

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

若宮 直紀[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{††} 大阪大学サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

E-mail: [†]wakamiya@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 環境内に配置された数十～数千個のセンサ端末の獲得した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といったセンサネットワークの変化に対しても柔軟に適應することが望まれる。本稿では、多様に变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を提案している。提案手法は、センサネットワークから定期的にセンサ情報を収集するアプリケーションを対象とする。そのため、センサ情報収集のタイミングにあわせて、センサネットワークの周縁部のセンサ端末から、同期をとりつつ、順次基地局へセンサ情報を転送していく。その結果、不要な送受信を避けるとともに、情報転送に関与しないセンサ端末が送受信機の電源を切り、情報集約により送受信する情報量を削減することにより、センサネットワークの長寿命化を図ることができる。シミュレーションによる評価の結果、提案手法を用いることにより、無作為かつ動的に配置されたセンサ端末が基地局からの距離に応じて同期をとって情報発信する、効率的な情報収集が実現できることを示した。

キーワード センサネットワーク、情報収集、同期、パルス結合振動子

Synchronization Scheme for Data Gathering in Sensor Networks

Naoki WAKAMIYA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

^{††} Cybermedia Center, Osaka University, 1-32 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

E-mail: [†]wakamiya@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract In wireless sensor networks, hundreds or thousands of microsensors are deployed in an uncontrolled way to monitor and gather information of environments. Sensor nodes have limited power, computational capacities, memory, and communication capability. In this paper, we propose a novel scheme for gathering sensor information where information periodically propagate from the edge of a sensor network to a base station as the propagation draws a concentric circle, without any centralized control. Observing radio signals emitted by sensor nodes in its vicinity, a sensor node independently determines the cycle and the timing that it emits sensor information in synchrony with others. For this purpose, we adopt a pulse-coupled oscillator model which comes from biological mutual synchronization such that in flashing fireflies, chirping crickets, and pacemaker cells. Through discussions based on some simulation experiments, we confirmed that our scheme can gather sensor information in a fully-distributed, self-organizing, robust, adaptable, scalable, and energy-efficient manner.

Key words sensor network, data gathering, synchronization, pulse-coupled oscillator

1. はじめに

無線通信機能を有するセンサ端末を多数配置して無線ネットワークを構成することにより、居住空間や工場などの監視や制御、農場など大規模領域の観測、物体の動き検出などを遠隔か

ら行うことのできる、無線センサネットワーク技術が注目を集めている [1]。個々のセンサ端末は、温度、湿度、動きなど観測対象の状態や振る舞いを測定するためのセンサ、限られた計算能力、メモリ、および無線送受信機を有し、多くの場合、電池で動作する。センサ端末で獲得されたセンサ情報は、センサ端

末間の無線通信により基地局に集められ、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。

環境内に配置された数十～数千個のセンサの獲得した情報を収集するためには、効率のよいセンサ情報収集機構が必要不可欠である。電池の入れ替えが困難で電源容量の限られるセンサ端末からなるセンサネットワークの長期間運用のためには、センサ情報の収集に消費される電力を低く抑えなければならず、また、電力の枯渇したセンサ端末の停止、センサ端末の追加、移動といったセンサネットワークの構成変化に対しても柔軟に適應することが望まれる。また、多数のセンサ端末が無作為に配置されるため、集中型の制御は現実的でない。センサネットワークにおけるセンサ情報収集のため、LEACH [2], chain-based protocol [3], CMLDA [4] など様々な機構が提案されているが、センサネットワーク全体のトポロジ情報が必要になるなど、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、センサの停止、移動、追加といった変化への適應性を欠く。

そこで、本稿では、多様に変化するセンサネットワークにおいて、効率的にセンサ情報を収集するための、同期型センサ情報収集機構を提案する。提案手法は、電源容量の限られたセンサが配置されたセンサネットワークから、例えば 1 時間に 1 回など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する。提案手法は、センサ端末数や領域の広さへの拡張性、センサ端末の停止、追加、移動に対する適應性、センサ端末の故障の影響を受けない耐障害性、情報収集頻度に関する柔軟性を有し、完全に分散型である。電力消費をおさえるためには、送受信の頻度を少なくするとともに、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で、および送受信する情報量を削減することが有効である。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 1 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、センサネットワークの周縁部に位置するセンサ端末 (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 (斜線の丸) 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。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、そのためには、集中型の制御なしに、個々のセンサ端末が、自らの判断にもとづいて情報発信の周期やタイミングを決定することにより、互いに直接通信できないセンサ端末が同期しなければならない。本稿では、そのような同期を達成するため、パルス結合振動子モデル (pulse-coupled oscillator model) にもとづく同期機構を提案する。パルス結合振動子モデルは、蛍の発光、こおろぎの鳴き声、心臓のペース

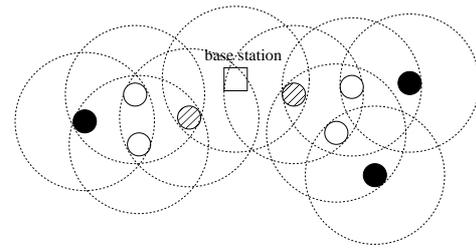


図 1 同期型センサ情報収集

メーカー細胞など、生物界にみられる、個体間の局所的な相互作用によって全体の同期を達成する機構をモデル化したものである [5]。振動子はそれぞれタイマによって定められる位相 (0~1) と、位相によって定められる状態 (0~1) にもとづいて動作する。振動子は、状態が 1 になると発火し、位相 0、状態 0 に戻る。発火した振動子と結合された振動子は刺激を受け、状態および位相が変化する。刺激を受けた結果、状態が 1 に達した振動子も同様に発火する。この時、これらの振動子は同期したとみなす。振動子の個数やそれぞれの初期位相、変位の周期によらず、繰り返し互いに刺激を与え合うことにより、全ての振動子が同期して発火ようになる。このようなパルス結合振動子モデルをネットワークや情報システムに応用する試みが数多くなされている [6]~[8]。例えば、オブジェクトのクラスタリングに適用した文献 [7] においては、互いに類似したオブジェクト同士ではより強い刺激を与え、類似の少ないオブジェクト間には負の刺激を与えることにより、似通ったオブジェクト同士のみが同期し、クラスタを形成するというクラスタリング手法を提案している。また、文献 [8] では、管理情報をネットワーク内に配布するための効率のよいプロトコルを提案している。

本稿で提案するセンサ情報収集機構では、センサ端末によるセンサ情報の発信を振動子の発火とみなす。センサ端末は、自身のタイマにもとづいてセンサ情報をブロードキャストする。センサ情報を受信したセンサ端末は、発信者がより基地局から遠い場合には、自身のセンサ情報と集約するが、発信者がより基地局に近い場合には、刺激を受け、状態を変化させる。繰り返し信号を受信し、刺激を受けることにより、センサ端末のタイマは、より基地局に近いセンサ端末の情報発信と同期ようになる。全てのセンサ端末が基地局からの距離に応じてタイマの同期を確立することにより、センサネットワーク全体でアプリケーションの望む周期での効率のよいセンサ情報収集が達成される。

以降、2 章ではパルス結合振動子モデルについて述べ、3 章で同期型センサ情報収集機構を提案する。4 章では、シミュレーションにより提案手法の有効性を評価し、最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. パルス結合振動子モデル

生物界では、集中型の制御なく、個の簡単な動作および個間の局所的な相互作用により、大局的な同期が達成されている。例えば、ある種の蛍は、それぞれ個で存在しているときは自身のタイマにもとづいて発光するが、周囲に蛍がいるときには、

他の蛍の発光を見てタイマを進める．このような簡単な相互干渉を通して，やがて群全体が同期して発光ようになる．パルス結合振動子モデル (pulse-coupled oscillator model) は，このような生物界における相互作用による同期メカニズムをモデル化したものである [7]．

それぞれ位相 $\phi_i \in [0, 1]$ および状態 $x_i \in [0, 1]$ を持つ N 個の振動子 $O = \{O_1, \dots, O_N\}$ を考える．状態 x_i は位相 ϕ_i の連続で単調増加な関数 f_i で与えられる．

$$x_i = f_i(\phi_i) \quad (1)$$

ただし， $f_i(0) = 0$ ， $f_i(1) = 1$ である．位相 ϕ_i は周期 T_i で 0 から 1 に遷移し，0 に戻る．ただし， $\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{1}{T_i}$ である．

状態 x_i が 1 に達すると，振動子 O_i は発火し，状態は 0 に戻る．この振動子と結合関係にある振動子 O_j は刺激を受け，状態が $\epsilon_i(\phi_j)$ だけ変化する．

$$x_j(t^+) = B(x_j(t) + \epsilon_i(\phi_j)) \quad (2)$$

ただし，関数 B は以下のように定義される．

$$B(x) = \begin{cases} x, & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{if } x < 0 \\ 1, & \text{if } x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

刺激を受けた振動子 O_j の位相 ϕ_j は， $\phi_j = f_j^{-1}(x_j)$ となる．刺激を受けることにより状態 x_j が 1 になると，振動子 O_j も同様に発火する．この時，振動子 O_i と O_j は同期したとみなす．

このような刺激を直接的，または間接的に与えあうことにより，全ての振動子が同期するようになる．また，異なる関数や周期を持つ振動子の集合においても同期が達成されることが示されている [6], [7]．

3. センサ端末の同期にもとづくセンサ情報収集

本稿で提案する同期型センサ情報収集機構では，アプリケーションの望む周期で，基地局より遠いセンサ端末から順に情報を発信し，順次センサ情報が集約されながら基地局へと転送されていく．

3.1 同期型センサ情報収集機構

センサ端末の基地局からの距離をレベルと呼ぶ．図 1 において，基地局の信号を直接受信することのできるセンサ端末 (図中，斜線の丸) 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センサ端末 (黒丸) はレベル 2 となる．同期型センサ情報収集機構においては，同じレベルに属するセンサ端末が同期してセンサ情報を発信する．センサ端末の持つ無線送信機は無指向性のため，情報は電波の伝播範囲にブロードキャストされる．センサ端末は，他のセンサ端末からのセンサ情報の受信を待つことなく，それぞれのセンサ端末自身の状態にもとづいてセンサ情報を発信する．そのため，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ブロードキャストするため，MAC 層における電波

の衝突が発生し，再送が繰り返される可能性がある．そのため，例えば，アプリケーションが時刻 t にセンサ情報を必要とした場合，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 $t - 2\delta$ にセンサ情報をブロードキャストすることになる．

N 個のセンサ端末 S_i からなるセンサネットワークを考える．センサ端末 S_i は，位相 $\phi_i \in [0, 1]$ ，状態 $x_i \in [0, 1]$ ，関数 f_i ，レベル $l_i > 1$ ，およびオフセット $\delta_i > 0$ を持つ．位相 ϕ_i は，タイマによって変位し，1 に達すると 0 に戻る．なお，センサネットワーク内の全てのセンサ端末のタイマ周期は必ずしも等しいとは限らない．状態 x_i は，位相 ϕ_i の連続で単調増加な関数 f_i によって， $x_i = f_i(\phi_i)$ と定められる．なお， $f_i(0) = 0$ ， $f_i(1) = 1$ である．例えば，本稿では， f_i として次式を用いる [5], [7]．

$$\forall i, f_i(\phi_i) = \frac{1}{b} \ln[1 + (e^b - 1)\phi_i] \quad (4)$$

ただし， $b > 0$ は同期の早さを左右するパラメータであり， b が大きいほど状態遷移が早くなり，より早く同期が達成される [5]．センサ端末のレベル l_i は十分大きな値に初期化されており，周囲のセンサ端末の発する信号を受信することにより適切に調整される．基地局は，アプリケーションの望むセンサ情報収集の周期に応じてビーコン信号をブロードキャストする．ビーコン信号は情報としてレベル 0 を広告する．

提案手法では，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ブロードキャスト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 を次式により定義する．

$$\phi'_i = p(\phi_i, \delta_i) = \begin{cases} \phi_i + \delta_i, & \text{if } \phi_i + \delta_i \leq 1 \\ \phi_i + \delta_i - 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

したがって，オフセットを考慮した状態 x'_i は $x'_i = f_i(\phi'_i)$ により与えられる．センサ端末 S_i は，状態 x'_i が 1 に達したとき，センサ情報をブロードキャストする．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]．

時刻 t に，センサ端末 S_i がセンサ端末 S_j の信号を受信したものとする．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 よりも小さいとき，レベル l_i を $l_j + 1$ に調整するとともに，刺激を受けて状態が変化する．

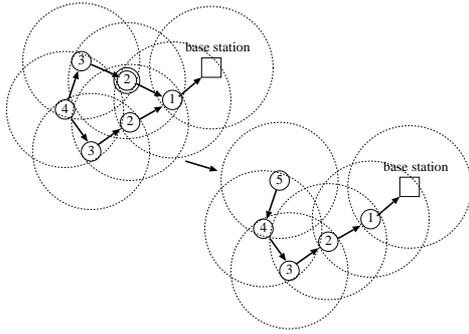


図2 センサ端末停止による情報収集経路の再構成

$$x_i(t^+) = B(x_i(t) + \epsilon). \quad (6)$$

オフセットを考慮した状態 x'_i は $x'_i = f_j(p(f_i^{-1}(x_i(t^+)), \delta_i))$ で与えられる．信号の受信により，状態 x'_i が 1 となった場合，センサ端末 S_i はセンサ情報を発信する．なお，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，センサ S_i は続く δ_i の間の信号を無視する．レベル l_j が自身のレベル l_i より一つ大きい場合 ($l_j = l_i + 1$) には，受信したセンサ情報を自身のセンサ情報と集約する．その他の場合には，センサ端末 S_i は受信した信号を無視する．

3.2 同期型情報収集機構の特徴

センサネットワーク運用開始時の動作は次のようになる．全てのセンサ端末はタイマの同期，情報発信の周期設定などの事前調整が施されることなく，無作為に観測対象領域に導入される．ただし，全てのセンサ端末のレベルは十分大きな値に初期化されているものとする．基地局は，アプリケーションや利用者の望む情報収集の周期，タイミングにあわせてビーコン信号をある範囲にブロードキャストする．ビーコン信号は，情報として，レベル 0 を伝達する．センサ端末 S_i は，センサを用いて周囲の環境を観測しメモリに蓄積する．その後，タイマの位相 ϕ_i によって定められる状態 x'_i にもとづいて，ブロードキャストにより，レベル l_i とともにメモリに蓄積したセンサ情報を発信する．また，必要に応じてメモリを初期化する．センサ端末 S_i は，他のセンサ端末，または基地局の信号を受信すると，まず，自身のレベル l_i と信号を発したセンサ端末のレベル l_j を比較する．自身のレベルの方が一つ小さい場合 ($l_i = l_j - 1$) には，メモリに蓄積されたセンサ情報と受信したセンサ情報を集約して再度メモリに蓄積する．自身のレベルの方が二つ以上小さい場合 ($l_i < l_j - 1$)，および同じ場合 ($l_i = l_j$) には，受信した信号を無視する．自身のレベルの方が大きい場合 ($l_i > l_j$) には，刺激を受ける．センサ端末 S_i は，レベルを調整する ($l_i = l_j + 1$) とともに，状態 x_i を変化させる．刺激を受けた結果，オフセット δ_i を考慮した状態 x'_i が 1 になるとセンサ端末 S_i は，メモリに蓄積したセンサ情報をレベル l_i とともに発信する．

稼働中のセンサネットワークに新たに導入されたセンサ端末は，センサにより環境の観測を開始する．周囲のセンサ端末のブロードキャストを繰り返し受信することにより，レベルが適切に設定され，また，レベルに応じてタイマの同期が確立される．同期が確立されるまでに，新しいセンサ端末のブロード

キャストをよりレベルの大きいセンサ端末が受信して刺激を受けることにより，同期のずれが伝播する可能性がある．しかしながら，新しいセンサ端末のタイマがよりレベルの小さいセンサ端末の情報発信との同期を確立し，適正なタイミングでセンサ情報をブロードキャストするようになると，再度全てのセンサ端末が正しい周期，タイミングで動作するようになる．

一方，電力の枯渇によりセンサ端末が停止した場合には，そのセンサ端末のみと同期していたセンサ端末の情報は収集されなくなる．センサ端末は，ブロードキャストを受信しなくなることにより全ての一つレベルの小さいセンサ端末の停止を検知すると，レベルを十分大きな値に初期化する．その結果，レベルとタイマが再調整され，新たな情報収集経路が確立される．例えば，図2の左上のセンサネットワークにおいて，二重丸で示されたセンサ端末が停止したとする．ただし，図中，それぞれの丸はセンサ端末を，丸の中の数字はセンサ端末のレベルを表す．また，破線の円はそれぞれのセンサ端末の信号が伝播する範囲を示し，矢印はセンサ情報が受信される向きを表す．センサ情報はブロードキャストにより発信されるため，センサネットワークの左端に位置するレベル4のセンサ端末のように，発信した情報が複数のセンサ端末により受信される場合もある．センサ端末の停止を検知した左上に位置するセンサ端末は，レベルを一旦初期化する．その後，レベル4のセンサ端末のブロードキャストを受信することにより，レベルを5に設定し，タイマの同期が確立され，新たな経路にしたがって情報が収集されるようになる．

センサ端末が移動した場合にも，同様にレベルを初期化することで，他のセンサ端末に大きな影響を与えることなく，移動先に応じた同期が確立される．

このように，提案手法では，個々のセンサ端末は自身の状態にしたがってセンサ情報を発信するとともに，周囲のセンサ端末のブロードキャストの受信により状態，レベルを変化させる，という簡単な機構により，集中型の制御なく，センサネットワーク全体の同期が確立される．また，同期のための特別なシグナリングを必要としない．したがって，提案手法は，センサ端末数などセンサネットワークの規模によらず，効率よくセンサ情報を収集することができる．

センサネットワークの長寿命化のためには，センサ端末が不要な機器の電源を切ることが有効である [9] ~ [11]．同期を確立するまでは，他のセンサ端末からの刺激を受けるため，センサ端末は受信機の電源を入れておかなければならない．しかしながら，本稿で提案する同期型情報収集機構においては，いったん同期が確立され，情報発信のタイミングが確定した後は，位相 ϕ_i が 0 から $1 - 2\delta$ の間は送受信機とも電源を切り，節電することができる．ただし，全てのセンサ端末が共通のオフセット δ を用いたものとする．位相 ϕ_i が $1 - 2\delta$ に達すると，センサ端末は受信機の電源を入れ，レベルが一つ大きいセンサ端末からのセンサ情報を受信する．位相 ϕ_i が $1 - \delta$ に達し，状態 x'_i が 1 になると，センサ端末は送信機の電源を入れ，センサ情報を発信する．その後，位相 $\phi_i = 1$ において，レベルが一つ小さいセンサのブロードキャストを受信し，同期を確定させた

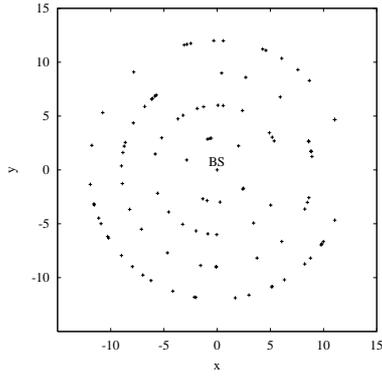


図3 シミュレーションにおけるセンサネットワークモデル

後、送受信機の電源を切る。ただし、位相 $\phi_i = 1$ においてブロードキャストを受信しなかった場合には、同期が失われたものと判断し、再度同期が確立されるまで受信機の電源を入れ続ける。このようにして、常に送受信機の電源を入れている場合と比較して、同期が確立している間は少なくとも 2δ だけ電力を節約することができる。したがって、提案手法を用いることにより電力効率のよいセンサ情報収集が達成され、センサネットワークの長寿命化を図ることができる。

提案手法では、センサ端末が故障した場合にも、継続してセンサネットワークからセンサ情報を収集できる。センサ端末がレベルの確定前に故障した場合には、そのセンサ端末の発信するレベルは周囲のセンサ端末のレベルよりも大きいいため、他に影響を与えることはない。ただし、レベルを適切に設定した後、に故障した場合には、周囲のセンサ端末の同期を妨げるため、センサ情報の発信を停止しなければならない。

4. シミュレーションによる評価

本稿では、結果の考察を簡単にするため、図3に示すような、基地局を中心とした同心円状に100個のセンサ端末をランダムに配置したセンサネットワークを対象に、シミュレーションによる評価を行った。基地局およびセンサ端末のブロードキャストの半径は全て等しく5とし、円周の半径は、内側より順に3, 6, 9と3の倍数で設定した。センサ端末は、最も内側より順に、 n 番目の円周に $10n$ 個ずつ配置した。

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(4)で与えた。ただし、 $b = 3.0$ とした[7]。刺激 ϵ は 0.3 [5]、オフセット δ_i は全て 0.2 とした。したがって、 n 番目の円周上のセンサ端末は、ビーコン信号より $0.2n$ だけ早く情報を発信することになる。全てのセンサ端末において、このような情報発信のタイミング設定が行えたとき、センサネットワーク全体で同期がとれたとみなす。

センサ端末の初期位相は0から1の間でランダムに与えた。ただし、本稿では、全てのタイマの周期は同じであるものとした。タイマの周期が異なる場合には、最も周期の短いタイマにもとづいて同期が達成されるため[5]、基地局は全てのタイマよりも短い周期でビーコン信号を発ししなければならない。

図4に、1~4番目の円周上に配置されたそれぞれ2個ずつのセンサ端末について、レベルの変化を示す。センサ端末の識

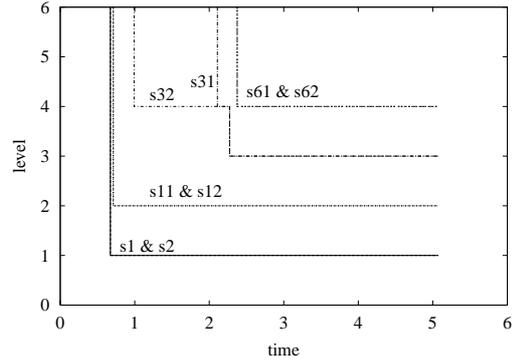


図4 センサ端末によるレベルの調整

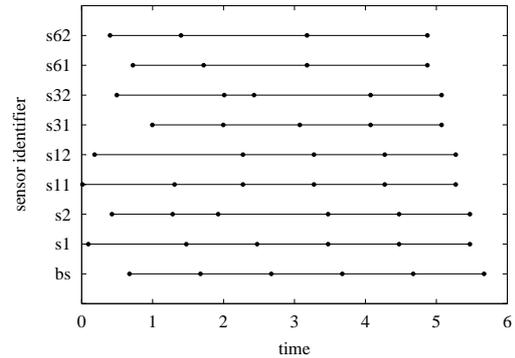


図5 センサ情報送信のタイミング

別子の小さいものから順に内側の円周に位置する。初期状態では、全てのセンサ端末のレベルは十分大きい値に設定されている。時刻 0.673 において、最も内側に位置するセンサ端末 $s1$ と $s2$ がビーコン信号を受信し、レベルを1に設定している。また、レベル1のセンサ端末のブロードキャストを受け、2番目の円周に位置するセンサ端末 $s11$, $s12$ は時刻 0.712 にレベルを2に設定している。3番目の円周上のセンサ端末 $s31$ と $s32$ は、当初、同じ円周上のセンサ端末のブロードキャストを受信し、レベルを4と判断しているが、後にレベル2のセンサ端末のブロードキャストを受信することで、正しくレベルを設定している。

図5に、センサネットワーク全体で同期が達成されるまでの、センサ端末によるブロードキャストのタイミングの変化を示す。線上のそれぞれの点は、センサ端末がセンサ情報をブロードキャストしている時刻を表す。なお、図中の bs は基地局を示し、各点はビーコン信号の発信の様子を表す。センサネットワークの稼働開始後しばらくは、それぞれのセンサ端末は自身のタイマにもとづいたばらばらなタイミングでセンサ情報を発信しているが、時間の経過とともに、ブロードキャストの受信により刺激を受け、同期が達成されている。それぞれの最右端の点から、まず、時刻 5.67 のベースステーションによるビーコン信号に対し、レベル1のセンサ端末 $s1$ および $s2$ がオフセットの 0.2 だけ早く時刻 5.47 にセンサ情報を送信していることがわかる。レベル2のセンサ端末 $s11$ および $s12$ は、センサ端末 $s1$ および $s2$ の情報発信に間に合うよう、時刻 5.27 に

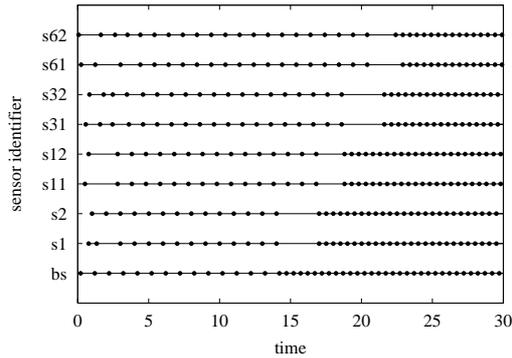


図 6 情報収集の周期変更

センサ情報をブロードキャストしている。同様に、レベル 3 のセンサ端末 s31 と s32 が時刻 5.07、レベル 4 のセンサ端末 s61 および s62 が時刻 4.87 にそれぞれセンサ情報を送信しており、センサ端末がレベルに応じて同期した適切なタイミングでセンサ情報を送信している。

なお、図には示さないが、センサ端末をセンサネットワークに順次追加、削除した場合にも同様に適切に同期が獲得、維持され、提案手法がセンサネットワークの変化に適応できることをシミュレーションにより確認した。

図 6 に、センサネットワーク稼働中に情報収集の周期を変更した場合の同期の様子を示す。提案手法では、ビーコン信号により、情報収集の周期やタイミングを制御することができる。時刻 6.41 においてセンサネットワーク全体で同期が確立された後、時刻 14.6 にビーコン信号の発信周期を半分にした。情報収集の周期変更は、センサ端末間の刺激により順次センサネットワーク全体に伝播し、時刻 22.9 において新たな周期での同期が確立されている。

ただし、周期変更に対応するためには、3.1 で述べたセンサ端末の同期機構に変更を加える必要がある。センサ端末 S_i のブロードキャストとセンサ端末 S_j のタイマが同期しているものとする。したがって、 $l_i = l_j - 1$ である。ビーコン信号の周期変更により、センサ端末 S_i がこれまでの半分の周期でセンサ情報を発信するようになったとする。センサ端末 S_i がブロードキャストした時、これを受信したセンサ端末 S_j の位相 ϕ_j は 0.5 から 1.0 に変位する。センサ端末 S_j は位相 $1 - \delta_j$ にセンサ情報をブロードキャストするため、オフセット δ_j が 0.5 より小さいと、刺激による位相の変位によりセンサ情報を発信できない。一方、オフセット δ_j が 0.5 より大きい場合には、情報発信のタイミングが 0.5 遅れてしまう。そこで、情報収集の周期変更後、複数回同期が確認されたときに、センサ端末 S_j はオフセットを $1 - \phi_j - \delta_j$ に変更する。周期が半分になった場合には、オフセットは $0.5 + \delta_j$ となり、センサ端末 S_j はセンサ端末 S_i の情報発信より δ_j だけ早くセンサ情報をブロードキャストするようになる。

5. ま と め

本稿では、無線センサネットワークにおける周期的なセンサ

情報の収集のための、同期型センサ情報収集機構を提案した。提案手法は、分散型で、電力効率がよく、拡張性、耐故障性、適応性、柔軟性がある。シミュレーションによる評価により、提案手法により適切に同期が確立され、効率のよい情報収集が行われていることを示した。

複数のセンサ端末の観測領域に重なりがある場合には、冗長なセンサ情報の収集を避け、センサ端末が交替で観測、ブロードキャストするのがよい。そのため、同じ領域を観測するセンサ端末をクラスタ化し、クラスタ内でセンサ端末が交替する機構について検討するなど、さらなる電力効率の向上によるセンサネットワークの長寿命化のための制御手法について検討する。

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) の研究助成によるものである。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*, **38**, 4, pp. 393–422 (2002).
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan: "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 3005–3014 (2000).
- [3] S. Lindsey, C. Raghavendra and K. Sivalingam: "Data gathering in sensor networks using the energy*delay metric", *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS-01)*, pp. 2001–2008 (2001).
- [4] K. Dasgupta, K. Kalpakis and P. Namjoshi: "An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks", *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 16–20 (2003).
- [5] R. E. Mirolo and S. H. Strogatz: "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators", *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Applied Mathematics*, **50**, 6, pp. 1645–1662 (1990).
- [6] X. Guardiola, A. Díaz-Guilera, M. Llas and C. Pérez: "Synchronization, diversity, and topology of networks of integrate and fire oscillators", *The America Physical Society Physical Review E*, **62**, 4, pp. 5565–5569 (2000).
- [7] M. B. H. Rhouma and H. Frigui: "Self-organization of pulse-coupled oscillators with application to clustering", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **23**, 2, pp. 180–195 (2001).
- [8] I. Wokoma, I. Liabotis, O. Prnjat, L. Sacks and I. Marshall: "A weakly coupled adaptive gossip protocol for application level active networks", *Proceedings of IEEE 3rd International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks (Policy 2002)*, pp. 244–247 (2002).
- [9] A. Sinha and A. Chandrakasan: "Dynamic power management in wireless sensor networks", *IEEE Design & Test of Computers*, **18**, 2, pp. 62–74 (2001).
- [10] J. Aslam, Q. Li and D. Rus: "Three power-aware routing algorithms for sensor networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 187–208 (2003).
- [11] C. Schurgers, V. Tsitsis, S. Ganeriwal and M. Srivastava: "Topology management for sensor networks: Exploiting latency and density", *Proceedings of Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc'02)*, pp. 135–145 (2002).