

電波時計を用いた同期型 バッテリーレス無線センサネットワークの設計と実装

渡辺 貴文[†] 森戸 貴[‡] 南 正輝[†] 森川 博之[‡]

[†]芝浦工業大学 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5

[‡]東京大学 〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: [†]{m107116,minami}@shibaura-it.ac.jp, [‡]{morito,mori}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 数千台単位で広範囲にセンサノードを分散配置する無線センサネットワークにおいて、電源の確保は1つの大きな課題である。既存の無線センサネットワークのノードは一次電池による駆動を前提としているが、電池交換の手間や費用などを考えると各ノードはバッテリーレスで駆動されることが望ましい。そこで、当研究室では太陽電池等の発電素子をエネルギー源として用いることで、1次電池使用時よりも長期間稼働させること目標としたセンサネットワークシステムである“Solar Biscuit”(以下SBと省略)の開発を進めてきた。しかしながら、太陽電池より得られる電力が微少かつ不安定なSBのノードでは消費電力の徹底した削減が必要となる。本稿では既存のMACプロトコルのうち最も省電力であるスケジュールベースの通信に電波時計による時刻同期を組み合わせ、SBにおいてより省電力な通信を実現する方法について報告する。

キーワード 無線センサネットワーク, バッテリーレスシステム, 電波時計, スケジュール通信

Design and Implementation of a Radio Controlled Clock based Battery-less Wireless Sensor Network

Takafumi WATANABE[†] Takashi MORITO[‡] Masateru MINAMI[†] and Hiroyuki MORIKAWA[‡]

[†]Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

[‡]The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8904 Japan

E-mail: [†]{m107116,minami}@shibaura-it.ac.jp, [‡]{morito,mori}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract One big problem in wireless sensor network is how to supply electric power to a number of sensor node. A battery is usually used for driving these sensor node. However, this is problematic in that dead battery replacement is then required for a huge number of nodes. To tackle this problem, we are researching on battery-less wireless sensor network system called "Solar Biscuit" which employs a solar cell for its energy source. Because energy obtained from energy-harvesting device tends to be unstable depending on environment change (e.g. climate change), the key challenge in designing battery-less WSN is how to ensure long-term stable operation of the network. To enable such stable operation, we believe that power consumption in multi-hop communication should be reduced drastically as the first step. From this point of view, we are trying to utilize radio-controlled clock technology to develop a practical low-power multi-hop communication scheme for battery-less WNSs. This paper introduces design of a radio-controlled clock based scheduled communication mechanism as well as its implementation and initial experimental results.

Keyword Wireless Sensor Network, Battery-less System, Radio Controlled Clock, Scheduled Communication

1. はじめに

無線センサネットワークは無線により通信を行うため、ノードの設置場所に関して柔軟性が高いが、その利点を発揮させるためには外部から有線での電力供給を行うことはできない。そのため、無線センサネットワークではノードにバッテリーを搭載することが一般的である。このとき、バッテリーが供給可能な電力は有限であるので、ノードの活動時間を延ばすためには省

電力化を行う必要がある。しかし、ノードの省電力化を進めたとしても、バッテリーから供給可能な電力が有限である以上、継続的な稼働にはバッテリーの交換が必要である。このため、例えば数千台規模のノードを用いる環境モニタリングなどの大規模な無線センサネットワークを考えると、バッテリー交換に関するコストが問題となる。

このような観点から、筆者らは太陽電池等の発電素

子をエネルギー源として用いたバッテリーレスのセンサネットワークシステムである“Solar Biscuit”（以下 SB と省略）の開発を進めてきた [1][2][3]。SB のノードは発電した電力を一時的に蓄えるために電気二重層キャパシタを搭載し、バッテリーは使用しない。これによりバッテリーの交換が不要となり、故障などが発生しない限り長期に渡る継続的な動作が可能となるほか、バッテリー交換の際の手間や費用、使用済みバッテリーの廃棄に伴うゴミ問題も軽減できる。しかし、環境から得られるエネルギーは微少かつ不安定で、電源を環境に依存している SB の各ノードの電力事情は極めて劣悪なものとなる。例えば、晴天時の日光の当たる屋外であればノードは十分稼働するが、屋内はもちろんのこと、屋外であっても日陰や悪天候時にはノードが消費する mW オーダの電力をまかなうことは難しく、ノードは休止状態に入ってしまう。環境モニタリング等、広範囲に多くのノードを配置する場合にはマルチホップ通信を使用することとなるが、そのような環境下において、このように電力状況が悪化したノードが突然休止状態に入ってしまうとパケットの欠損や遅延が発生し、ネットワークの信頼性が大きく低下する。これを避けるため、SB のノードでは消費電力を可能な限り下げるとともに、効果的なパワーマネジメントを行う必要がある。

一般に無線センサネットワークのノード上にはマイクロプロセッサ、無線通信チップ、センサなどの各種パーツが搭載されている。このうち、センサはセンシング間隔に応じてセンシングを行う際にだけ動作させ、普段はスリープさせることができる。また、マイクロプロセッサはタイマーや無線通信チップからの割り込みなどをトリガとして、処理が必要な時にだけ動作させることができる。したがって、これらの要素に関してはパワーマネジメント的な観点からこれ以上の効率化を行うことは難しい。

他方、無線通信部は実装する MAC プロトコルに依存して消費電力が大きく変化する。これまでセンサネットワークにおいては、比較的簡単に実装できる方式として CSMA (Carrier Sense Multiple Access) ベースの MAC (Medium Access Control) プロトコルが広く用いられてきたが、一般的に CSMA ベースでは常に受信状態のままパケットの到着を待つために消費電力が大きくなってしまふ。

このような問題に対し、これまで S-MAC[4]や IEEE802.15.4[5]等多くの通信方式が研究されてきた。これらのうち、電力的な観点から最も効率が良いのはスケジュールベース[6][7]の通信方式である。スケジュール通信ではノードが通信を行う時間をあらかじめ決めておくため、その時間だけ通信状態になれば良く、

消費電力が小さい。しかし、マルチホップのスケジュール通信を考えた場合、ネットワーク中の全てのノードが同じタイミングを共有しなければならず、時刻同期が必要となる。

ネットワーク全体の時刻同期には時刻同期プロトコル[8][9]を用いることが考えられる。しかしながら、先ほど述べたとおり、電源が不安定な SB のネットワークではわずかな天候の変化などによってネットワークも不安定になってしまい、これをそのまま適用することは難しいと考えられる。また、SB は環境モニタリングなど数千台のノードを用いた大規模なネットワークへの適用を目標としているが、時刻同期プロトコルを用いて数千台のノードで確実かつスムーズに全ノードの時刻同期を行うことも数的なスケーラビリティの観点で疑問である。ノードが保持する時刻をスケジュール通信が行える程度の精度に保ち続けるためには、定期的に時刻同期を繰り返す必要がある。したがって、ノードの台数が多いネットワークでは、時刻同期によるトラフィックが大きな負荷となってしまう可能性がある。このため、ネットワークを使用せずノードが自立的に時刻同期を行う手法が望まれる。

自立的に時刻同期を行う方法としては GPS (Global Positioning System) が一般的であるが、受信機は数十 mA 程度の電流を必要とし消費電力的な観点からこれを適用することは難しい。これに対し、近年普及してきた時刻同期方式として電波時計がある。電波時計は腕時計に搭載されるほど省電力で小型化されつつあり、SB のノードへの搭載も容易である。ネットワークを使用せずノードが単独で時刻同期を行うことができるため、時刻同期プロトコルのようなスケーラビリティの問題も無く、SB のノードの時刻同期手法として適していると考えられる。

このような観点から、本研究では時刻同期に電波時計を用いたマルチホップ通信用のスケジュール通信を設計し、ノードの消費電力の削減を図ることを考える。電波時計を用いたスケジュール通信の先行研究としては、文献 [10] がある。文献 [10] では、電波時計を用いたスケジュール通信の省電力性についてシミュレーションベースでの検討がなされている。これに対し、本研究ではバッテリーレス無線センサネットワークのノードを対象とし、実測に基づくデータをベースに通信を設計し、実装・評価までを行うことで、より現実的な観点からアプローチすることを目指した。本稿では、実際に SB のノードにスケジュール通信を実験的に実装し、電波時計を用いたスケジュール通信の初期的な評価を行った結果までを報告する。

以下、2.では実測に基づいて電波時計を用いたスケジュール通信の基礎部分を設計する。3.ではスケジュー

ール通信の実装と初期的な評価について述べ、4.でまとめを行う。

2. 電波時計を用いたスケジュール通信の実装

本研究の目的は、電波時計を用いたスケジュール通信を考え、スケジュールの割り当て方法などを含め、バッテリーレス無線センサネットワークに適した通信方式を実装と実験を通じて包括的に考える点にある。これに向けて、実測に基づく電波時計の誤差、同期精度と消費電力の関係などを分析した上で、まずは2つのノード間でスケジュール通信を実現するための基礎設計を行う必要がある。次いで、複数のノードに対してスケジュール通信を適用した実験を行い、最終的にはダイナミックなスケジュール割当を含め、ノードを配置するだけでバッテリーレス無線センサネットワークが自動的に構築されるようなシステムを実現する必要がある。また、電波時計を用いたスケジュール通信と、既存の省電力型プロトコルとの公平な比較を行い、その適用範囲を明確にする必要もある。

本稿ではこれら課題のうち、スケジュール通信の基礎設計と実装。および、複数のノードによるスケジュール通信の基礎実験について述べる。

2.1. 電波時計の誤差分析

電波時計を用いたスケジュール通信を設計するに際し、電波時計の同期誤差を測定する基礎実験を行った。本実験では、長野沖電気製の組込用電波時計モジュール NRC01 を SB ノードに搭載し、ハードウェア・ソフトウェア共に同一の4台のノードを用いて、ノード間での時刻同期のばらつきを調べた。測定においては、GPS 受信機からの高精度時刻信号 (μs レベル) を基準にし、各ノードの時刻の誤差を測定した。図1に100 の測定における、95.44%信頼区間での誤差の分布を示す。この結果、ノード間で最大 33ms 程度 (図中ノード2とノード4) のばらつき発生する可能性があることが明らかとなった。ばらつきの原因は主として、電波時計の信号の精度とモジュール自体の個体差によるものと推測される。

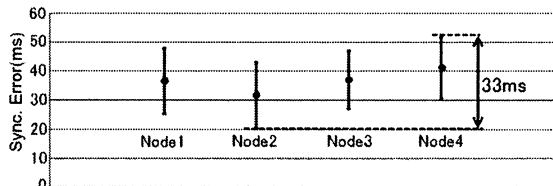


図 1. 各ノードの同期誤差

2.2. 消費電力と精度の分析

電波時計はまず標準電波を受信して同期信号を生成する。その信号は水晶発振子の精度で駆動される時

計(RTC: Real Time Clock)に入力され、RTC が標準電波の時刻に同期する。このため、同期後は RTC がフリーラン状態となるため、RTC が保持する時刻がドリフトして次第に誤差が大きくなる。このため、一定の精度を保つためには、定期的に標準電波を受信し、RTC の再同期を行う必要がある。このとき、フリーラン状態における誤差の蓄積が少ない高精度 RTC を用いれば時刻同期回数を少なくすることができるが、高精度 RTC は温度補償などを行うために、消費電力が大きくなってしまう。一方、低精度の汎用 RTC を用いれば消費電力は極めて低く抑えることができるが、同期を頻繁に行う必要がある。

そこで、高精度 RTC と汎用 RTC を比較し、同期精度と消費電力の関係を調査した。本調査では、高精度 RTC としてダラスセミコンダクタ社製の DS3231、汎用 RTC として、セイコーエプソン社製の RTC-8564 を用いた。表1に2つの RTC の消費電力と精度の関係を、表2に電波時計の同期間隔と RTC の誤差蓄積の関係を示す。

電波時計モジュールの消費電流は受信動作時で 100μA 以下であり、標準電波を受信して同期を行うまでにはおよそ3分程度の時間を要する。仮に消費電流を 100μA とし、1 時間に1回の同期を行ったとすれば、平均的には 5μA の消費電流と考えることができる。一方、高精度 RTC は連続的に 200μA、汎用 RTC は 275nA の電流を消費する。したがって、同一の時刻精度を保つ場合、消費電力的な観点からは、汎用 RTC を用いて同期回数を多くの方が有利となることが分かる。

表 1. RTC の精度と消費電力の関係

RTC	Current Consumption	Accuracy	Price
DS3231 (High-accuracy)	200μA	2ppm	High
RTC-8564 (Low-accuracy)	275nA	5ppm	Low

表 2. 同期間隔と RTC の誤差蓄積

Synchronization Interval	Error (RTC-8564)	Error (DS3231)
12h	216ms	72ms
6h	108ms	36ms
3h	54ms	18ms
1h	18ms	6ms

2.3. スケジュール通信の設計

ここまでの検討結果をふまえて通信の設計を行う。スケジュール通信では各ノードが決められた時刻に通信を行い、それ以外の時間は無線モジュールを完全にスリープさせておくことができる。しかしながら、前述のように、電波時計の信号の精度による誤差や、RTC に蓄積される誤差などの要因により、同期にずれ

が生じてしまう。確実な通信を行うためには、この誤差を考慮して通信タイミングの設計を行う必要がある。

今回設計したスケジュール通信方式のタイミングを図2に示す。本方式では、ネットワーク内の2つのノード間で通信の開始時刻が決められており、その時刻にそれら2つのノードがアクティブとなり通信を行う。このとき、ネットワーク内でスロットが衝突しないように通信時刻を決定したり、期間内でどちらのノードが先に送信を行うかを決定したりといったスケジュール割当方法を別途考える必要があるが、本稿ではこれらの問題は取り扱わず、スケジュールが決められた状態を仮定して話を進める。

先に送信を行うノード（図中ノード1）のスロットはガードタイム $T_{Guard\ Time}$ 、送信期間 T_{Send} 、受信期間 T_{Recv} から構成され、スロット長の最大長は固定される。最大長を固定する理由はある2つのノード間の通信が他の2つのノード間の通信を妨害しないようにするためである。 $T_{Guard\ Time}$ はノード間の時計の誤差を吸収するための期間である。例えば、高精度 RTC を用いて1時間毎に電波時計で同期をとり、ドリフトによる誤差を6msにおさえた場合、電波時計の時刻同期誤差のばらつき33msを考慮して39msが $T_{Guard\ Time}$ の最低値となる。送受信期間 T_{Send} および T_{Recv} はネットワークで扱うデータ量や許容される遅延などにより決定する。

一方、先に受信を行うノード（図中ノード2）のスロットは T_{Recv} および T_{Send} により構成され、送信後に直ちにスリープする。

次に、2つのスロットが密接している場合を考える。例えば、ノード2の保持する時刻が遅れており、さらにノード4の保持する時刻が進んでいたとする。この時、両者が保持する時刻のずれ具合によってはノード2がノード1宛に送信した通信をノード4も受信してしまう可能性がある。これによる不具合を避けるため、MACヘッダによるパケットの宛先チェックを行い、自ノード宛でないパケットは破棄する。

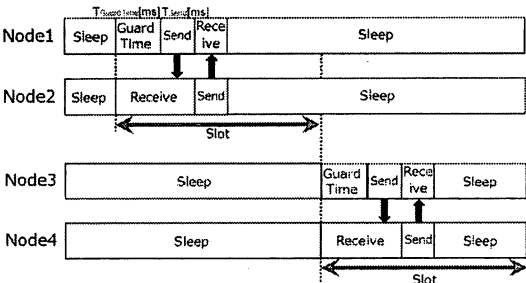


図2.通信タイミング

3. 実装

設計したスケジュール通信の基本的な動作の確認と評価を行うための実装を行った。以下では実装した

ハードウェアおよびソフトウェアの構成と動作について概説する。

3.1. ハードウェアの構成

ハードウェアはこれまでに開発した SB のノード [1][2][3]に時刻同期モジュールを搭載する形で構成した（図3）。図4にノードのブロック構成を示す。ノードには太陽電池で発電した電力を一時的に蓄えるための電気二重層キャパシタ、マイクロプロセッサ（PIC 18LF4620）、微弱無線モジュール（CC1000）、EEPROM、および温度湿度センサ SHT11 などが搭載されている。このノードに電波時計モジュール NRC01 および高精度 RTC DS3231 を接続している。

標準電波を受信して取得された時刻情報はアラーム機能付きの RTC に書き込まれる。一方、マイクロプロセッサは EEPROM に記録されている通信のスケジュールを読み込み、その時刻を RTC にセットした後、RTC 以外のノードの機能はすべてスリープモードに入る。RTC にセットされた時刻になると RTC が割込信号を発生し、マイクロプロセッサが起動して通信が行われる。

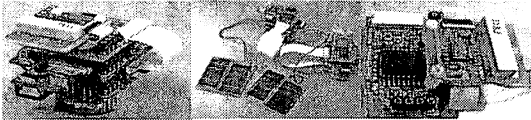


図3. SB のノード

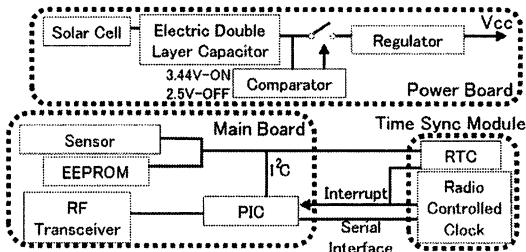


図4. SB ノード構成

3.2. ソフトウェアの構成

図5に実装したソフトウェアの構成を示す。ソフトウェアの実装においては、PAVENET[11][12]を使用して行った。PAVENETではアプリケーションの開発効率を向上させるためにネットワークのレイヤ構造が明確に定義されている。本実装では電波時計を駆動するためのドライバを追加し、MAC層にスケジュール通信の実験を行うための機能（EEPROMに指定された時刻に通信を行う機能）、ネットワーク層にパケットのマルチホップ転送実験を行うための機能（スタティックルーティング）を実装した。物理層については PAVENET の標準構成をそのまま用いており、現在の実装ではプリアンブル6バイト、送受信 MAC アドレス2バイト、

ルーティング用の送信元および宛先アドレスが2バイト、データ6バイトの固定長の構成となっている。なお、トランスポート層は実装していない(トランスポート層からのデータはネットワーク層へスルーされる)。

アプリケーション層に実装されたセンシング機能は適当なタイミングで温度センサを動作させ、センシングを行う。このデータはトランスポート層を経由してネットワーク層に渡され、ネットワーク層はEEPROMにあらかじめ書き込まれたルーティングテーブルを参照してルーティングの宛先アドレスを生成する。スケジュール通信の機能はMAC層に実装されており、EEPROMに書き込まれたスケジュール(通信開始時刻)にしたがってRTCが割込を発生させ、送信パケットを物理層へと渡す。なお、物理層は無線モジュールからの割込、MAC層はRTCからの割込により駆動され、それ以外のレイヤはすべてPAVENETのタスクスケジューラで管理される。

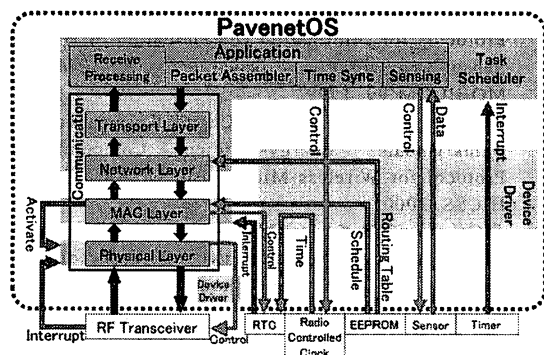


図5.ソフトウェア構成

3.3. 動作確認

実装したマルチホップスケジュール通信機能の動作確認を行う目的で、図6に示すようなネットワークを構成した。動作確認においては、12台のノードを用いて図7のようなネットワークを構成した。全ノードは毎分0秒に温度センサを用いたセンシングを行う。その後、決められたスケジュールにしたがって、マルチホップルーティングを行う。スケジュール通信においては、 $T_{Guard\ Time}$ を50msとし、スロット長の最大値は350msとした。図中の矢印横の数字がタイミングを示しており、例えば、左上11番のノードと10番のノードは、毎分8秒に通信を行うようにあらかじめ静的に設定されている。実機による実験の様子と実際にシンクノードから得られたデータを図7および図8に示す。前述のネットワーク構成の下、3時間程度連続動作させた結果、CSMAベースのセンサネットワークの様に頻繁なパケットロスが発生することなくスムーズな通信が行われていることが確認できた。

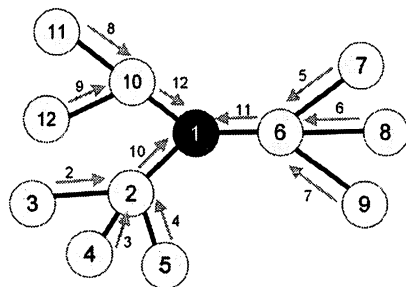


図6. 動作確認用ネットワークの構成

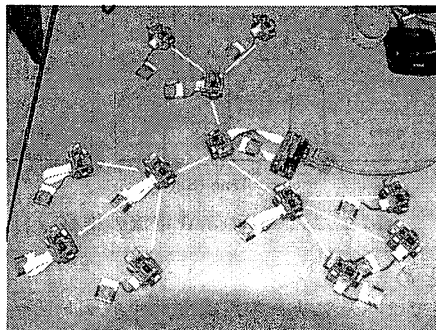


図7. 実機による動作確認の様子

```
COM1 - Tera Term VJ
ファイル(F) 編集(E) 設定(S) コントロール(C) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

Scheduled Time ! 16:31:10
Recv ! ! ! (NET From:2 Tol)
---- Node : 2 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.24 CapVoltage:2.0 V
Recv ! ! ! (NET From:3 Tol)
---- Node : 3 ( 16:31 ) ----
Temperature:22.82 CapVoltage:2.0 V
Recv ! ! ! (NET From:4 Tol)
---- Node : 4 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.08 CapVoltage:2.3 V
Recv ! ! ! (NET From:5 Tol)
---- Node : 5 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.06 CapVoltage:0.0 V

Scheduled Time ! 16:31:11
Recv ! ! ! (NET From:6 Tol)
---- Node : 6 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.47 CapVoltage:2.1 V
Recv ! ! ! (NET From:7 Tol)
---- Node : 7 ( 16:31 ) ----
Temperature:22.99 CapVoltage:2.0 V
Recv ! ! ! (NET From:8 Tol)
---- Node : 8 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.22 CapVoltage:0.2 V
Recv ! ! ! (NET From:9 Tol)
---- Node : 9 ( 16:31 ) ----
Temperature:22.95 CapVoltage:2.0 V

Scheduled Time ! 16:31:12
Recv ! ! ! (NET From:A Tol)
---- Node : 10 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.13 CapVoltage:2.0 V
Recv ! ! ! (NET From:B Tol)
---- Node : 11 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.19 CapVoltage:2.1 V
Recv ! ! ! (NET From:C Tol)
---- Node : 12 ( 16:31 ) ----
Temperature:25.09 CapVoltage:0.0 V
```

図8. シンクノードからの出力データ

次に、ノードにおける各動作時の消費電流の測定を行った。測定結果を図9に示す。センシングと通信以外の部分で余計な電流を消費していないことが確認でき、電波時計を用いたスケジュール通信が適切に実装され動作していることが分かる。なお、今回の実装では実験的に高精度RTCを用いたため、スリープ時の消費電流が大きくなっているが、2.で述べたように低消費電力の汎用RTCを用いて同期頻度を高くすればさらに削減することが可能である。

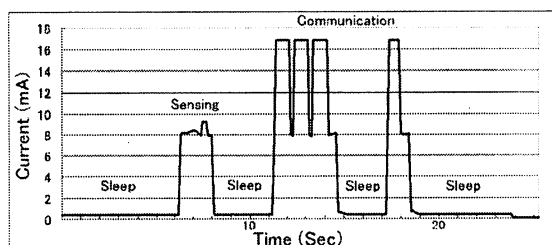


図9. ノードの消費電流の推移

4. まとめ

本稿ではバッテリーレス無線センサネットワークにむけた省電力型の通信方式として、電波時計を用いたマルチホップのスケジュール通信を考え、その初期的設計と実装・評価について述べた。電波時計を用いることで、ネットワーク全体の時刻同期が容易に可能となり、スケジュール通信への適用のみならず、アプリケーション上重要となる高精度タイムスタンプとしての利用なども可能となる。しかしながら、その一方で、電波時計の同期精度は数十msと低いため、その適用範囲をよく見極める必要がある。これに向けては、センサネットワーク用に開発されている各種時刻同期プロトコルとの公平な比較を行い、特に数的な面でのスケラビリティにおいてその優位性を示していく必要がある。

また、本稿ではルーティングやスケジューリングがあらかじめ静的に決定されている状態を前提に通信の基礎部分を設計した。しかしながら、バッテリーレス無線センサネットワークはバッテリー交換を意識せずに膨大な数のノードを使用できることが一つの大きな利点である。この利点を活かすためには、ルーティングやスケジューリングを含め、ノードを配置するだけで自律的にネットワークが構成されることが望ましい。現在、これに向けてマルチホップのスケジュール通信をベースにした、通信機構の設計と実装を進めている段階である。

文 献

- [1] 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, San Diego, CA, USA, June 2005.
- [2] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, T. Aoyama, "Solar Biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System", 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQous), Boston, U.S.A., August 2004. (Demo Presentation)
- [3] 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, Nov. 2004.
- [4] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for wireless Sensor Networks", Proceedings of the IEEE Infocom, 2002.
- [5] Zigbee Alliance, <http://www.zigbee.org/en/>.
- [6] W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks", Proceedings of ACM/IEEE MOBIKOM'99, 1999.
- [7] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", IEEE HICSS. 2000.
- [8] S. Ganeriwal, R. Kumar, M. B. Srivastava, "Timing-sync Protocol for Sensor Networks", Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 2002.
- [9] J. E. Elson, Time Synchronization in Wireless Sensor Networks. Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles 2003.
- [10] 一圓 真澄, 竹内 隆, 三上 真司, 川口 博, 太田 能, 吉本 雅彦, "センサネットワークのための長波帯標準電波時刻同期を用いた周期起動型 MAC の提案", 電子情報通信学会技術研究報告, NS2006-8, pp. 29-32, 2006.
- [11] 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", 信学会総合大会, B-15-39, March 2004.
- [12] S. Saruwatari, T. Kashima, M. Minami, H. Morikawa, T. Aoyama, "PAVENET: A Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks", Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers, vol. E-S-1, no. 1, pp. 74-84, 2005.