

センサネットワークのための 同期型センサ情報収集機構の実装と評価

檜原俊太郎 若宮 直紀 村田 正幸

大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: {s-kasihr, wakamiya, murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 数百、数千の電源容量の限られたセンサ端末の獲得した環境の情報を収集するためには、電力効率のよいセンサ情報収集機構が必要である。また、電力の枯渇によるセンサ端末の停止、センサ端末の追加や移動に対しても柔軟に対応することが望まれる。我々の研究グループでは、多様に変化するセンサネットワークのための効率的なセンサ情報収集機構として、同期型センサ情報収集機構を提案している。しかしながら、その有効性は理想的な環境を想定したシミュレーションによって評価されており、実システムへの適用や、実用性の検証は不十分である。そこで、本稿では、シミュレーションでは考慮されていない、電波の反射など、環境の無線通信に与える影響や無線通信の不安定性といった、実環境における問題を解決するための手法を提案し、市販の無線センサ端末 MOTE を用いた実証実験によって、同期型センサ情報収集機構が、効率的なセンサ情報収集が行えることを示した。

Implementation and Evaluation of Synchronization-based Data Gathering Scheme in Sensor Networks

Shuntaro KASHIHARA , Naoki WAKAMIYA , and Masayuki MURATA

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: {s-kasihr, wakamiya, murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract By deploying hundreds or thousands of sensor nodes, one can remotely obtain information of a region apart. Since sensor nodes operate on limited power supply, an energy-efficient data gathering scheme is needed to prolong the lifetime of a sensor network. We have proposed a novel scheme for periodic data gathering. However, proposed scheme was evaluated through simulation experiments assuming ideal environments. In this paper, to verify the practicality and viability of proposed scheme we implemented the scheme by using commercial and off-the-shelf wireless sensor unit MOTE. We also proposed mechanisms to solve problems, regarding unstableness of radio communications. Through experiments, we confirmed that the energy-efficient data gathering was attained by using our proposed scheme with several improvements. Synchronizated data gathering could be accomplished and kept under unstable and dynamically changing conditions.

1. はじめに

無線通信能力を備えたセンサ端末を多数配置してネットワークを構成することにより、遠隔地や広域を監視、観測、制御する無線センサネットワーク技術が多くの研究者、開発者の注目を集めている [1]。個々のセンサ端末は、温度、湿度、動きなどを測定するためのセンサ、限られた計算能

力、メモリ、無線送受信機を有し、多くの場合電池で動作する。センサ端末の獲得したセンサ情報は、無線通信により直接、間接的に基地局に集められ、基地局上で、あるいはインターネットを介して転送され、アプリケーションや利用者に提供される (図 1)。

環境内に配置されたセンサ端末は電池の入れ替えが困難

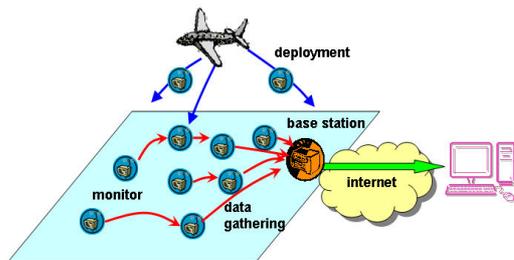


図 1 センサネットワーク

なため、センサネットワークによる長期間の観測のためには、電力効率のよいセンサ情報収集機構が必要である。また、電力の枯渇によるセンサ端末の停止やセンサ端末の追加、移動に際しても手動による再調整を必要とせず、センサ情報の収集を継続できることが求められる。多数のセンサ端末が無作為に配置されることを考慮すると、集中型の制御は現実的ではない。センサネットワークにおける情報収集のため LEACH [2], chain-based protocol [3], CMLDA [4] など様々な機構が提案されているが、いずれの提案においてもセンサネットワークのトポロジ全体の情報が必要になる、センサ端末の事前設定が必要である、などの問題があり、センサ端末数や観測領域などセンサネットワークの規模の拡大への拡張性、センサ端末の停止、移動、追加といった動的な変化への適応性に欠いている。

我々の研究グループでは、多様に变化するセンサネットワークにおいて、定期的なセンサ情報収集のための電力効率のよい同期型センサ情報収集機構を提案している [5]。この同期型センサ情報収集機構は、電源容量の限られた多数のセンサ端末の配置されたセンサネットワークから、望む周期で定期的にセンサ情報を収集するようなアプリケーションへの適用を対象としている。提案機構は、センサ端末数や領域の広さへの拡張性、センサ端末の故障の影響を受けない耐障害性、センサ端末の停止、追加、移動に対する適応性、情報収集頻度に対する柔軟性を有し、完全に分散型である。

電力消費をおさえるためには、センサ情報送受信の頻度を少なくすること、情報転送に関わらないセンサ端末が無線送受信機の電源を切ること、および送受信する情報量を削減することなどが有効である。そのため、センサ端末が同期したタイミングでセンサネットワークの周縁部から順にセンサ情報を送信していく同期型のセンサ情報収集を行う。例えば、図 2 のようなセンサネットワークにおいては、センサ情報収集の周期にあわせて、まず、周辺部にあるセンサ端末 (図中、黒丸) が同じタイミングでセンサ情報を発信する。これを受けたより基地局に近いセンサ端末 (白丸) は、自らのセンサ情報と、受信したセンサ情報を集約して情報量を小さくし、互いに同期して、より基地局に近いセンサ端末 (灰丸) へとセンサ情報を伝える。なお、図中、四角は基地局を、また、破線で描かれたそれぞれの円

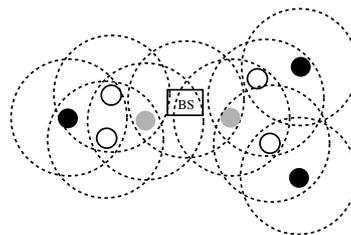


図 2 同期型センサ情報収集

はセンサ端末や基地局の発信する無線電波の伝播領域を表す。同期型センサ情報収集機構では、パルス結合振動子モデル [6-9] をセンサネットワークに適用することで、センサ端末間の相互作用によって同期を確立し、効率のよいセンサ情報収集を実現している。このような同期と情報集約を利用した情報収集により、センサネットワークの長寿命化を図ることができる。

しかしながら、提案手法の有効性は理想的な環境を想定したシミュレーションによって評価されており、電波の反射などが無線通信に与える影響や、パケットの衝突など輻輳による送信遅延などが考慮されていない。本稿では、市販の無線センサ端末 MOTE [10] を用いた実システムへの実装、実証実験により、同期型センサ情報収集機構の実用性、有効性を検証し、また、受信回数や受信電波強度にもとづく不安定な通信のフィルタリング機能、輻輳によって遅延した刺激を無視する機能を提案することで、これらの問題を解決した。

以降、2. 章では我々の研究グループの提案する同期型センサ情報収集機構について述べる。3. 章では、提案機構の実証実験に用いた無線センサ端末 MOTE および実装方法について述べる。4. 章において、提案機構の有効性および実用性を評価し、さらに評価結果にもとづき実環境を考慮した提案機構の改良およびその有効性を評価する。最後に、5. 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 同期型センサ情報収集機構

我々の研究グループの提案する同期型センサ情報収集機構では、基地局からの距離に応じて、センサ端末が周縁部から同期したタイミングで順次センサ情報を発信することにより、効率的にセンサ情報を収集する。

センサ端末の基地局からの距離をレベルと呼ぶ。図 2 において、基地局の信号を直接受信できる灰丸で示されたセンサ端末はレベル 1、これらレベル 1 のセンサ端末の信号を受信することのできる白丸のセンサ端末はレベル 2 となる。図中、破線の円はそれぞれの中心に位置するセンサ端末の通信可能範囲を示す。センサ端末の無線送受信機の能力、あるいは電力消費をおさえるための送信電力の制御により、センサ端末の通信可能範囲は限られる。したがって、同期型センサ情報収集機構では、センサ端末が他のセンサ

端末の発信した情報を基地局へ中継する，マルチホップ通信が行われる．すなわち，それぞれのセンサ端末のレベルは基地局までのホップ数を表すこととなる．センサ情報が適切に基地局に伝えられるためには，センサ端末は自身より一つレベルの小さいセンサ端末の情報発信に先立ってセンサ情報を発信しなければならない．また，センサ端末が同期して情報を発信するため，MAC (Media Access Control) 層における電波の衝突が発生し，再送による通信の遅延が生じる可能性がある．そのため，例えば，時刻 t にセンサ情報を収集する場合，レベル 1 のセンサ端末は MAC 層の衝突を考慮した十分大きい時間 δ だけ早く，すなわち，時刻 $t - \delta$ にセンサ情報を発信しなければならない．さらに，レベル 2 のセンサ端末はレベル 1 のセンサ端末の情報発信に先立ち，時刻 $t - 2\delta$ にセンサ情報を発信することになる．

同じレベルのセンサ端末が適切なタイミングでセンサ情報を発信するためには，互いに直接通信できないセンサ端末が同期を確立しなければならない．そのため，同期型センサ情報収集機構では，パルス結合振動子モデルを利用することにより同期を達成する．なお，基地局は近隣のセンサを同期させるために情報収集周期にしたがってビーコン信号を発する． N 個のセンサ端末を $\mathbf{S} = \{S_1, \dots, S_N\}$ と表す．センサ端末 S_i はレベル l_i に属する．初期状態ではレベル l_i は無限大もしくは十分に大きな値である．センサ端末はタイマと状態 x_i を持つ．状態 s_i はタイマの位相 ϕ_i の単調増加関数 $f_i: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ で与えられる．例えば本稿では f_i として次式を用いる [6] [8] ．

$$\forall i, f_i(\phi_i) = \frac{1}{b} \ln[1 + (e^b - 1)\phi_i] \quad (1)$$

$b > 0$ は同期の早さを左右するパラメータの一つであり， b が大きくなるにつれて，状態遷移が早くなり，より早く同期が達成される [6] ．

時刻 t にセンサ端末 S_i がセンサ端末 S_j の信号を受信したとする．センサ端末 S_j のレベル l_j がセンサ端末 S_i のレベル l_i より小さい場合， S_i は刺激を受け，状態 x_i を以下のように変化させる．

$$x_i(t^+) = B(x_i(t) + \epsilon) \quad (2)$$

ただし，関数 $B(x)$ は以下で与えられる．

$$B(x) = \begin{cases} x, & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{if } x < 0 \\ 1, & \text{if } x > 1 \end{cases}$$

刺激により，状態 x_i が 1 になると，センサ端末 S_i の状態 x_i と位相 ϕ_i は 0 に戻る．

提案機構では，センサ端末 S_i のタイマは一つレベルの小さいセンサ端末 S_j ($l_j = l_i - 1$) の情報発信に同期する．したがって，先に述べたとおり，センサ端末 S_i は状態 x_i が 1 になるよりオフセット δ_i だけ早くセンサ情報

を発信しなければならない．センサ端末 S_i のオフセット δ_i はセンサネットワーク全体で共通の値を用いる，センサ端末自身が MAC 層における輻輳の度合にもとづいて設定する，あるいは，一つレベルの小さいセンサ端末がセンサ情報の受信状態から適切なオフセットを定めてセンサ端末 S_i に通知する，などにより定められる．オフセット δ_i を考慮した位相 ϕ'_i を次式で定義する．

$$\phi'_i = p(\phi_i, \delta_i) = \begin{cases} \phi_i + \delta_i, & \text{if } \phi_i + \delta_i \leq 1 \\ \phi_i + \delta_i - 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

オフセットを考慮した状態 x'_i は $f_i(\phi'_i)$ により与えられる．したがって， $x'_i = f_i(p(g_i(x_i(t^+)), \delta_i))$ となる．ここで， $g_i = f_i^{-1}$ である．状態 x'_i は状態 x_i よりオフセット δ_i だけ早く 1 に達するため，センサ端末 S_i は δ_i だけ早く情報を発信する．発信される情報には，センサ端末 S_i が自身のセンサにより獲得した情報を他のセンサ端末から受信した情報と集約したもの，レベル l_i が含まれる．なお，情報発信の消費電力は情報の大きさに比例するため，例えば複数の n ビットのセンサ情報を集約して，新たに n ビットのセンサ情報を生成し，これを送信するものとする [2] ．なお，センサ端末 S_i は時刻 t に刺激を受けると，MAC 層での輻輳により遅れて届いた信号によって再度刺激を受けることを避けるため，時刻 t から $t + \delta_i$ まで，信号による刺激を受けない．

センサ端末 S_i のレベルは，そのセンサ端末の受け取ることができるセンサ情報のレベルの最も小さいものを l_j とした場合， $l_i = l_j + 1$ である．基地局の発信するビーコン信号のレベルは 0 である．新しいセンサ端末が，より基地局より遠いセンサ端末のメッセージを受け取った場合には，自身のレベルを誤って決定してしまう．しかしながら，時間が経つにしたがって，より基地局に近いセンサ端末のメッセージを受信し，自分のレベルを正しく知ることができる．センサ端末 S_j が自身のレベルより一つ大きい場合 $l_j = l_i + 1$ には，センサ端末 S_i は，受信したセンサ情報を自身のセンサ情報と集約する．センサ端末は自身と同じかそれ以上のレベルのセンサ端末の信号には刺激を受けない．つまり，同じレベルにあるセンサ端末は，互いに通信することなく，より低いレベルのセンサ端末からの刺激を受けることによって同期を達成する．

3. 同期型センサ情報収集機構の実装

3.1 実装システムの概要

同期型センサ情報収集機構を複数のセンサ端末，一台の基地局，基地局を制御する一台のパーソナルコンピュータからなるシステムに実装した．センサ端末としては市販の無線センサ端末 MOTE を用いた．MOTE [10] は U. C. Berkeley 大学の NEST (Network Embedded Systems Technology) プロジェクトによって開発されたセンサネットワーク構築用のセンサ端末である．単三電池 2 本で駆動

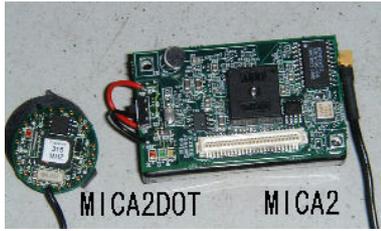


図 3 MOTE 端末

表 1 MOTE の仕様

CPU	ATmega128 7.4MHz
プログラムメモリ	128KB
RAM	4KB
フラッシュメモリ	512KB
無線周波数/型式	315MHz/FSK
MAC プロトコル	CSMA/CA
電波到達距離	5 ~ 150m
センサ (MICA 型)	音, 光, 温度, 加速度, 磁気
センサ (DOT 型)	温度
電源	DC3V
電流 (sleep)	15 μ A
電流 (受信)	1.8mA
電流 (送信)	12mA

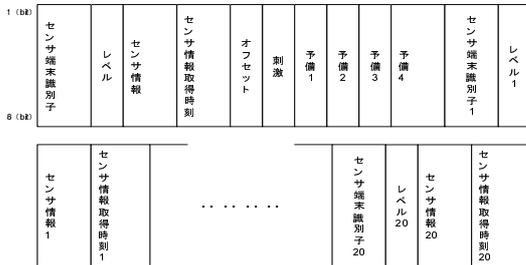


図 4 パケットのフォーマット

する名刺大の MICA2 と、ボタン電池で駆動する五百円玉大の MICA2DOT の 2 種類のセンサ端末がある (図 3) . センサ端末には専用のボードによってプログラムを書き込むことができる . 表 1 は MOTE の主な仕様である .

センサ端末は同期型センサ情報収集機構にもとづき、周囲のセンサ端末もしくは基地局の発信する情報に刺激を受け、センサ情報を繰り返し適切なタイミングで送信する . 基地局は、制御用コンピュータから RS-232C ポートを通じて送られてきた命令からセンサ情報収集周期を定め、周囲に定期的にビーコン信号を発信する . また、センサ端末からのセンサ情報を受信し、制御用コンピュータに転送する . 制御用コンピュータは、RS-232C ポートを通じて基地局から転送されてきたセンサ情報を解析し、送信元センサ端末の識別子とレベル、センサ情報の発信時刻を記録する . また、RS-232C ポートを通じて基地局にセンサ情報収集の周期を変更する命令を送る .

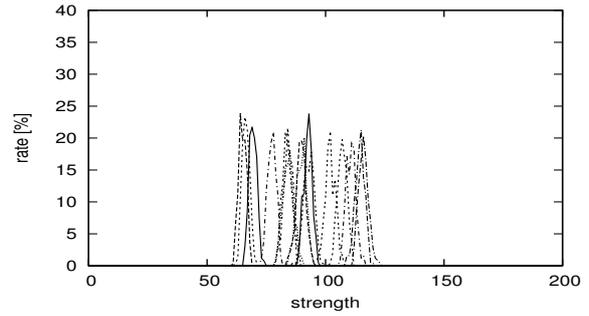


図 5 センサ端末ごとの受信電波強度の違い

3.2 MOTE へのセンサ情報収集機構の実装

MOTE は内部に 1 ミリ秒単位で動作する時計を持っている . 例えば、本稿における実験では、プログラム内で、この時計の 0.1 秒ごとに位相 ϕ_i を 0.01 ずつ変位させることで、10 秒周期のタイマを実現している . タイマの変位後に、式 (1) により状態 x_i を求める . さらにオフセットを考慮した位相 ϕ'_i から、状態 x'_i を得る . 状態 x_i が 1 に到達すると、位相 ϕ_i と状態 x_i を 0 に戻す .

また、オフセットを考慮した状態 x'_i が 1 に到達すると、センサ情報を取得し、それまでに受信した他のセンサ端末からのセンサ情報とともにパケットを構成して発信した後、オフセットを考慮した位相 ϕ'_i と状態 x'_i を 0 に戻す . センサ端末の発信するパケットのフォーマットを 4 に示す . パケットはパケットを送信したセンサ端末に関する 72 bit の情報と、動作検証用の予備の 40 bit、下位のレベルから受信した 20 個のセンサ情報 1120 bit の計 1232 bit で構成される . なお、我々の研究グループの提案する同期型センサ情報収集機構では、2. 章で述べたとおり、情報送信の電力消費をおさえるため、複数のセンサ情報を効率よくとりまとめ、ひとつ分の大きさにして送信する . 本稿では、センサ情報がどのセンサ端末を経由してどのように集められているかなど、詳細な動作検証を行うため、センサ端末は、周期内にレベルが一つ大きいセンサ端末から受信した全てのセンサ情報をメモリに蓄積し、センサ情報として発信する . 基地局のビーコン信号にも同様のパケットフォーマットを用いる . ただし、レベルは 0 とする .

送信電力を最も低い -20 dBm に設定した場合の MOTE の通信可能距離は 5~10 m である . 4 ホップ程度のセンサネットワークでは、最大直径 80 m の空間が必要になり、また全てのセンサ端末の状況の把握が難しいため、受信した電波の強度が一定以下のものを無視することで、通信距離を擬似的に小さくした . しかしながら、送信電力と電波の到達距離には、センサ端末による個体差や反射の影響などによるばらつきがある . 図 5 は基地局から 1 m 離れた同じ場所で、異なるセンサ端末から送信電力 -20 dBm でそれぞれ 300 回信号を送った際の、基地局における受信電波強度を横軸に、その割合を縦軸にセンサ端末ごとに示した図である . なお、受信電波強度は値が小さいほど大きい .

図より同じ送信電力でも、受信電波強度がセンサ端末間で 61 から 123 まで大きくばらついていることがわかる。また、同じセンサ端末でも設置環境により受信電波強度は一定でない。センサ端末間の干渉、壁面による電波の反射の影響などに関する様々な評価実験の結果、受信電波強度が 120 以上の弱い電波を無視することとし、通信可能距離を 1.0~1.6 m 程度に制御した。

MOTE によるセンサ端末の電波受信時の具体的な動作は次のようになる。センサ端末は電波を受信すると、まず、受信電波強度を調べ、電波強度が 120 以上のものはこれを無視する。次に、受信したパケットから情報を発信したセンサ端末のレベルを調べ、自らのレベルより 2 以上小さい場合、レベルを調整するとともに刺激をうけ、状態をパケットに書かれた ϵ だけ変化させる。タイマの位相も同時に変化する。オフセットを考慮した刺激により状態が 1 になった場合にはセンサ情報を最小の送信電力で発信する。自らのレベルより 1 レベルの小さいセンサ端末からの受信であった場合には、刺激を受け、オフセットを考慮した状態が 1 になった場合にはセンサ情報を発信する。自らのレベルより 1 大きいセンサ端末からの電波であった場合には、受信時刻やセンサ情報などをメモリに最大 20 個格納する。センサ情報が 20 個を超えた場合は、21 個目以降のセンサ情報は棄却される。

センサ端末は、タイマの位相が 1 付近で同じレベルのセンサ端末から連続 10 回刺激を受けると、同期が確立されたと判断し、スリープモードに移行する。スリープモードでは、タイマの位相が 0 から $1 - 2\delta$ の間は、MOTE の機能を利用して、無線送受信機の電源を切る。

4. 実装システムの実験評価と同期型センサ情報収集機構の改良

4.1 評価環境

提案手法では、無線通信は対称的であり、センサ端末はその通信範囲内のセンサ端末と相互に情報の送受信が可能であることを仮定している。しかしながら、実環境においては、壁や天井、障害物などで電波が反射、妨害されるため、通信が非対称となる場合がある。そこで本稿では、同期型センサ情報収集機構の基本動作を検証するため、電波の反射の影響を避け、障害物が少なく人通りのない屋上(図 6)で実験を行った。

また、結果の考察を単純化するため、図 7 に示すように、基地局(図中 BS)を中心とした同心円状にセンサ端末を配置した。いずれのセンサ端末も温度センサを有し、センサ情報送信のタイミングに観測を行う。3.2 節で述べたように情報の受信として認識する受信電波強度を調整することにより、基地局およびセンサ端末の情報発信の到達半径が 1.0~1.6m になるようにした。円周の半径は 1.0m, 2.0m, 3.0m と 1.0m ごとに設定した。ただし、送信電力設定などが同じでもセンサ端末の個体差、設置場所の影響、さら



図 6 実験環境

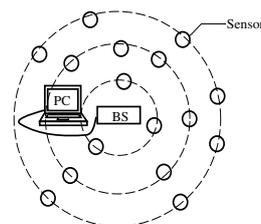


図 7 実験システムにおけるセンサ端末配置

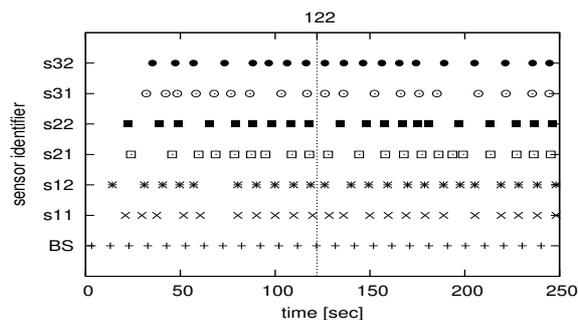


図 8 提案機構におけるセンサ端末の情報発信のタイミング

には他のセンサ端末による干渉のため、電波の到達距離が変化する。そのため、センサ端末の配置場所を円周の内側や外側に 10cm 程度ずらすなど、センサネットワークの構築に参加しやすいように一部調整を施した。

実験に使用しているラップトップコンピュータのバッテリーの容量を考慮し、1 回の実験でできるだけ多くの回数 of 情報収集が行えるよう、センサ端末のタイマ周期は 10 秒とした。基地局は 10 秒ごとにビーコン信号を発信する。位相と状態の関数 f_i は全てのセンサ端末に共通とし、式(1)で与えた。ただし、 $b = 3.0$ 、刺激 ϵ は 0.3、オフセット δ_i は全て 0.2 とした [5]。したがって、内側から n 番目の円周上のセンサ端末は、基地局のビーコン信号より $0.2n$ 、すなわち $2n$ 秒だけ早くセンサ情報を発信することになる。全てのセンサ端末がその位置に応じたタイミングで情報発信を行ったとき、センサネットワーク全体で同期がとれたとみなす。

4.2 実装システムによるセンサ情報収集の評価

提案機構を用いて実験を行った結果を図 8 に示す。図にはそれぞれのセンサ端末がセンサ情報を発信した時刻を示

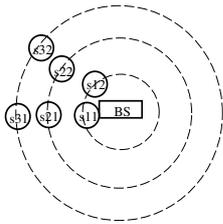


図 9 提案機構の評価実験におけるセンサ端末配置

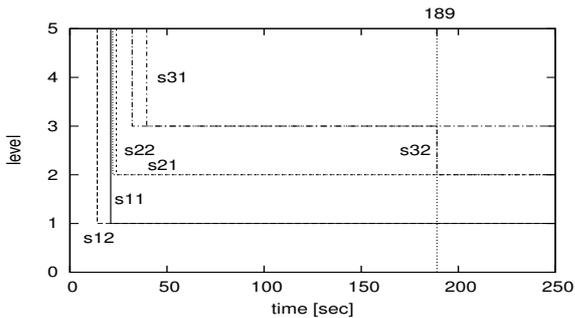


図 10 提案機構におけるセンサ端末のレベルの変化の様子

している．なお、見やすさのため、図 9 のように本節での実験は 6 台のセンサ端末で行った．センサ端末識別子の 10 の位はセンサ端末が内側から何番目の円周上に配置されているかを示し、1 の位はその円周上でセンサ端末を区別する番号である．時刻 122 秒でセンサネットワーク全体の同期が確立している．すなわち、センサ端末 s11、センサ端末 s12 はレベル 1 でピーコン信号より約 2 秒早く、センサ端末 s21、センサ端末 s22 はレベル 2 で約 4 秒早く、さらに、センサ端末 s31、センサ端末 s32 はレベル 3 で約 6 秒早くセンサ情報を発信している．しかしながら、その後すぐに同期が失われている．これは、提案機構で考慮されていない、無線通信の衝突によるものである．例えば、レベル i のセンサ端末 S_i が、レベル j のセンサ端末 S_j と同期していたとする．したがってセンサ端末 S_j からの信号は、センサ端末 S_i の状態が 1 のときに到達しなければならない．無線通信の衝突により、センサ端末 S_j からの信号が 0.01 だけ遅れて到達した場合、すでにセンサ端末 S_i の位相は 0.01 となっているため、刺激を受けて状態が変化してしまい、同期が崩れる．

センサ端末のレベル調整の様子を図 10 に示す．図よりセンサ端末の動作開始時はレベルが非常に大きな値に設定されているが、他のセンサ端末のセンサ情報を受信することにより、適切なレベルに調整されていることがわかる．しかしながら、時刻 189 秒でセンサ端末 s32 のレベルが 2 になっている．これは、提案手法では考慮されていない、電波の不安定さによるものである．本実験では受信電波強度に閾値を定めることにより、通信距離に制限を設けている．しかしながら、その制限は必ずしも完全なものでなく、

電波状態によっては、あるセンサ端末の発した情報が非常に遠くまで届いてしまうことがある．センサ端末 s32 は、たまたま到達したレベル 1 のセンサ端末の信号により、レベルを 2 に変更している．周囲にはセンサ端末 s32 と同じかそれ以上のレベルのセンサ端末しかなく、また、レベル 1 のセンサ端末の信号は以降届かなかったため、センサ端末 s32 は刺激を受けることなく、同期を確立することができていない．さらに、センサ端末 s32 の発した電波はレベル 1 のセンサ端末に届かないため、センサ端末 s32 のセンサ情報も収集できていない．本実験ではセンサ端末 s32 ともう一つのレベル 3 のセンサ端末 s31 は無線通信により影響を受けない距離だけ離れており、また、センサ端末 s32 に同期するレベル 4 のセンサ端末もないため、センサ端末 s32 が誤ったレベルを選んだことによる周囲への影響は観測されていない．しかしながら、センサ端末 s32 の周囲にレベル 3 のセンサ端末があった場合、そのセンサ端末は、センサ端末 s32 の不適切なタイミングのセンサ情報の発信に、刺激を受け、同期がくずれることになる．また、センサ端末 s32 の周囲にレベル 4 のセンサ端末があった場合、センサ端末 s32 がレベル 2 になることにより、レベル 4 のセンサ端末もレベル 3 となり、同じくセンサ情報が収集できなくなる、同期がくずれるなどの影響が生じる．

4.3 実環境を考慮した同期型センサ情報収集機構の改良

4.2 節で明らかにしたとおり、実環境では、無線通信の特性により、提案機構がうまく動作しない場合がある．本節では、同期型センサ情報収集の達成のため、提案機構に改良を加える．

実環境においてはパケットの衝突による再送や、衝突回避のため、無線通信の遅延が生じる．そこで本稿では、同期型センサ情報収集機構に新たな機能を追加する．センサ端末は、遅延した信号の刺激を受けないよう、状態が 1 から 0 に戻った後、しばらくの間、自らより 1 つ小さいレベルのセンサ端末からの信号を無視する．本稿における実験では、CSMA/CA におけるランダムな送信延期が最大 0.26 秒であったことや再送時間を考慮して、この期間を 0.6 秒とした．

また、実環境においては障害物によって電波が反射するため、反射の存在しない理想的な環境では電波が届かないセンサ端末のセンサ情報を、反射の存在する環境では、受信してしまうセンサ端末があらわれる．しかしながら、このようなセンサ情報は常に届くとは限らず、通信は非対称になりやすい．偶発的な刺激を受けたセンサ端末は、レベルやタイマを誤って設定するため、センサ情報を基地局まで届けることができなくなる．そこで本稿では、受信頻度や受信電波強度でのフィルタリングにより、不安定な通信の刺激を受けないようにした．具体的には、受信頻度によるフィルタリングでは、センサ端末の状態が 3 回 1 になる間に 2 回以上受信したセンサ情報からのみ刺激を受けるこ

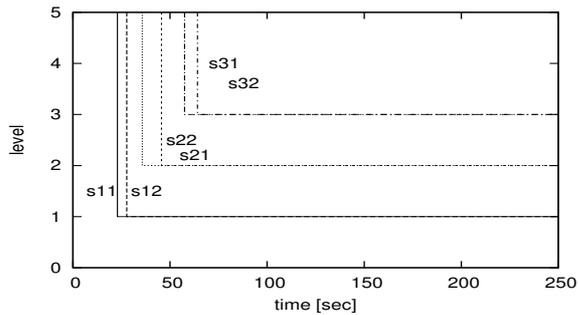


図 11 改良機構におけるセンサ端末のレベルの変化の様子

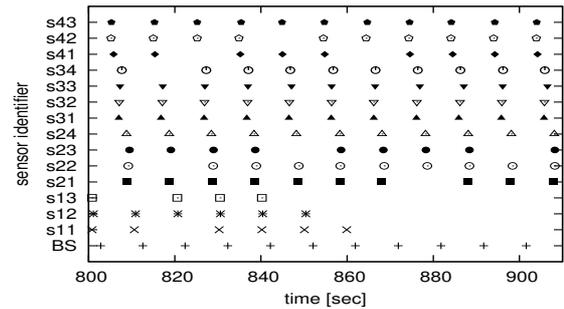


図 13 センサ端末除去後のセンサ端末の情報発信のタイミング

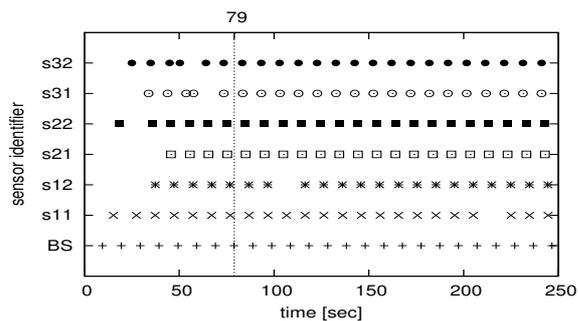


図 12 改良機構におけるセンサ端末の情報発信のタイミング

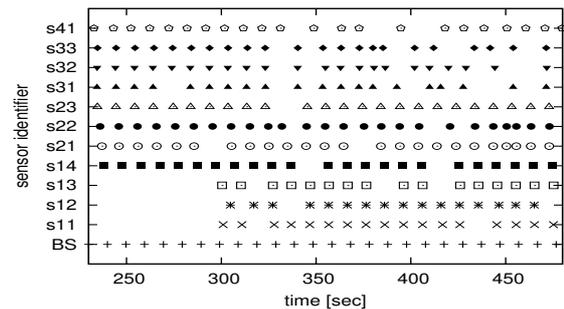


図 14 センサ端末追加後のセンサ端末の情報発信のタイミング

ととする．また，受信電波強度によるフィルタリングでは，受信電波強度が 100 以上の弱い信号からの刺激を受けないこととした．これらの閾値は同期にかかる時間と通信の不安定さによって決定される．したがって，レベルが 2 以上小さいセンサ端末からのセンサ情報を受信した場合，まず，受信電波強度が 100 以上のものを除外する．次に受信したセンサ情報のレベルを記録する．すでに同じレベルが記録されていた場合には，刺激を受ける．なお，記録したレベルはセンサ端末の状態が 3 回 1 になると初期化される．

4.4 改良システムの実験評価

4.4.1 基本動作の検証

改良手法を実装したシステムにおける実験結果を図 11 および図 12 に示す．なお，以降の実験およびグラフでは，16 台のセンサ端末を用いたが，センサ端末の不具合や設置位置によって情報が収集されていないものについては除外した．図 11 にセンサ端末のレベルの変化の様子を示す．2 回以上の刺激を受けることによりレベルを変化させるため，フィルタ追加前と比較して，レベルの調整に時間がかかっているが，正しくレベルを認識している．また，図 12 より，時刻 79 秒のビーコン信号より，センサ端末 s11, s12 は約 2 秒早く，センサ端末 s21, s22 は約 4 秒早く，センサ端末 s31, s32 は約 6 秒早くセンサ情報を発信しており，センサネットワーク全体が同期している．無線通信の輻輳によって遅延したセンサ情報を無視するとともに，安定した通信でのセンサ情報によってのみ刺激を受けることにより，同期が保たれている．

4.4.2 センサ端末の動的な追加と削除

図 13 にセンサ端末 s11 から s13 がレベル 1，センサ端末 s21 から s24 がレベル 2，センサ端末 s31 から s34 がレベル 3，センサ端末 s41 から s43 がレベル 4 の状態でセンサネットワーク全体の同期が確立された後，時刻 845 秒にセンサ端末 s13，855 秒にセンサ端末 s12，865 秒にセンサ端末 s11 を削除した時の様子を示す．レベル 1 のセンサ端末が取り除かれることにより，基地局からのビーコン信号が届かなくなるが，全体の同期は維持されている．

一方，図 14 にセンサ端末 s14 がレベル 1，センサ端末 s21 から s23 がレベル 2，センサ端末 s31 から s33 がレベル 3，センサ端末 s41 がレベル 4 の状態でセンサネットワーク全体が同期した後に，時刻 300 秒にセンサ端末 s11 から s13 の 3 台のセンサ端末を一番内側の円周上に追加した結果を示す．新たに導入されたセンサ端末のレベルは，受信頻度によるフィルタのために 2 度のビーコン信号によって適切にレベル 1 に調整される．しかしながら，タイマの同期までには時間がかかるため，周囲のレベル 2 のセンサ端末は新しいセンサ端末による誤ったタイミングの刺激を受ける．刺激により，レベル 2 のセンサ端末の同期が乱れ，さらにより大きいレベルのセンサ端末へ誤った刺激が伝播していく．その結果，センサネットワーク全体の同期が崩れる．センサ端末 s11 から s13 がビーコン信号を繰り返し受信し，タイマの同期が確立されると，センサ端末 s21 から s41 は次第に適切なタイミングで刺激を受けるようになり，時刻 470 秒でセンサネットワーク全体の同期が再度確立されている．

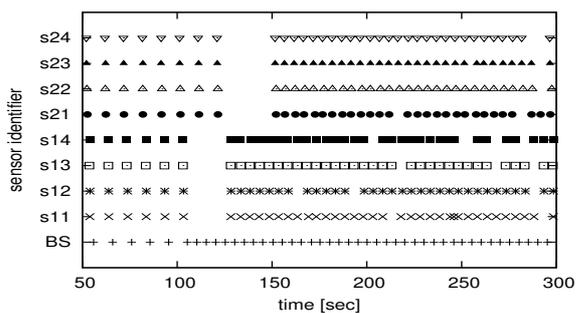


図 15 情報収集頻度の変更

4.4.3 センサ情報収集頻度の変更

センサ情報収集頻度に対する柔軟性を検証するための実験を行った。センサ端末 s11 から s14 がレベル 1，センサ端末 s21 から s24 がレベル 2 で全体が同期した後，ビーコン信号の発信周期を半分にした。実験結果を図 15 に示す。図より，いったんセンサ情報の収集が途切れるが，新たな周期でのセンサ端末間の刺激により，時刻 155 秒において倍の頻度でのセンサ情報収集が達成されていることが分かる。

5. おわりに

本稿では，我々の研究グループの提案する同期型センサ情報収集機構の実環境における有効性，実用性を検証するため，市販の無線センサ端末 MOTE への実装と実証実験を行った。その結果，提案機構では考慮されていなかった無線通信の輻輳による信号受信の遅延や，通信の不安定さのため，同期が容易に乱れることを明らかにした。本稿ではそれらの問題を解決するため，信号受信頻度と受信電波強度によるフィルタリング機構を提案し，実験により実環境において，同期型のセンサ情報収集が行えることを示した。本稿の機構は拡張性，適応性，柔軟性，対障害性にすぐれ，センサネットワークより効率よく定期的にセンサ情報を収集することができる。

本稿における実験は，電波の反射の比較的少ない場所で行われており，障害物が多く，電波環境の大きく変化する，屋内での実験評価は行っていない。電波の干渉，輻輳の発生しやすい環境では，不安定な無線通信や遅延により，本稿で提案した改良機構を用いても，良好なセンサ情報収集が達成できない可能性がある。そこで，そのような環境での実験を行い，同期型センサ情報収集機構のさらなる改良を行いたい。また，本稿では，センサ端末の追加や除去への適応性，センサ情報収集頻度への変化への柔軟性については実験により確認されたが，拡張性，対故障性や電力効率のよさについては検証されていない。今後はこれらについても実験評価を行いたい。

謝 辞

本研究の一部は，文部科学省 21 世紀 COE プログラム (研究拠点形成費補助金) および文部科学省科学研究費補助

金基盤研究 (A)(2)16200003 「メタ情報環境を実現するネットワーク技術の確立」によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks (Elsevier) journal*, vol. 38, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, pp. 3005–3014, Jan. 2000.
- [3] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. Sivalingam, "Data gathering in sensor networks using the energy*delay metric," in *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS-01)*, pp. 2001–2008, Apr. 2001.
- [4] K. Dasgupta, K. Kalpakis, and P. Namjoshi, "An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, pp. 16–20, Mar. 2003.
- [5] N. Wakamiya and M. Murata, "Scalable and robust scheme for data fusion in sensor networks," in *Proceedings of International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT)*, pp. 112–127, Jan. 2004.
- [6] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators," *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Applied Mathematics*, vol. 50, pp. 1645–1662, Dec. 1990.
- [7] X. Guardiola, A. Diaz-Guilera, M. Llas, and C. Perez, "Synchronization, diversity, and topology of networks of integrate and fire oscillators," *The American Physical Society Physical Review E*, vol. 62, pp. 5565–5569, Oct. 2000.
- [8] M. B. H. Rhouma and H. Frigui, "Self-organization of pulse-coupled oscillators with application to clustering," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 23, pp. 180–195, Feb. 2001.
- [9] I. Wokoma, I. Liabotis, O. Prnjat, L. Sacks, and I. Marshall, "A weakly coupled adaptive gossip protocol for application level active networks," in *Proceedings of IEEE 3rd International Workshop on Policies for Distributed System and Networks - Policy 2002*, pp. 244–247, June 2002.
- [10] "MOTE." available at URL: <http://www.xbow.com/Products/Wireless_Sensor_Networks.htm>.