2007.

- [97] 鈴木誠, 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀. 無線センサネットワークのためのオンチップストレージ機構の実装と評価. 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会 (IN2005-163), pp. 43-48, March 2006.
- [98] 鈴木誠, 猿渡俊介, 水野浩太郎, 森川博之. Vaws: 無線センサノードのための仮想マシンの性能評価. 電子情報通信学会総合大会, March 2007.

## 発表文献

### 論文誌

- [1] Shunsuke Saruwatari, Takuya Kashima, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, PAVENET: Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks, Transaction of SICE vol. E-S-1, 2006.

### 国際会議

- [2] Norito Kurata, Shunsuke Saruwatari and Hiroyuki Morikawa, Ubiquitous Structural Monitoring using Wireless Sensor Networks, ISPACS 2006, Tottori, Japan, December 2006.
- [3] Pavel Poupyrev, Takahiro Sasao, Shunsuke Saruwatari, Hiroyuki Morikawa, Tomonori Aoyama, Peter Davis, Service Discovery in TinyObj: Strategies and Approaches, PERMID 2005, Munich, Germany, May 2005.
- [4] Masateru Minami, Shunsuke Saruwatari, Takuya Kashima, Takashi Morito, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, Implementation-based Approach for Designing Practical Sensor Network Systems, EUSE 2004, Busan, Korea, December 2004.
- [5] Yoshihiro Kawahara, Masateru Minami, Shunsuke Saruwatari, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, Challenges and Lessons Learned in Building a Practical Smart Space, Mobiquitous 2004, Boston, USA, August 2004.
- [6] Shunsuke Saruwatari, Takuya Kashima, Yoshihiro Kawahara, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, PAVENET: Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks, INSS 2004, Tokyo, Japan, June 2004.

- [7] Takuya Kashima, Shunsuke Saruwatari, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, A Bind Control Model for Real-space Programming in Ubiquitous Computing Environment, Ubicomp 2004 poster, Nottingham, England, September 2004.
- [8] Yuichi Taguchi, Shunsuke Saruwatari, Mikio Hasegawa, Masugi Inoue, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, U1-Chip: Wireless Communication Module for Fast Device Discovery, Ubicomp 2004 poster, Nottingham, England, September 2004.
- [9] Shunsuke Saruwatari, Takuya Kashima, Morio Takimoto, Yoshihiro Kawahara, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, ANTS: A Framework for Programming a Physical Environment in Ubiquitous Computing Environment, Mobiquitous 2004 demonstration, Boston, USA, August 2004.
- [10] Makoto Suzuki, Shunsuke Saruwatari, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama, A Dynamic Device Driver for Real-space Programming in Ubiquitous Computing Environment, The Fourth International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services(MobiSys 2006), Uppsala, Sweden, June 2006.

#### 研究会

- [11] 猿渡 俊介, 鈴木 誠, 水野 浩太郎, 森川 博之, 無線センサノード向けハードリアルタイムオペレーティングシステムの設計, 情報処学会研究報告, ユビキタスコンピューティングシステム研究会, February 2007.
- [12] 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, 無線センサネットワークのためのオンチップストレージ機構の実装と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会 (IN2005-163), pp. 43-48, March 2006.
- [13] 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, ユーザによる制御が可能なセンサ/アクチュエータネットワークの設計, 電子情報通信学会技術研究報告, 第3回センサネットワーク研究会, January 2006.
- [14] Y. Foo, Y. Taguchi, S. Saruwatari, H. Morikawa, T. Aoyama, M. Hasegawa, and M. Inoue, U1-chip: A Simple Wireless Communication Module for Local Service Discovery, In Proceedings of 1st Korea-Japan Joint Workshop on

Ubiquitous Computing and Networking Systems (ubiCNS 2005), pp. 365-370, Cheju, Korea, June 2005.

- [15] 猿渡 俊介, 鈴木 誠, 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 森川博之, 青山 友紀, 1チップマイクロコンピュータにおける動的機能モジュール機構の実装と評価, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2005).
- [16] 堀江 信吾, 猿渡 俊介, 倉田 成人, 森川 博之, 青山 友紀, 無線センサネットワークを用いた地震モニタリングにおける同期性能の評価, 電子情報通信学会技術報告, 第2回センサネットワーク研究会, June 2005.
- [17] 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, 実空間プログラミングフレームワーク ANTH の設計と実装, 電子情報通信学会技術報告, March 2005.
- [18] 鯉江 尚央, 猿渡 俊介, 水野 浩太郎, 森川 博之, 青山 友紀, Teleshare: 通話をメタファとしたアクセス制御技術の設計と実装, 電子情報通信学会技術報告, March 2005.
- [19] 森戸 貴, 南 正輝, 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, バッテリーレス無線センサネットワークの設計と実装, 電子情報通信学会技術研究報告, November 2004.
- [20] 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 川原 圭博, 南 正輝, 森川博之, 青山 友紀, センサネットワーク開発用モジュール U3 におけるソフトウェアデザイン及びプロトタイプアプリケーションの実装, 情報処理学会マルチメディア, DICOMO 2003, June 2003.
- [21] 永原 崇範, 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 川原 圭博, 南 正輝, 森川 博之, 青山 友紀, 篠田 庄司, ユビキタス環境に向けたセンサネットワークアプリケーション構築支援のための開発用モジュール U3 (U-cube) の設計と実装, 電子情報通信学会技術研究報告, March 2003.
- [22] 猿渡 俊介, “ピアツーピアネットワークによる情報伝播を用いたコンテンツ共有システム”, 電子情報通信学会技術研究報告書, March 2002.

#### 全国大会

- [23] 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 水野 浩太郎, 森川 博之, VAWS: 無線センサノードのための仮想マシンの性能評価, 電子情報通信学会総合大会, March 2007.

- [24] 水野 浩太郎, 猿渡 俊介, 鈴木 誠, 森川 博之, ハードリアルタイム処理を保証する無線センサネットワークオペレーティングシステムの評価, 電子情報通信学会総合大会, March 2007.
- [25] 張 錫振, 倉田 成人, 猿渡 俊介, 森川 博之, 無線センサを用いた地震モニタリングにおけるサンプリング周波数に関する検討, 電子情報通信学会総合大会, March 2007.
- [26] 石田 繁巳, 猿渡 俊介, 鈴木 誠, 森川 博之, サービス発見のためのゼロ受信待機電力無線システムの設計, 電子情報通信学会総合大会, March 2007.
- [27] 松井 壮介, 石田 繁巳, 猿渡 俊介, 鈴木 誠, 森川 博之, 実験的アプローチによるシングルホップ通信とマルチホップ通信の消費電力の比較, 電子情報通信学会総合大会, March 2007.
- [28] 小澤 政博, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, ANTHによって実現される相互連携が可能なスマートオブジェクト, 電子情報通信学会総合大会, B-19-15, March 2006.
- [29] 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, シングル CPU で実現される無線センサノードの実装, 電子情報通信学会総合大会, B-7-101, March 2006.
- [30] 鈴木 誠, 猿渡俊介, 森川博之, 青山友紀, 無線センサネットワークのためのオンチップストレージ機構の検討, 電子情報通信学会総合大会, A-21-2, March 2006.
- [31] 倉田 成人, 猿渡 俊介, 堀江 信吾, 森川 博之, 青山友紀, ユビキタス・センサネットワーク用MEMS 加速度センサの振動台実験, 日本建築学会大会学術講演概集, 2005.
- [32] 鯉江 尚央, 猿渡 俊介, 水野 浩太郎, 森川 博之, 青山友紀, Teleshare: 通話をメタファとしたアクセス制御技術, 電子情報通信学会総合大会, March 2005.
- [33] 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, ANTH: イベント駆動型サービス構築のための実空間プログラミングフレームワーク, 電子情報通信学会総合大会, March 2005.
- [34] 鈴木 誠, 鹿島 拓也, 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, 1チップマイクロコンピュータにおける動的機能モジュール機構の設計と実装, 電子情報通信学会総合大会, March 2005.

- [35] 猿渡 俊介, 森川 博之, 青山 友紀, 家庭内センサネットワークにおける低消費電力 MAC プロトコル, 電子情報通信学会総合大会, March 2005.
- [36] 猿渡 俊介, 鹿島 拓也, 谷田部 智之, 川原 圭博, 森川博之, 青山 友紀, PAVENET: 無線センサネットワーク向け基盤ソフトウェア, 電子情報通信学会総合大会, March 2004.
- [37] 滝本 守朗, 猿渡 俊介, 鹿島 拓也, 南 正輝, 横山成昭, 森川 博之, 青山 友紀, 無線センサネットワークを用いた動線検出システムの試作, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, September 2003.
- [38] 田口 裕一, 猿渡 俊介, 長谷川 幹雄, 川原 圭博, 井上真杉, 森川 博之, 青山 友紀, U1-Chip: インスタントサービス実現に向けての無線通信モジュール, 電子情報通信学会総合大会, March 2004.
- [39] 永原 崇範, 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, 青山友紀, 篠田 庄司, ユビキタス環境に向けたセンサネットワーク開発用モジュール U<sup>3</sup> (U-Cube) の設計と実装, 電子情報通信学会総合大会, March 2003.
- [40] 猿渡 俊介, 南 正輝, 森川 博之, 青山 友紀, 複数名前空間に対応したネーミングベースサービス合成システムの実装, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, September 2002.
- [41] 猿渡 俊介, ピアツーピアネットワークを用いたユーザの興味に基づくコンテンツ伝播機構, 電子情報通信学会総合大会, March 2002.

## 特許

- [42] 森川 博之, 青山 友紀, 猿渡 俊介, プレレフ パベル, 送受信装置および商品サービス取引システム並びに送信装置、受信装置, 出願番号: PCT/JP2006/309340

## 謝辞

まず、誰よりも感謝を捧げたいのが東京大学 森川 博之 教授です。森川 教授がいなければ僕が東大に来ることもありませんでしたし、このような研究成果を上げることもありませんでした。心から感謝しています。ありがとうございました。

次に感謝をしたいのが、慶応大学 青山 友紀 教授（元東京大学 教授）です。青山 教授には研究の指導だけでなく、私的な相談に乗っていただいたりと非常にお世話になりました。また、青山・森川研究室というさまざまな人が集う環境を整備して下さったことにも感謝します。

また、寝食を共にして研究を進めてくれた研究室の後輩の鹿島君（現 KDDI）と修士 2 年の鈴木君に感謝します。鹿島君とは大学生活の中で最も長い時間、共にソフトウェアの開発しました。特に、平成 15 年度の未踏ソフトウェア創造事業からソフトウェアの開発を共に受託し、結果として非常に質の高いソフトウェアの開発をすることができました。鈴木君は研究に関する議論に最も長い時間付き合ってくれました。鈴木君のおかげで自分の研究の整理が非常に捗りました。2 人に対する感謝の意をここに記します。

また、本研究においてハードウェア的なサポートをして下さった NEC エンジニアリングの八重樫さんに感謝します。こちらの曖昧な要求を適切に理解して下さい、素晴らしいものを仕上げてくださいました。八重樫さんがいなければ成し遂げられなかったことも非常に多いです。ありがとうございました。

また、研究活動を円滑に進めるに当たってさまざまな補佐をしていただいた東京大学 今泉さん、芝浦工業大学 南 正輝 講師、三菱総合研究所の谷田部 智之 研究員、東京大学の川原 助手、秘書の川北さん、宮島さんに感謝します。特に谷田部 研究員には IPA の未踏ソフトウェア創造事業で甚大なるサポートをしていただき、大変感謝しています。今後ともよろしくお願いします。

研究に関する議論では、慶應義塾大学 徳田 教授、寺岡 教授、中西 助教授、中澤さん、岩井さん、湧川さん、間さん、斉藤さん、門田君、峰松さん、東京電機大学 戸辺教授、鹿島建設の倉田さん、大阪大学の寺田さん、早稲田大学の中島 教授、NICT の井上さん、長谷川さん、NTT ドコモの山崎さん、小熊さん、永田さん、國頭さん、博報堂の田村さん、たくさんの刺激をありがとうございました。特に徳田教授には平成 15 年度の未踏プロジェクトではプロジェクトマネージャをして頂きました。ここに感謝します。

東京大学青山・森川研究室で共に研究をした板生さん、今井さん、王さん、中内さん、柳内さん、川田さん、飛岡さん、林さん、小野さん、鯉江さん、倉沢さん、小澤さん、神田さん、ウダーナさん、オリビエさん、松本さん、川西さん、アンドレアスさん、ジョンさん、司さん、藤さん、ホアイソンさん、三村さん、パベルさん、孫さん、林さん、フーさん、チャンさん、森戸さん、平井さん、堀江さ

ん、木田さん、小森田さん、丸山さん、水野さん、オクさん、周さん、フェイさん、ジンさん、斉藤さん、桜井さん、ユネスさん、榎並さん、松井さん、レーさん、北田さん、天野さん、橋口さん、ハグエンさん、山田さん、滝本さん、ミンさん、栗田さん、中島さん、西浦さん、笹尾さん、コンさん、ジューターさん、正岡さん、新藤さん、タナプームさん、チェッロさん、吉田さん、太田さん、松崎さん、田口さん、斉藤さん、永原さん、橋本さん、天野さん、池田さん、住吉さん、中村さん、福寿さん、石川さん、河内さん、タンさん、まさるさん、ポンさん、関根さん、由木さん、キエンさん、渡部さんありがとうございました。青山・森川研究室の人材の多様さは財産だと思います。

プライベートでは神谷さん、つくしのこのお母さん、同つくしのこのとおるさん、原さん、高田さん、加奈子先輩、合川さん、宮原さん、高橋さん、青木さん、久保さん、吉岡さん、長野さん、藤吉さん、圓山さんありがとうございました。皆様には研究が辛い時に僕に研究以外の風を入れてくれて助かりました。皆様のお陰で彩のある研究生生活を送ることができました。

最後に、10年間に渡る学生生活を支えてくれた家族に感謝を捧げます。ありがとうございました。

平成19年1月31日