

センシング要求に適応的なセンサ情報収集機構

谷口 義明[†] 若宮 直紀[†] 村田 正幸[†] 福島 高司^{††}

[†] 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

^{††} 株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 生産システム研究所 〒 651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台 1-5-5

E-mail: [†]{y-tanigu,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}fukushima.takashi@kobelco.com

あらまし センサネットワークにおけるセンシングや情報収集の周期，頻度は，センシング対象の状態に応じて変化する．本稿では，複数のセンシング機能を有するセンサ端末からなるセンサネットワークを対象に，センシング要求に応じた柔軟な周期でのセンシングおよび情報収集を可能とするセンサ情報収集機構を提案する．提案手法では，センシング対象の状態に応じたセンシング周期および情報収集周期の制御に反応閾値モデルを，電力効率の良い情報収集およびスリープ制御のためにパルス結合振動子モデルを用いることにより，自律的かつ適応的な機構を実現する．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で，センシング要求の動的な変化に柔軟に対応した電力効率の良いセンサ情報収集を行えることを示す．

キーワード センサネットワーク，情報収集，適応的センシング，反応閾値モデル，進行波

A Traveling Wave-based Data Gathering Scheme Adaptive to Sensing Requirements for Wireless Sensor Networks

Yoshiaki TANIGUCHI[†], Naoki WAKAMIYA[†], Masayuki MURATA[†],
and Takashi FUKUSHIMA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

^{††} Production Systems Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.
1-5-5 Takatsukadai Nisi-ku, Kobe-shi, Hyogo 651-2271, Japan

E-mail: [†]{y-tanigu,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}fukushima.takashi@kobelco.com

Abstract In wireless sensor networks, frequency of sensing and data gathering depends on application requirements and dynamic surrounding condition. In this paper, we propose a data gathering scheme adaptive to sensing requirements for wireless sensor networks composed sensor nodes with multiple sensing capabilities. To accomplish self-organizing control, we adopt the response threshold model for adaptive sensing task engagement and the pulse-coupled oscillator model for energy efficient transmission and sleep scheduling. Through simulation experiments, we confirm that autonomous and energy-efficient data gathering can be accomplished satisfying dynamically changing sensing requirements.

Key words wireless sensor network, data gathering, adaptive sensing, response threshold model, traveling wave

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ネットワークを構成することにより，職住環境や工場などの監視情報，農場や河川など大規模領域の観測情報，生態観測情報などさまざまな情報を定期的，効率的に収集することのできる，無線センサネットワーク技術が注目を集めている [1, 2]．電源容量の限ら

れた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，省電力制御が不可欠であるが，周期的な情報収集を行うセンサネットワークアプリケーションでは，センシングや情報収集の周期にあわせて適切にセンサ端末がアクティブ状態とスリープ状態を遷移するスリープ制御が電力消費の抑制に効果的である [3-5]．我々の研究グループでは，これまでに，多数のセンサ端末が無作為に配置された環境において，全てのセンサ

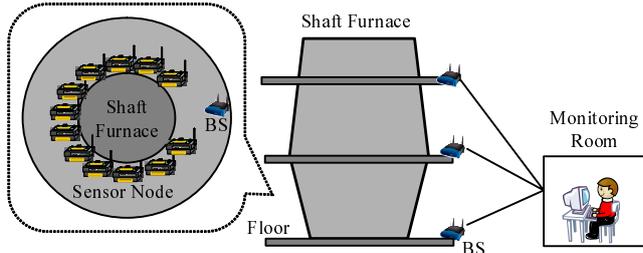


図 1 高炉モニタリング

Fig. 1 Monitoring of Shaft Furnace of Steel Plant

端末からある端末への固定周期での情報収集や、あるセンサ端末から全てのセンサ端末への固定周期での情報拡散など、アプリケーションの要求に応じた形態の通信を自己組織的に構成することのできる進行波型通信機構を提案している [5]。例えば、基地局への情報収集の場合には、センサ情報の収集タイミングにあわせて、センサネットワークの周縁部に位置するセンサ端末から順に、また、基地局から同じだけ離れたセンサ端末が同じタイミングで、センサ情報を発信、転送していく。その結果、同心円状の情報伝搬の波が形成され、波のタイミングにあわせたスリープ制御を行うことができる。

自然環境や農地の定時観測のように、すべてのセンサ端末から同じ固定の周期でセンサ情報を収集する場合には、このような進行波型の通信機構が効果的である。しかしながら、アプリケーションによっては、特定または不特定の、少数または多数のセンサ端末が、センシング対象の状態変化やアプリケーションからの指示によって、より短い周期でセンサ情報を取得、送信することが要求される。例えば、図 1 のような製鋼所高炉において炉壁の温度や CO ガス濃度を遠隔監視する場合には、平時の長い周期のセンシングだけでなく、比較的長時間にわたって上昇、下降する温度の中周期でのセンシングや、急速に発生、拡散、移動する CO ガスに対する短周期のセンシングが必要となる。また、異常の発生個所や規模の時間変化にあわせて、中・短周期のセンシングを行うセンサ端末も変更しなければならない。したがって、センサネットワークにおいては、アプリケーション要求を満足できるよう、センシング対象の状態変化に応じて、適切なセンサ端末が適切な頻度でセンシングを行い、また、得られたセンサ情報を伝達するための、適応的なセンサ情報収集機構が必要である。

本稿では、複数のセンシング機能を有するセンサ端末により構成されるセンサネットワークから、センシング対象の状態変化に対するアプリケーション要求に応じた柔軟な周期でのセンシングおよび情報収集を実現するセンサ情報収集機構を提案する。提案手法では、進行波型通信機構を用い、平時には全てのセンシング対象から同じ固定の周期でセンサ情報を収集する。温度の上昇、CO ガスの発生などの異常が生じた場合には、センシング対象の変化の度合いに応じた適切な台数のセンサ端末がアプリケーションの要求に応じたより頻繁なセンシングを行う。自律的なセンシング周期の制御のため、提案手法では、生物の群れにおける役割分化の仕組みを説明する数学モデルであ

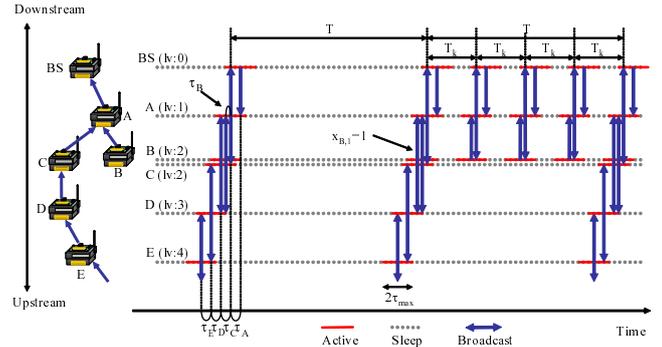


図 2 センサ端末のメッセージブロードキャストのタイミング

Fig. 2 Broadcast Timing of Proposed Scheme

る反応閾値モデル (Response Threshold Model) [6] を応用している。また、高頻度なセンシングによって得られたセンサ情報が基地局に伝達されるよう、頻繁なセンシングを行っているセンサ端末と基地局の間に位置するセンサ端末も、動作周期を変更する。その結果、センサネットワークには、平時の情報収集の進行波と、異常情報を伝達するためのより早い進行波が混在することとなる。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章で、反応閾値モデルおよび進行波型通信機構を利用したセンシング要求に適応的なセンサ情報収集機構を提案する。3 章でシミュレーションによる評価を行い、4 章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 適応的センサ情報収集機構

本章では、本稿で提案するセンシング要求に適応的なセンサ情報収集機構について述べる。提案手法の動作例を図 2 に示す。全てのセンサ端末は無線通信機能 (送信半径 R) および、温度や光、ガス濃度など k_{max} 個のセンシング対象 k ($1 \leq k \leq k_{max}$) を監視するための k_{max} 個のセンサ (センシング半径 r_k) を持つ。センサ端末 i はセンシング対象 k に対する状態フラグ $x_{i,k}$ を持つ。平時は通常センシング状態 ($x_{i,k} = 0$) にあり、基本周期 T 秒でセンシング対象 k をセンシングし、取得したセンサ情報をブロードキャスト送信する。進行波型通信機構によって、基地局により近い下流のセンサ端末 (例えば図 2 におけるセンサ端末 E に対するセンサ端末 D) はこのブロードキャストのタイミングでアクティブとなるようにスケジューリングされており、送信されたセンサ情報を受信する。センシング対象 k に対して詳細センシング状態 ($x_{i,k} = 1$) となったセンサ端末 i は、より短い周期 $T_k = T/2^{c_k}$ 秒でセンシング対象 k をセンシングし、取得したセンサ情報をブロードキャストする (図 2 中、センサ端末 B)。センサ端末 i の取得したセンサ情報を基地局に中継するため、詳細センシング状態のセンサ端末 i と基地局の間に位置するセンサ端末も、周期 T_k で動作するようになる (図 2 中、センサ端末 A)。ここで、 c_k ($0 \leq c_k \leq \lceil \log_2(T/2\tau_{max}) \rceil$) は整数パラメータであり、センシング対象 k 毎にアプリケーションによって事前に設定されているものとする。

2.1 反応閾値モデルによる適応的役割分担

センシング対象 k に対して、通常センシング状態になるか

詳細センシング状態になるかをセンサ端末が自律的に決定するために、本稿では、反応閾値モデル (Response Threshold Model) [6] を用いる。反応閾値モデルは生物の群れにおける役割分化の仕組みを説明する数学モデルであり、センサネットワークでのセンサ端末へのタスク割り当てなど、いくつかの応用研究がある [7, 8]。

センサ端末 i におけるセンシング対象 k の頻繁なセンシングの必要性 (需要) を $s_{i,k}$ とする。反応閾値モデルにもとづき、需要 $s_{i,k}$ は以下の式によって変化する。

$$\frac{ds_{i,k}}{dt} = \delta_{i,k}(t) - \alpha \frac{m_{i,k}(t)}{n_{i,k}(t)} \quad (1)$$

ここで、 $\delta_{i,k}(t)$ は需要の増加率であり、 α は仕事の効率である。 $m_{i,k}(t)$ および $n_{i,k}(t)$ はセンサ端末 i 周囲における、時刻 t において対象 k を頻繁にセンシングしているセンサ端末数と、センシング対象 k をセンシング可能なセンサ端末数をそれぞれ表す。需要の増加率 $\delta_{i,k}(t)$ に対して十分な割合のセンサ端末が頻繁なセンシングを行ってれば、需要は増えず、適切なセンシングが行われていることを表す。

需要の増加量 $\delta_{i,k}(t)$ をアプリケーションに応じて設定することにより、センシング対象のさまざまな状態変化に対して適応的なセンシングが可能となる。例えば、高炉モニタリング [9] においては、炉壁温度は比較的ゆっくりと上昇し、一旦上昇すると長時間ほぼ一定となり、やがて緩やかに下降することから、温度変化が大きいときのみ頻繁にセンシングを行うよう、需要の増加率 $\delta_{i,k}$ として温度の時間変化を用いるのがよいと考えられる。一方、CO ガスは突然発生し、比較的速く拡散する。また、CO ガスの存在そのものが、作業員の安全上の問題となるため、需要の増加率 $\delta_{i,k}$ としては、CO ガスの観測値そのものを用いることが適切である。

センサ端末 i が、センシング対象 k に対して詳細センシング状態となり、より頻繁にセンシングするようになる確率と、詳細センシング状態から通常センシング状態へ戻る確率は以下で与える。

$$P(x_{i,k} = 0 \rightarrow x_{i,k} = 1) = \frac{s_{i,k}^2(t)}{s_{i,k}^2(t) + \theta_{i,k}^2(t)} \quad (2)$$

$$P(x_{i,k} = 1 \rightarrow x_{i,k} = 0) = p_{i,k}(t) \quad (3)$$

ここで、 $p_{i,k}(t) \in [0, 1]$ はパラメータである。例えば $p_{i,k}(t)$ として、温度の時間変化の逆数を与えることにより、温度変化が緩やかになると多くのセンサ端末が通常センシング状態に戻り、電力消費を抑えられる。式 (2) 中の閾値 $\theta_{i,k}$ は次式にもとづいて調整される。

$$\frac{d\theta_{i,k}}{dt} = \begin{cases} -\xi, & \text{if } i \text{ performs frequent sensing} \\ \varphi, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 ξ, φ は定数である。この閾値調整により、いったん詳細センシング状態に遷移したセンサ端末は詳細センシング状態に留まりやすくなり、一方で、通常センシング状態のセンサ端末も閾値が高くなることによって通常センシング状態に留まりやすくなり、役割分化が生まれる。また、電池の枯渇などに

よって詳細センシング状態にあるセンサ端末数が減少すると、式 (1) によって需要が増加し、閾値が高く、通常センシング状態にあったセンサ端末もいずれ詳細センシング状態に遷移するようになり、需要に応じた適切な数が保たれる。

2.2 情報収集周期変更を考慮したセンサ情報収集

動的なセンシング要求の変化に対して柔軟かつ電力効率よくセンサ情報を収集するため、進行波型通信機構 [5] を拡張する。進行波型通信機構では、センサ端末間の局所的な相互作用によってセンサネットワーク全体で情報伝搬の順序やタイミングを決定するために、パルス結合振動子モデル [10] における進行波状態を用いている。パルス結合振動子モデルでは、それぞれの振動子は周期的なタイマにしたがって動作している。タイマ位相は時間とともに進み、タイマ位相がある値に達すると振動子は発火し、位相が初期化される。また、振動子が発火していないときに他の振動子が発火すると、その振動子は刺激を受け、位相を進める。振動子間で互いに刺激を与えあい、位相を進めることによって、全振動子が同時に発火する完全同期や、振動子が固定の位相差で交互に発火する進行波が構成される。

2.2.1 制御情報

センサ端末 i は、制御情報として、タイマ位相 $\phi_i \in [0, T]$ ($d\phi_i/dt = 1$)、レベル値 l_i 、PRC (phase-response curve) 関数 $\Delta_i(\phi_i)$ 、オフセット τ_i ($0 < \tau_{min} \leq \tau_i \leq \tau_{max} < 0.5T$)、需要 $S_i = \{s_{i,k} | 1 \leq k \leq k_{max}\}$ 、閾値ベクトル $\Theta_i = \{\theta_{i,k} | 1 \leq k \leq k_{max}\}$ 、センシング状態ベクトル $X_i = \{x_{i,k} | 1 \leq k \leq k_{max}\}$ 、中継フラグベクトル $F_i = \{f_{i,k} | 1 \leq k \leq k_{max}\}$ 、近隣端末センシング状態ベクトル $Y_i = \{\forall j X_j\}$ 、センサ情報ベクトル $D_i = \{D_{i,k} | 1 \leq k \leq k_{max}\}$ を管理する。これらの制御情報は近隣センサ端末とのブロードキャストメッセージのやりとりによって更新される。なお、センサ端末はセンシング周期に 1 度メッセージをブロードキャストするのみであり、他の制御メッセージは送出不しい。

レベル値 l_i は基地局からのホップ数を表し、初期値は無量大として設定されている。基地局はレベル値として 0 を用いる。オフセット τ_i はレベル値 l_i のセンサ端末 i とレベル値 $l_i - 1$ のセンサ端末のメッセージ送信タイミングの差を表す。オフセット τ_i をセンサ端末毎にばらばらに設定することで、同じレベル値のセンサ端末が同時にメッセージをブロードキャスト送信することを防ぐ (図 2 中、センサ端末 B, C を参照)。オフセットの最大値 τ_{max} は、無線チャネルを競合するすべてのセンサ端末がメッセージをブロードキャストするために要する時間よりも大きい値になるよう、センサ端末の密度を考慮して決める必要がある。PRC 関数は、近隣センサ端末からのブロードキャストメッセージを受信した際の自身の位相の変化量を定める。初期状態によらず、基地局を中心とする同心円状の進行波を生成するためには、PRC 関数が一定の条件を満たす必要があり、本稿では以下の式を用いる [5]。

$$\Delta_i(\phi_i) = a \sin \frac{\pi}{\tau_i} \phi_i + b(\tau_i - \phi_i) \quad (5)$$

なお、 a および b は進行波生成までの時間を決めるパラメータである。中継フラグ $f_{i,k}$ は、センシング対象 k について詳細

センシング状態にある上流のセンサ端末の存在を下流のセンサ端末に知らせるためのフラグである．詳細センシング状態にある上流のセンサ端末からのセンサ情報を下流のセンサ端末に転送する場合には $f_{i,k} = 1$ ，しない場合には $f_{i,k} = 0$ と設定される．センサ情報ベクトル $D_{i,k}$ には，センサ端末 i がアクティブ期間中に近隣センサ端末から受信したセンシング対象 k に関する全てのセンサ情報が，発信元センサ端末 ID などの情報と共に保存される．

2.2.2 センサ端末の動作

センサ端末 i はタイマ位相 ϕ_i および中継フラグベクトル F_i にもとづいて動作する．以降では時系列にしたがって，センサ端末の動作を説明する．

センサ端末 i は，自身の位相 $\phi_i \bmod \min_k T_k$ が $\min_k T_k - \tau_{max}$ になるとスリープ状態からアクティブ状態になる．なお， $\min_k T_k = T / \max_k (f_{i,k} 2^{c_k}, 1)$ である．例えば，図 2 のセンサ端末 A では， $c_1 = 2$ であるセンシング対象 1 の中継フラグ $f_{A,1}$ が 1 に設定され， $\min_k T_k = T/4$ となっている．したがって，センシング対象 1 に対しては，4 分の 1 の周期でセンシングを行うようになり，平時と比較して，周期 T の間に 3 回多くアクティブ状態になる．センサ端末 i は，アクティブ状態になると，中継フラグベクトル F_i 内の中継フラグ $f_{i,k}$ をすべてゼロに初期化し，さらに，センサ情報ベクトル D_i 内のすべてのセンサ情報 $D_{i,k}$ を空にして，近隣センサ端末からのメッセージ受信に備える．なお，進行波型通信機構によって上流センサ端末はセンサ端末 i の位相が $\min_k T_k - \tau_{max}$ から $\min_k T_k$ の間にメッセージを送出するようにスケジュールされている．近隣センサ端末 j が送信するブロードキャストメッセージには，センサ端末番号 i ，レベル値 l_i ，センシング状態ベクトル X_i ，中継フラグベクトル F_i ，同期フラグ z_i ，およびセンサ情報ベクトル D_i が含まれる．同期フラグ z_i については後述する．

センサ端末 i は，センサ端末 j から受信したブロードキャストメッセージ内のレベル値 l_j が $l_i + 1$ である場合には，メッセージ中に含まれるセンサ情報ベクトル D_j をセンサ情報ベクトル D_i に追加する．また，中継フラグ $f_{j,k} \in F_j$ が 1 であれば中継フラグ $f_{i,k}$ を 1 とする．さらに，センシング状態ベクトル X_j を，近隣端末センシング状態ベクトル Y_i に追加または該当するエントリを更新する．近隣端末センシング状態ベクトル Y_i は，近隣センサ端末からのメッセージを受信する度に更新されるが，数周期にわたって，近隣センサ端末からのメッセージを受信しない場合には，該当するエントリは削除される．

センサ端末 i は，レベル値が $l_j = l_i$ と設定されたブロードキャストメッセージを受信すると，受信したセンサ情報ベクトル D_j に含まれるセンサ情報と同じセンサ情報が自身の管理するセンサ情報ベクトル D_i の中に含まれているかどうかを確認し，含まれていれば，重複するセンサ情報をセンサ情報ベクトル D_i から削除する．その結果，センサ情報ベクトル $D_{i,k}$ が空になった場合には，センサ端末 i は中継フラグ $f_{i,k}$ を 0 とする．このことにより，ブロードキャストメッセージに含まれるデータ量を削減するとともに，図 3 に示されるように，ブロードキャスト通信によるマルチパス効果を残しつつ，センサ情報

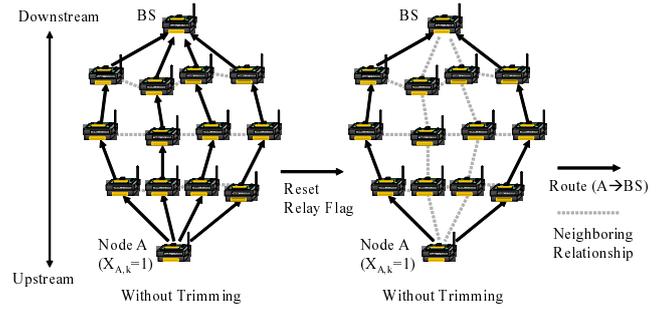


図 3 メッセージ伝搬経路の抑制例

Fig. 3 An Example of Message Reduction

を中継するセンサ端末数を抑制することができる．

センサ端末 i は，タイマ位相 $\phi_i \bmod \min_k T_k$ が $\min_k T_k - \epsilon$ になると，センシング対象 $\forall k \in \{k | \phi_i \bmod T_k = T_k - \epsilon\}$ に対するセンシング状態 $x_{i,k}$ を 2.1 節の内容にもとづき決定する． ϵ ($0 < \epsilon < \tau_{min}$) は，センシング状態の推定およびセンシングに要する処理遅延である．センサ端末 i は，まず， $n_{i,k}$ および $m_{i,k}$ を近隣端末センシング状態ベクトル Y_i から計算する．式 (1) にもとづいて需要 $s_{i,k}$ を計算した後，センシング状態 $x_{i,k}$ を式 (2) および式 (3) を用いて決定する．センサ端末 i は， $x_{i,k} = 1$ であれば，センシング対象 k に対してセンシングを行い，得られたセンサ情報を蓄積すると共に，中継フラグ $f_{i,k}$ を 1 に設定する．位相 ϕ_i が $T - \epsilon$ の場合，センシング周期 T での通常のセンシングであるので，センサ端末 i はセンシング状態 $x_{i,k}$ によらずすべてのセンシング対象に対してセンシングを行い，センサ情報を蓄積する．その後，閾値 $\theta_{i,k}$ を式 (4) にもとづき調整する．

センサ端末 i はタイマ位相が $\phi_i \bmod \min_k T_k = 0$ ($0 < \phi_i < T$) になるか， $\phi_i = T$ に達すると，メッセージをブロードキャスト送信する．ブロードキャストメッセージはアクティブ状態にある全ての近隣センサ端末が受信する．ブロードキャストメッセージ中の同期フラグ z_i は，センサ端末が位相 T でメッセージをブロードキャスト送信するときに 1 と設定され，それ以外の場合は 0 と設定される．なお，タイマ位相 ϕ_i が T に達すると，センサ端末 i はタイマ位相を 0 に戻す．

センサ端末 i は，メッセージをブロードキャストした後 τ_{max} の間，アクティブ状態を継続する．センサ端末 i は，レベル値が $l_j < l_i$ で同期フラグが $z_j = 1$ と設定されたメッセージを受信すると，レベル値 l_i を $l_j + 1$ と設定するとともに，刺激を受け，タイマ位相 ϕ_i を $\phi_i + \Delta_i(\phi_i)$ とする．なお，アクティブ期間中の位相の調整はただか 1 回に限られる．レベル値が $l_j = l_i$ と設定されたメッセージを受信すると，近隣端末センシング状態ベクトル Y_i を更新する．メッセージをブロードキャスト送信してから τ_{max} が経過すると，センサ端末 i は，スリープ状態に移行する．したがって，センサ端末はデータ収集周期 $\min_k T_k$ 中， $2\tau_{max}$ 間だけアクティブになるため，デューティ比は $2\tau_{max} / \min_k T_k$ となる．

2.2.3 提案手法のオーバヘッド

センサ端末 i が管理，更新する情報は，レベル値 l_i ，需要ベク

トル S_i , 閾値ベクトル Θ_i , センシング状態ベクトル X_i , 中継フラグベクトル F_i , 近隣端末センシング状態ベクトル Y_i であり, 必要なメモリサイズは $|l_i| + |S_i| + |\Theta_i| + |X_i| + |F_i| + |Y_i| + |D_i|$ となる. レベル値に 4 bit (最大 15 ホップ), 需要と閾値に 32 bit, 中継フラグおよびセンシング状態に 1 bit それぞれ要すると, 近隣センサ端末数が n の場合に, 制御情報に必要なメモリサイズの合計は $4 + (66 + n)k_{max}$ bits となる. 高炉モニタリングでのセンシング対象を温度と CO ガス濃度の 2 つ ($k_{max} = 2$), 近隣センサ端末数として数十台程度を想定すると, 制御情報に必要なメモリサイズは 200 bits 以下となる. 例えば, MICAz [11] には, 32 kbits のメモリが搭載されており, ほとんどの市販のセンサ端末ではこのメモリサイズは問題とされない.

メッセージに含まれる制御情報はセンサ端末識別子 i , レベル値 l_i , センシング状態ベクトル X_i , 中継フラグベクトル F_i , 同期フラグ z_i であり, メッセージに含まれる制御情報のサイズは $|i| + |l_i| + |X_i| + |F_i| + |z_i|$ となる. センサ端末識別子に 10 bits (最大 1023 台), 同期フラグに 1 bit 要すると, メッセージに含まれる制御情報のサイズは $15 + 2k_{max}$ bits となり, $k_{max} = 2$ の場合には 19 bits である.

3. シミュレーション評価

提案機構の基本動作をシミュレーションにより確認した. 図 4(a) のように 100 m × 100 m の領域に 200 台のセンサ端末をランダムに配置し, 基地局は領域の中心にあるものとした. センサ端末の無線通信半径 R , センシング半径 r をいずれも 20 m とした. センシング対象としては温度および CO ガスを想定し, 通常センシング状態では $T = 160$ 秒, 詳細収集状態では, $T_{temp} = 40$ 秒, $T_{gas} = 10$ 秒でそれぞれの情報を収集するように設定した. すなわち, $c_{temp} = 2$, $c_{gas} = 4$ である. 温度の観測値を $v_{i,temp} \in [0, 1]$, CO ガスの観測値を $v_{i,gas} \in [0, 1]$ とし, 共に観測値の最大値で正規化されているものとした.

式 (1) 中の需要の増加率 $\delta_{i,k}$ として, $\delta_{i,temp} = \beta |dv_{i,temp}/dt|$, $\delta_{i,gas} = v_{i,gas}$ を用い, 式 (3) 中の通常センシング状態への遷移確率 $p_{i,k}$ として, $p_{i,temp} = 1 - \beta |dv_{i,temp}/dt|$, $p_{i,gas} = 1 - v_{i,gas}$ を用いた. なお, $\beta = 1000$ とした. また, オフセット τ_i の調整幅を定める τ_{max} および τ_{min} はそれぞれ 1 秒および 0.5 秒とした. 式 (5) の PRC のパラメータとしては $a = 1$, $b = 0.5$ を用い, 反応閾値モデルのパラメータとしては $\alpha = 0.001$, $\xi = 0.01$ および $\varphi = 0.001$ を用いた. さらに, ブロードキャストメッセージのヘッダを 24 ビット, センサ情報 1 つあたりのデータ長を 16 ビットとした. なお, 無線通信の衝突などによるメッセージの消失は無いものとした. 電力消費モデルとしては, MICAz [11] にならい, 送信時に 52.2 mW, 受信時に 59.1 mW, アイドル時に 60 μ W, スリープ時に 3 μ W の電力を消費するものとした.

次のようなシナリオでシミュレーションを行った. 時刻 500 秒まで, 全領域で温度は $v_{temp} = 0.1$ と一定であり, CO ガスはいずれの箇所からも漏洩していないものとする. 時刻 500 秒に, 図 4(a) 中の領域 D のある場所で, 温度が一定割合で上昇

していき, 時刻 1500 秒で温度が 0.9 に到達した後は, 温度変化が生じないものとした. また, 時刻 1000 秒で領域 C のある場所で CO ガスが漏洩し, 領域 A に向かって速度 0.08m/s で移動した後, 時刻 2000 に消滅するものとした.

図 4(b) はセンサ端末のメッセージのブロードキャストタイミングを点で示したものである. 縦軸左側に, 領域ごとに付けられたセンサ端末の番号を表す. 図 4(c), 図 4(d) はそれぞれセンシング対象毎の詳細センシング状態にあるセンサ端末数, 中継フラグが 1 にセットされたセンサ端末数の変化を示したものである. シミュレーション開始時には, 全てのセンサ端末は通常センシング状態にあるが, 時刻 500 秒以降, 領域 D のセンサ端末が温度変化を検出し, 図 4(c) に示されるように詳細センシング状態となり, 周期 $T_{temp} = 40$ 秒で温度のセンシングを行う. 詳細センシング状態となったセンサ端末は中継フラグ $f_{i,temp}$ を 1 に設定したメッセージをブロードキャストするため, これらのセンサ端末と基地局の間に位置するセンサ端末も同様に, 周期 $T_{temp} = 40$ 秒で動作するようになる. 温度変化に応じて需要の増加率を設定していることから, 時刻 1500 秒で温度が変化なくなると, 詳細センシング状態にあったセンサ端末は通常センシング状態に戻っている.

同様に, 時刻 1000 秒において, 領域 C のセンサ端末が CO ガスの漏洩を検出し, 周期 $T_{gas} = 10$ 秒での動作を開始している. CO ガスは領域 A に向かって移動するため, 図 4(b) に示されるように, 領域 C では詳細センシング状態のセンサ端末が次第に通常センシング状態に, 領域 A では通常センシング状態のセンサ端末が次第に詳細センシング状態に移行している. なお, 通常センシング状態にあるセンサ端末が 160 秒周期でアクティブ状態になり, 詳細センシング状態への移行の判断を行うのに対し, 詳細センシング状態にあるセンサ端末は 10 秒周期で状態移行の判定を行うため, 図 4(d) に示されるように, 詳細センシング状態にあるセンサ端末数は 10 秒周期で減少, 160 秒周期で増加する.

図 4(a) は時刻 1200 秒でのセンサネットワークのスナップショットを示している. “ ” は通常センシング状態にあるセンサ端末を, “ ” は詳細センシング状態にあるセンサ端末を, “ ” は詳細センシング状態にないが中継フラグを設定しているセンサ端末を表している. 図に示されるとおり詳細センシング状態にあるセンサ端末と基地局の間に位置する何台かのセンサ端末は通常センシング状態を保っており, 基本周期で動作している. このことにより, 電力消費が抑えられると共に, ブロードキャストメッセージの衝突によるセンサ情報の消失が抑制されることが期待できる.

また, シミュレーション期間中, センサ端末あたりの消費電力は 57.6 mJ, デューティー比は 0.03 であった. 一方, 常に 10 秒周期のセンシングを行った場合, センサ端末あたりの消費電力は 632 mJ, デューティー比は 0.2 であった. したがって, 提案手法を用いることで, センシング要求の動的な変化に柔軟に対応した電力効率の良いセンサ情報収集が行えることがわかる.

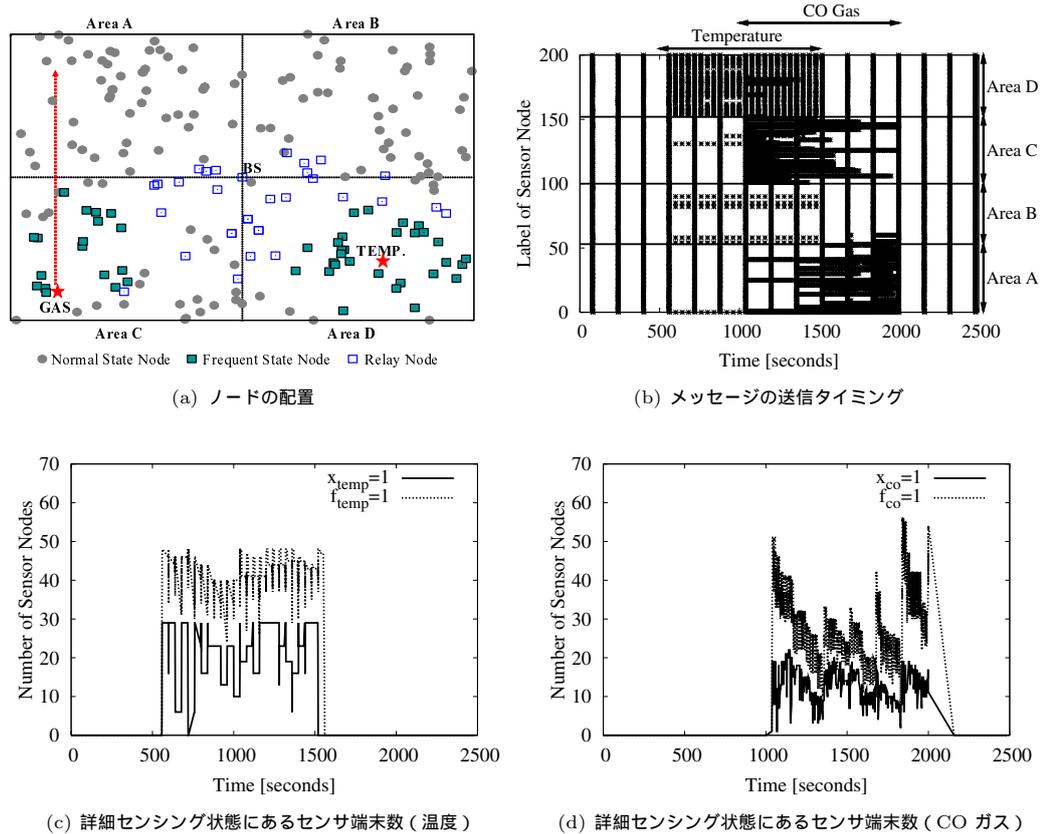


図 4 シミュレーションによる提案機構の基本動作の確認

Fig. 4 Results of Simulation Experiments

4. おわりに

本稿では、複数のセンシング機能を有するセンサ端末からなるセンサネットワークを対象に、動的に変化するセンシング要求に応じた柔軟な周期でのセンシングおよび情報収集を実現する適応的なセンサ情報収集機構を提案し、シミュレーションによってその有効性を確認した。センシング対象毎のセンシングの頻度を決定するために反応閾値モデルを、電力効率の良い情報伝達およびスリープ制御のためにパルス結合振動子モデルを用いることにより、センサ端末の自律分散的な振る舞いによって、センサネットワークとして所望の機能が達成される。

本稿の評価では、提案手法の基本動作の確認に留まっているため、今後、無線通信の衝突などのある環境において、情報収集率や遅延といったアプリケーションの観点での性能評価を行うことを予定している。また、センサ端末の追加、故障、除去や無線リンクの不安定性によるトポロジ変化に対する適応性についても検証する予定である。

謝辞 本研究の一部は文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費) および文部科学省特定領域研究 (18049050) によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] L. Krishnamurthy, R. Adler, P. Buonadonna, J. Chhabra, M. Flanigan, N. Kushalnagar, L. Nachman, and M. Yarvis, "Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea," in *Proc. of ACM SenSys 2005*, pp. 64–75, Nov. 2005.
- [2] G. V. Merrett, N. R. Harris, B. M. Al-Hashimi, and N. M. White, "Energy controlled reporting for industrial monitoring wireless sensor networks," in *Proc. of the IEEE Sensors 2006*, pp. 892–895, Oct. 2006.
- [3] L. Wang and Y. Xiao, "A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 11, pp. 723–740, Oct. 2006.
- [4] N. Wakamiya and M. Murata, "Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, pp. 873–881, Mar. 2005.
- [5] Y. Taniguchi, N. Wakamiya, and M. Murata, "A traveling wave based communication mechanism for wireless sensor networks," *Journal of Networks*, vol. 2, pp. 24–32, Sept. 2007.
- [6] E. Bonabeau, A. Sobkowski, G. Theraulaz, and J.-L. Deneubourg, "Adaptive task allocation inspired by a model of division of labor in social insects," in *Proc. of Biocomputing and Emergent Computation*, pp. 36–45, 1997.
- [7] T. H. Labella and F. Dressler, "A bio-inspired architecture for division of labour in SANETs," in *Proc. of BIONETICS 2006*, Dec. 2006.
- [8] K. H. Low, W. K. Leow, and J. Marcelo H. Ang, "Task allocation via self-organizing swarm coalitions in distributed mobile sensor network," in *Proc. of AAAI-04*, pp. 28–33, July 2004.
- [9] 福島 高司, 丸山 政克, 田村 直樹, "センサーネットワークにおける現場環境の測定," 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 335–336, May 2008.
- [10] P. Goel and B. Ermentrout, "Synchrony, stability, and firing patterns in pulse-coupled oscillators," *Physica D*, pp. 191–216, Mar. 2002.
- [11] "MICAz Data Sheet." http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAz_Datasheet.pdf.