



長寿命ワイヤレスセンサネットワークのためのネットワークプロトコルに関する研究

松田, 隆志

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2010-03-25

(Date of Publication)

2014-04-02

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4941

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004941>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 松田 隆志
博士の専攻分野の名称 博士（工学）
学 位 記 番 号 博い第 4941 号
学位授与の 要 件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付 平成 22 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

長寿命ワイヤレスセンサネットワークのためのネットワークプロトコルに関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 吉本 雅彦
教 授 森井 昌克
教 授 玉置 久
准教授 太田 能

本研究は、ネットワークプロトコルと他層との協調設計によるワイヤレスセンサネットワークの長寿命化を目的とする。

近年、センシング機能を有する小型ノードを無線通信によるマルチホップで接続したセンサネットワークが注目されている。センサネットワークは、空間のさまざまな場所でセンシング情報を取り込み、われわれはその情報を活用することができる。センサネットワークは、環境、災害、医療、農業、防犯などのさまざまな分野での利用方法が検討されており、この実現が期待されている。本研究では、センサネットワークの実用化と普及のために、センサノードのシステム LSI 化を実現することをねらいとしている。そのためには、ネットワークプロトコル階層における上位層から下位層までの協調設計（クロスレイヤ設計）が必要不可欠であると考えている。

センサネットワークは、センサ機能、無線中継機能、CPU をそなえたセンサノードにより構成される。このようなセンサノードを多数配置することで、高密度の空間センシングとネットワーク構築を同時に達成する。センサネットワークは、センシング情報をノード間で交換し、処理し、インターネットなどから遠隔に情報を得ることを可能にする。

センサネットワークの実用化において、システムの可用時間を可能な限り長期化することが大きな技術課題となっている。センサノードは通常バッテリーで動作すると考えられているが、上記で述べたように多数のセンサノードが分散配置されるため、バッテリー交換の手間は計り知れない。CPU やメモリ、無線機のような他のデバイスに比べて、バッテリーの技術はあまり発展していない。センサノードが光や熱、振動といったマイクロエネルギーを取り込み自己発電する方法も提案されているが、消費電力の全てを補うほどの電力供給を得ることは難しい。よって、センサノードの超低消費電力化は必須である。また、ノードを安く大量生産可能とすることも重要な課題である。そのためには、センサノードの部品点数を削減する必要があり、センサノードの機能をシステム LSI (Large-Scale Integration) 上に実装することが非常に有効である。また、センサノードの LSI 化は、センサノードの低消費電力化にも寄与する。センサノードのシステム LSI 化を検討するにあたって、クロスレイヤ設計をおこなうことが重要である。従来のネットワークシステムとは異なり、消費電力が重要な性能指標となるセンサノードの設計においてはハードウェアの回路構成(下位層)が MAC 層、ネットワーク層(上位層)の設計に大きな影響を及ぼす。また逆に、上位層のプロトコル設計により、下位層に相当する回路設計が影響を受ける。つまり、消費電力の削減には MAC 層以上の通信プロトコルと物理層に相当するシステム回路の双方にわたる最適化が必要である。しかし、従来の研究は、通信プロトコル、システム LSI のど

ちらか一方を主体とする研究か、あるいはその一方の検討が不十分な研究がほとんどである。

第3章 データ送信スケジューリング ーネットワーク層とアプリケーション層との協調設計ー

第3章では RTS/CTS に基づいたイベント駆動型のデータ送信スケジューリングを提案する。全てのノードから湿度や気温などのセンシングデータを一定時間ごとに集める定期収集型アプリケーションは、環境センシングや農業における圃場管理などの幅広い応用が期待されている。このような定期収集型のアプリケーションにおいては、全てのセンサノードからの情報が同じ時間に転送される。このようなアプリケーションでは、データの衝突が多く発生し再送によって増大するデータトラフィックによる消費電力増加が問題となる。そこでデータ転送スケジューリングによってこの問題を低減することが考えられている。提案するスケジューリング方式ではデータ再送可能であり、データ集約できるようにスケジューリングしている。また時間駆動型でなくイベント駆動型のため細かい同期が不要である。従来のスケジューリング方式と比較のためにシミュレーションによってその有効性を示す。また空間がパケット誤りが発生しやすい環境（ロジータ環境）でのシミュレーションをおこなった。実空間上ではセンサノード以外からの電波などにより干渉がおこる場合がある。そこで、ロジータ環境での提案手法と従来手法との比較もおこなった。ネットワークシミュレーションにより提案手法は従来手法に比べライフタイムを向上することを示した。

第4章 マルチ起動周期メディアアクセスを用いたマルチバス経路制御 ーネットワーク層とデータリンク層との協調設計ー

第4章では、マルチ起動周期メディアアクセスを用いたマルチバス経路制御を提案し、低電力化を実現する。センサノードは、データを受信していない時に受信機を駆動させ続けるアイドルリスニングによって大半の電力を消費する。間欠動作プロトコルでは定期的なノードをスリープ状態にすることで、アイドルリスニングを削減している。しかし、従来の間欠動作プロトコルには、オーバーヒアリング、高遅延といった問題がある。そこで、オーバーヒアリングの削減と遅延の抑制のために、二種類の起動周期 (High/Low モード)

を組み合わせ、さらにマルチパス経路制御を導入した、High モード動作により低遅延で送信し、データ通信に関係ないノードを Low モードにすることでアイドルリスニングを削減する。また、ノードによって異なる起動周期をもつことでオーバーヒアリングを削減する。さらに複数経路によるトラフィック分散によりネットワークの可用時間を向上する。ネットワークシミュレーションにより、従来手法よりライフタイムを向上し遅延を抑えることを示した。

第5章 データ集約を考慮した分割起動SRAM —ネットワーク層と物理層との協調設計1—

第5章では、データ集約を考慮した部分起動メモリによる消費電力削減手法を提案する。データ収集において、データの集約によって送受信データ量を削減することは、センサノードの消費電力を削減するために有効な手段である。しかし、データ集約を実際のセンサノードに実装して運用するためには十分な容量のSRAM(Static Random Access Memory)が必要である。しかしSRAMはデータを保持するために待機電力が発生する。センサノードはほとんどの時間が待機状態でありこのSRAMの待機電力によってセンサノードの消費電力が増大する問題がある。そこで本研究では、待機電力削減のために、センサノードへの分割起動メモリの導入を提案した。通常のRAMは容量に比例して待機電力が増大するのに対し、提案手法では使用していない部分の電源を切ることで無駄な待機電力を削減できる。この提案手法の性能評価のために、データ集約とRAM容量の関係及び消費電力についてネットワークシミュレーションによる評価をおこなった。シミュレーション結果より、提案手法によって待機電力を抑制できることを確認した。

また、CMOSデバイスの微細化に伴い、サブスレッショルドリーク電流の増大や、チップ製造時の誤差によるバラツキの増加が問題となっている。そこで、サブスレッショルドリーク電流やしきい値バラツキを考慮したセンサノードの電力モデルを提案する。シミュレーション結果より、電力バラツキを考慮したモデルは電力バラツキを考慮していないモデルに比べ、ネットワークライフタイムが短くなることを示した。また、電力バラツキをあらかじめ測定しておくことで、適切な配置をおこなう方法を提案する。シミュレーション結果より適切な配置によってライフタイムを向上することができることを示した。

第6章 センサノードの製造ばらつきを考慮したシステム可用時間改善方式 —ネットワーク層と物理層との協調設計2—

第6章ではセンサノードの製造ばらつきを考慮したシステム可用時間改善方式について述べる。CMOSデバイスの微細化に伴い、サブスレッショルドリーク電流の増大や、チップ製造時の誤差によるバラツキの増加が問題となっている。そこで、サブスレッショルドリーク電流やしきい値バラツキを考慮したセンサノードの電力モデルを提案する。シミュレーション結果より、電力バラツキを考慮したモデルは電力バラツキを考慮していないモデルに比べ、ネットワークライフタイムが短くなることを示した。また、電力バラツキをあらかじめ測定しておくことで、適切な配置をおこなう方法を提案する。シミュレーション結果より適切な配置によってライフタイムを向上することができることを示した。

本論文ではネットワーク層を中心として、アプリケーション層、データリンク層、物理層との協調設計によりデータトラフィック・オーバーヒアリング・アイドルリスニング・ハードウェアの消費電力の問題を解決し、センサネットワークシステムの長寿命化を実現した。

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----|-------|
| 氏名 | 松田 隆志 | | |
| 論文 題目 | 長寿命ワイヤレスセンサネットワークのためのネットワークプロトコルに関する研究 | | |
| 審査 委員 | 区 分 | 職 名 | 氏 名 |
| | 主 査 | 教授 | 吉本 雅彦 |
| | 副 査 | 教授 | 森井 昌克 |
| | 副 査 | 教授 | 玉置 久 |
| | 副 査 | 准教授 | 太田 能 |
| 要 旨 | | | |
| <p>近年、センシング機能を有する小型ノードを無線通信によるマルチホップで接続したセンサネットワークが注目されている。センサネットワークは、空間のさまざまな場所でセンシング情報を取り込み、われわれはその情報を活用することができる。センサネットワークは、環境、災害、医療、農業、防犯などのさまざまな分野での利用方法が検討されており、この実現が期待されている。本研究では、センサネットワークの実用化と普及のために、センサノードのシステム LSI 化を実現することをねらいとしている。センサネットワークの実用化において、システムの可用時間を可能な限り長期化することが大きな技術課題となっている。センサノードは通常バッテリーで動作すると考えられているが、可用時間を延ばすためにはセンサノードの超低消費電力化が必須である。消費電力が重要な性能指標となるセンサノードの設計においてはハードウェアの回路構成(下位層)が MAC 層、ネットワーク層(上位層)の設計に大きな影響を及ぼす。また逆に、上位層のプロトコル設計により、下位層に相当する回路設計が影響を受ける。従って、本研究では、MAC 層以上の通信プロトコルと物理層に相当するシステム回路の双方にわたる協調設計研究を行っている。</p> <p>本論文は6章で構成されており、第1章は序論である。第2章では、低消費電力化に向けたセンサーネットワークの具体的課題について述べている。</p> <p>第3章では、RTS/CTSに基づいたイベント駆動型のデータ送信スケジューリングを提案している。全てのノードから湿度や気温などのセンシングデータを一定時間ごとに集める定期収集型アプリケーションは、環境センシングや農業における圃場管理などの幅広い応用が期待されている。このような定期収集型のアプリケーションにおいては、全てのセンサノードからの情報が同じ時間に転送される。このようなアプリケーションでは、データの衝突が多く発生し再送によって増大するデータトラフィックによる消費電力増加が問題となる。そこでデータ転送スケジューリングによってこの問題を低減することが考えられている。提案するスケジューリング方式ではデータ再送可能であり、データ集約できるようにスケジューリングしている。また時間駆動型でなくイベント駆動型のため細かい同期が不要である。従来のスケジューリング方式と比較のためにシミュレーションによってその有効性を示す。また空間がパケット誤りが発生しやすい環境(ロジック環境)でのシミュレーションをおこなった。実空間上ではセンサノード以外からの電波などにより干渉がおこる場合がある。そこで、ロジック環境での提案手法と従来手法との比較もおこなっている。ネットワークシミュレーションにより提案手法は従来手法に比べライフタイムを向上することを示した。</p> <p>第4章では、マルチ起動周期メディアアクセスを用いたマルチパス経路制御プロトコルを提案し、低電力化を実現している。センサノードは、データを受信していない時に受信機を駆動させ続けるアイドルリスニングによって大半の電力を消費する。間欠動作プロトコルでは定期的にノードをスリープ状態にすることで、アイドルリスニングを削減している。しかし、従来の間欠動作プロトコルには、オーバーヒアリング、高遅延といった問題がある。そこで、オーバーヒアリングの削減と遅延の抑制のために、二種類の起動周期(High/Low モード)を組み合わせ、さらにマルチパス経路制御を導入した。High モード動作により低遅延で送信し、データ通信に関係ないノードを Low モードにすることでアイドルリスニングを削減する。また、ノードによって異なる起動周期をもつことでオーバーヒアリングを削減する。さらに複数経路によるトラフィック分散によりネットワークの可用時間を向上する。ネットワークシミュレーションにより、従来手法よりライフタイムを向上し遅延を抑えることを示した。</p> | | | |

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--|--|
| 氏名 | 松田 隆志 | | |
| <p>第5章では、データ集約を考慮した部分起動メモリによる消費電力削減手法と製造バラツキを考慮した電力モデルを提案している。データ収集において、データの集約によって送受信データ量を削減することは、センサノードの消費電力を削減するために有効な手段である。しかし、データ集約を実際のセンサノードに実装して運用するためには十分な容量のSRAM (Static Random Access Memory) が必要である。しかしSRAM はデータを保持するために待機電力が発生する。センサノードはほとんどの時間が待機状態でありこのSRAMの待機電力によってセンサノードの消費電力が増大する問題がある。そこで本研究では、待機電力削減のために、センサノードへの分割起動メモリの導入を提案している。通常のRAMは容量に比例して待機電力が増大するのに対し、提案手法では使用していない部分の電源を切ることで無駄な待機電力を削減できる。この提案手法の性能評価のために、データ集約とRAM容量の関係及び消費電力についてネットワークシミュレーションによる評価をおこなった。シミュレーション結果より、提案手法によって待機電力を抑制できることを確認した。</p> <p>また、CMOS デバイスの微細化に伴い、サブスレッショルドリーク電流の増大や、チップ製造時の誤差によるバラツキの増加が問題となっている。そこで、サブスレッショルドリーク電流やしきい値バラツキを考慮したセンサノードの電力モデルを提案する。シミュレーション結果より、電力バラツキを考慮したモデルは電力バラツキを考慮していないモデルに比べ、ネットワークライフタイムが短くなることを示した。また、電力バラツキをあらかじめ測定しておくことで、適切な配位をおこなう方法を提案する。シミュレーション結果より適切な配位によってライフタイムを向上することができることを示した。</p> <p>以上、第3章～第5章で、センサーネットワークにおけるセンサーノードの低消費電力化を実現するための要素技術について記述し、最後に、第6章で本論文を総括し、結論を述べている。これらの研究成果は、2編の査読付き論文と3編の国際学会プロシーディングにて掲載されており、今後、ユビキタス社会実現の鍵となるワイヤレスセンサーネットワークにおいて、その長寿命化に寄与する有効な手段となり得るものである。よって、学位申請者の松田隆志氏は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p> | | | |
| 以上。 | | | |