

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文概要

論文題目

センサーネットワークアーキテクチャ
システム設計と実装評価に関する研究

Studies on System Design and
Implementation Evaluation
for Sensor Network Architecture

申請者

山下	浩一郎
Koichiro	YAMASHITA

情報理工学専攻 アドバンスド・コンピューティング・システム研究

2016年12月

現在、IoT(Internet of Things)に代表されるように、各種センサーを人・機械・環境に設置されることにより様々なデータを集約することで新たな情報流と知見を生むことを狙いとしたセンサーネットワークシステムが注目を集めている。センサーネットワークシステムは、センサーデバイスをネットワークで接続したセンサーフィールドと、取得したセンシングデータをゲートウェイを介してサーバシステムに集約し、演算処理を行うシステムである。

古くは2000年頃のUniversity of California Barkleyで提案されたSmart Dust Projectに端を発している。近年では、より小型化・省電力化されたセンサーデバイスや通信モジュールを用い、例えば医療機器において取得したバイタル情報をもとに健康管理や診断に用いるものや、ビルや家屋に設置することで防犯や使用電力情報分析をするシステムがある。

本論文では、防災を観点に、環境や社会基盤（インフラ）が装備するセンサーネットワークシステムをアプリケーションとして次の①～⑤の条件を満たすシステムを想定する。①長期間かつ広範囲にばらまかれるように設置されるセンサーノード、②各センサーノードは環境発電素子と二次電池により自己完結する、③センサーはプロセッサと無線モジュールで構成され、互いのノードは無線接続される、④発電や通信が天候やノイズといった環境の外乱影響を受けながらノード間で協調動作することでリモートかつメンテナンスフリーで動作状態を維持できる、⑤低コストシステムである。

本論文では、造成地や山の斜面に傾斜計や土壌水分計といった土木工学の分野で用いられている現場設置されたデータロガーや手動計測していたデータ取得を、センサーネットワークにより自動収集するシステムを扱う。このようなシステムは近年の防災意識の高まりから国内外において研究が実施されているが、不安定な無線通信やバッテリーの枯渇により安定動作をしても4ヶ月程度が上限となっている。

しかしながらこのような環境やインフラモニタリングを行うためのセンサーネットワークを実現するために、電力、無線挙動、環境外乱といった多角的観点で考察したアーキテクチャ探索が必要だが、現在これらを俯瞰した設計実装手法は確立されていない。本論文では、外乱を考慮した設計シミュレーション手法と運用時の電力およびトポロジー制御のスケジューリング提案を行い、その結果に基づいた実証評価を通じ提案手法の進歩性優位性を検証する。

本論文は以下の5章で構成され、以下に各章の概要を示す。

第一章「序論」では本研究の目的と背景について述べる。

本論文で扱う技術内容を理解するためには、土木工学的な知見を要するため、

環境データ取得技術紹介なども含め、従来手法の提示と未解決課題の整理を行う。ここで言及するセンサーネットワークの全体実装のポリシーとして個々のノードの100%の動作率を前提するのではなく、動作環境下での外乱を考慮し、ばらつきや想定外動作も考慮した冗長設計を念頭においており、2章3章で述べるモデリングでは、これらの外乱もパラメータとして取り込んでいる。本章ではこのような前提となるアーキテクチャの基本設計概念について整理および定義を行う。

第2章「環境系センサーネットワークシミュレータ」では実際に現場適用するセンサーネットワーク検証で用いるシミュレーションの提案と評価について述べる。従来のシミュレーションでは、デバイス情報を入力することで、ハードウェアのビヘイビアを評価する技術、通信や障害物のパラメータを入力することで無線信号の減衰や反射を再現評価する技術などがある。しかし、実際の環境では多数のセンサーノードが相互作用し合い、データの伝搬とハードウェアのビヘイビア、特に消費電力において相関関係が生じている。さらに、このようなノードが数百～数千個ばらまかれる環境の評価を想定して現実的な時間で高速処理することが求められる。提案するセンサーネットワークシミュレータでは、詳細なパケット遷移やデバイス挙動ではなく、データ収容率や電力バランスのみの評価に特化し、ESL(Electronic System Level)及びマルチエージェントシステムエッセンスを導入し、適切な抽象化の混載を行うことで高速にモデル評価を行うことを可能にした。1000 ノード規模の評価では一般的オープンソース無線シミュレーションソフトウェアであるNS2による同種の評価の実行速度と比較して、約100倍の高速化を実現している。

第3章「センサーネットワークスケジューリング手法」では、前章のシミュレータで評価を行うセンサーネットワークシステムの動作スケジューリングについて述べる。スケジューリング対象は、センサーノードでのデータ収集間の機能停止状態でのスリープ制御のほか、ネットワークを構築する際の接続パスの制御指標を求めることを狙いとしている。システムの要望であるバッテリーと自己給電、および無線接続している状態で、ノイズなどの環境外乱を受けながらも長期動作するための制御を行うため、本論文で提案を行うスケジューリングの判断指標(スケジューリング・キー)は、通信品質LQI(Linked Quality Indicator)、電池残量PS(Power Status)に着目し、さらにシステム挙動に影響を及ぼす通信品質挙動、発電ばらつき、温度による電池活性変化といった環境外乱を確率モデルとして導入し、評価を行った。各スケジューリング・キーの組み合わせによる評価結果では電池状態を第一キーとし、通信品質を第二として提案するPS/LQI手法において、単純なツリー構造で22%の冗長ノードを含ませることで従来最も効率がよいとされたゴシップ接続手法よりも13%電力効率の良いスケジューリング結果を得た。

第4章「現場実装と評価」では、これまでに述べたシミュレーションによるハードウェア探索評価、スケジューリング手法の提案をもとに、実際に試作システムを構築し現場実装による評価結果について述べる。現場実装は、台湾での造成地斜面、道路切り通し斜面、盛土石垣の定点観測を実施し、現地の日照条件や植生について2章提案のシミュレーションの外乱モデル、3章提案のスケジューリング手法の耐環境性の評価を行った。実験は台湾工業技術研究院(ITRI)との共同研究で実施され、10~50m 間隔に設置された最大 100 ノード規模で複数エリア展開を行い、傾斜角、土壌水分測定を 10 分毎に測定を行った。従来 of 類似研究では 7[Ah] のバッテリーを用い、129 日間の計測に成功しているが、最終的にはバッテリー交換が必要となっている。これに対し、提案手法では 200[mW] のソーラーパネル、3.2[Ah] のバッテリーを組み合わせ約 1 年間のノーメンテナンス運用に成功している。また、2章の提案シミュレーション方式の精度に関して、設計時と実装時の通信品質比較において、誤差が 10% 以下であった。しかしながら、上記評価は屋外実証ではあるものの、比較的安定した環境で行われたため、同一アーキテクチャを用い、設置と運用制御パラメタのみを変更し、より環境外乱の大きなエリアでの運用追実験を 2 つ行った。追実験 1 では国土交通省モニタリングプロジェクトにおいて北海道での積雪・寒冷地における道路モニタリングの実証実験として、厳冬下でのバッテリーの不活性状態を考慮した運用実験を実施した。シミュレーションで得られた 69% の冗長性をもったノード配置、10 分から最大で 6 時間のインターバル制御設定で設置を行い、冬季～春季における融雪時の地下水挙動の連続モニタリングに成功している。またこのときの設置状態での通信品質のシミュレーション結果との比較では誤差 30% 程度であったが、不確定要素となる降雪や樹木の影響に対し、高い冗長度によりシステム状態が維持できた。追実験 2 では、地形環境の複雑性として、九州における最大斜度 40 度の段急斜面での実験を行った。この実験環境では段丘面と斜面、およびアンテナの指向特性を加味するため、シミュレーションに階段型の 3D モデルを導入し、アンテナ高や設置斜角の設定を評価し、40% の冗長性をもったノード配置、5 分から最大 30 分のインターバル運用を行った。設置状態での通信品質の一致度は誤差 20% 程度となっており、1 年以上の継続的なデータ収集が実現できている。

第5章「結論」では、本研究により得られた成果、知見を整理する。本研究の成果事項として、100% ではないデータ収集率に対し、冗長度や運用制御を調整することで所望のセンサーネットワーク機能を長期間維持するだけでなく、同一の簡素なアーキテクチャを用いて、様々な環境への対応を設置と運用制御により実際の現場へ適用が可能であることを実証できた。これらの知見は従来の研究レベルの取り組みから実用化にあたって、実装すべきアーキテクチャ（ハード設計、設置、運用管理）探索における環境対応への考慮すべき支配要因となるパラメタの体系化ができた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 山下 浩一郎 印

(2016年12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○ <u>山下浩一郎</u>, “環境系センサーネットワークシミュレータの実装と評価”, 電気学会論文誌E(センサ・マイクロマシン部門), Vol. 135 (2015), No.10, P387-392, Oct. 2015.</p>
○	<p><u>Koichiro Yamashita</u>, Koji Kurihara, Hongchun Li, Chen Ao, Yi Xu, Jun Tian, Keiji Kimura, Hironori Kasahara, “Sensor Network System for the Infrastructure Asset Management”, Proc. of The 3rd International Conference on Universal Village (UV2016), Oct. 2016</p>
○	<p><u>Koichiro Yamashita</u>, Takahisa Suzuki, Hongchun Li, Chen Ao, Yi Xu, Jun Tian, Keiji Kimura, Hironori Kasahara, “Architecture Design for the Environmental Monitoring System over the Winter Season”, Proc of 14th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (ACM MOBIWAC), pp.27-34, Nov.2016.</p> <p>Kouhei Ohba, Yoshihiro Yoneda, Koji Kurihara, Hiroyuki Ito, Noboru Ishihara, Kunihiro Gotoh, <u>Koichiro Yamashita</u>, Kazuya Masu, “Polynomial Regression Techniques for Environmental Data Recovery in Wireless Sensor Networks”, Sensors & Transducers, Vol.199, no.4, pp.1-9, Apr.2016</p>
講演 (査読付き シンポジウム)	<p>Koji Kurihara, Hiromasa Yamauchi, Toshiya Otomo, Takahisa Suzuki, Yuta Teranishi, <u>Koichiro Yamashita</u>, “Software Design Methodology based on Energy Consumption Model Considering Relationship between Software and Hardware”, Proc of 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI2012), pp425-430, March 2012.</p> <p>Hiromasa Yamauchi, Koji Kurihara, Toshiya Otomo, Yuta Teranishi, Takahisa Suzuki, <u>Koichiro Yamashita</u>, “Effective Distributed Parallel Scheduling Methodology for Mobile Cloud Computing”, Proc of 17th Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information technologies (SASIMI2012), pp516-521, March 2012.</p> <p><u>山下浩一郎</u>, 鈴木貴久, 栗原康志, 大友俊也, 木村啓二, 笠原博徳, “大規模無線センサネットワークにおける外乱を考慮したアーキテクチャ探索シミュレータの実装と評価”, 情報処理学会「マルチメディア,分散,協調とモバイル(DICOMO2014)シンポジウム」, pp 1368-1377, Jul. 2014.</p> <p>Kouhei Ohba, Yoshihiro Yoneda, Koji Kurihara, Takashi Suganuma, Hiroyuki Ito, Noboru Ishihara, Kunihiro Gotoh, <u>Koichiro Yamashita</u>, Kazuya Masu, “Environmental data recovery using polynomial regression for large-scale wireless sensor networks”, SENSORNETS 2016 -5th International Conference on Sensor Networks, Proc of SENSORNETS 2016, SCITEPRESS, no.11, pp.161-168, Feb.2016</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(研究会)	<p>Hongchun Li, Chen Ao, Yi Xu, Jun Tian, <u>Koichiro Yamashita</u>, “A Deployment Algorithm for Multi-hop Wireless Networks”, Proc of 6th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications (DIVANet’ 16), pp.99-105, Nov. 2016</p> <p>寺西佑太, 大友俊也, 栗原康志, 山内宏真, 鈴木貴久, <u>山下浩一郎</u>, ” 冗長性を許容したハード・ソフト協調の最適設計と検証”, 電子情報通信学会技術報告書 ICD, 集積回路 111(352), 137-142, Dec. 2011</p> <p>大友俊也, 栗原康志, 寺西佑太, 山内宏真, 鈴木貴久, <u>山下浩一郎</u>, ” メモリの冗長化とパワーゲーティングによる高信頼・低消費電力・高性能実装の提案”, 情報処理学会研究会 2012-ARC-199(14), 1-9, March 2012.</p> <p>林貴或, 枝松ちさと, 村林竜司, 胥徳文, <u>山下浩一郎</u>, 天笠俊之, 牧野昭二, 高橋伸, ” M2M を用いた大規模データ収集システムの構築に関する研究”, 情報処理学会研究会 2013-ARC-207, 1-7, Dec. 2013</p>
(ポスター)	<p><u>Koichiro Yamashita</u>, Takahisa Suzuki, Hongchun Li, Chen Ao, Yi Xu, Jun Tian, Keiji Kimura, Hironori Kasahara, “Architecture Design for the Environmental Monitoring System over the Winter Season”, Poster at the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (ACM MSWiM 2016), Nov. 2016</p>
その他 (招待講演)	<p><u>Koichiro Yamashita</u>, “-Possibility of ESL- A Software Centric System Design for Multicore SoC in the Upstream Phase”, Proc of 15th Asia and south Pacific Design automation Conference (ASP-DAC 2010), pp805-808, Jan. 2010.</p> <p><u>Koichiro Yamashita</u>, “A Principle Simulator for Architecture Design of Distributed Multi Node Sensor System”, 13th International Forum on embedded MPSoC and Multicore (MPSoC2013), Jul. 2013</p> <p><u>oichiro Yamashita</u>, “Evaluation of architecture Search Simulator for Wide-range Grid Wireless Sensor Network”, 14th International Forum on Embedded MPSoC and Multicore(MPSoC2014), Jul. 2014</p> <p><u>Koichiro Yamashita</u>, “Control System for Large-Scale Sensor Network”, 15th International forum on MPSoC for Software-defined Hardware, Jul. 2015</p> <p><u>Koichiro Yamashita</u>, “Scheduling Methodology for Wireless Sensor Network System over the Winter Season”, 16th International forum on MPSoC for Software-defined Hardware, Jul. 2016</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(特許)	<p><u>Koichiro Yamashita</u>, “Autonomous and Large Scale Sensor-network Technology to Contribute to a Safer, more Secure Society”, Smart City Summit and Expo 2014, Feb. 2014</p> <p><u>山下浩一郎</u>, “膨大な数で構成される自動型のセンサーネットワークにおける IoT の課題”, CSAJ コンピュータソフトウェア協会ワークショップ, Feb. 2014. <u>山下浩一郎</u>, “膨大な数で構成される自律型無線センサーネットワークシステム設計”, 情報処理学会 DA シンポジウム 2014, DA シンポジウム 2014 論文集 177-182, Aug. 2014</p> <p><u>山下浩一郎</u>, “環境系センサーネットワークの実現手法”, 電気学会第 31 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集 電気学会センサ・マイクロマシン部門 31, 1-6, Oct. 2014.</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>鈴木貴久</u> “環境モニタリングのための分野横断的 WSN システムアーキテクチャ設計と実装”, 平成 27 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, Aug. 2015.</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “通信装置”, 特願 2014-526622/PCT W02014/016885(公開), Jul. 2012</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “判定方法、判定プログラム、判定装置および判定システム”, 特願 2014-531451, Aug. 2012.</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “変換装置、変換方法、および情報処理システム”, PCT JP2012/074989, Sept. 2012.</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “判定方法、およびシステム”, PCT JP2012/079191/PCT W02014/030232(公開), Oct. 2012</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “データ収集方法、システム、およびデータ収集プログラム”, PCT JP2013/056369</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “分散処理方法、システム、および分散処理プログラム”, PCT W02015/008367 (公開), Jul. 2013</p> <p><u>山下浩一郎</u>, <u>山内宏真</u>, <u>栗原康志</u>, <u>鈴木貴久</u>, “データネットワーク管理システム、データネットワーク管理装置、データ処理装置、およびデータネットワーク管理方法”, PCT W02015/001657(公開), Jul. 2013</p>