

センサネットワークのための 進行波現象を利用した通信機構の実装と評価

谷口 義明[†] 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: †{y-tanigu,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループでは、多数のセンサ端末が無作為に配置された環境において、全てのセンサ端末からシンク端末への周期的なセンサ情報の収集や、情報発生源からセンサネットワーク全体への周期的な情報拡散など、アプリケーションに応じた形態の通信を自律的に構成する通信機構を提案し、シミュレーションによりその有効性を示してきた。提案機構は、パルス結合振動子モデルにおける進行波現象を利用することにより、通信のタイミングや周期、形態などを制御する。本稿では、提案機構の実用性、実現性を検証するため、市販の無線センサ端末 MICAz MOTE を用いた実証実験を行った結果を示している。実環境におけるパケット衝突による性能劣化を抑えるための手法を新たに組み入れることにより、16 台のセンサ端末からなるセンサネットワークにおいておよそ 95 % の収集率を達成できた。

キーワード センサネットワーク, 進行波現象, パルス結合振動子モデル, MICAz MOTE

Implementation and Evaluation of Traveling Wave based Communication Mechanism for Wireless Sensor Networks

Yoshiaki TANIGUCHI[†], Naoki WAKAMIYA[†], and Masayuki MURATA[†]

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

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

E-mail: †{y-tanigu,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract We have proposed a distributed and self-organizing communication mechanism for a wireless sensor network which can organize a variety of communication, i.e., diffusion and gathering, depending on application's requirements. To accomplish periodic communication without any centralized controls, we adopt traveling wave phenomena of a pulse-coupled oscillator model by regarding sensor nodes as oscillators and emission of radio signals as firing. In this paper, to verify the practicality of the proposed mechanism, we implement the mechanism using commercial wireless sensor units, MICAz MOTE. Since collisions among synchronized packet emissions affects the performance, we propose a mechanism to distribute timing of packet emission and data delivery ratio of about 95 % is accomplished.

Key words sensor network, traveling wave, pulse-coupled oscillator model, MICAz MOTE

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や制御、農場や河川など大規模領域の観測、生態観測などを遠隔から効率的に行うことのできる、無線センサネットワーク技術が注目を集めている。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、通信に消費される電力

を低く抑えなければならず、また、センサ端末の停止、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。

我々の研究グループでは、多数のセンサ端末が無作為に配置された環境において、全てのセンサ端末から基地局や任意のセンサ端末への周期的なセンサ情報の収集、あるいは、情報発生源からセンサネットワーク全体への周期的な情報拡散など、ア

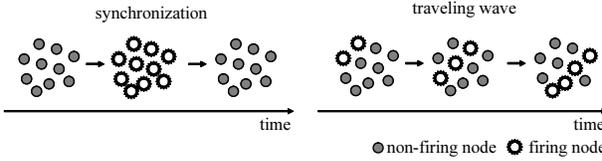


図 1 完全同期状態と進行波状態

Fig. 1 Global synchronization and traveling wave

アプリケーション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自律分散型の通信機構を提案している [1]。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、障害の影響を受けない耐故障性、センサ端末の停止、追加、削除に対する適応性を有する。提案機構では、センサ情報の収集あるいは拡散のタイミングにあわせて、情報を収集あるいは拡散する端末（これらをコア端末と呼ぶ）を中心とした同心円状に、固定の時間差を保ちつつ順次情報を転送していく。例えば情報拡散の場合には、コア端末がメッセージを送出し、隣接するセンサ端末がこれを受信する。これらの隣接端末は、一定時間後、さらにその隣接端末に対してメッセージを送出する。このようなタイミング制御により、効果的なスリープ制御が行え、電力消費を抑えることが可能となる。

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、提案機構では、パルス結合振動子モデル (Pulse-Coupled Oscillator Model) [2], [3] における進行波状態を応用している。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もとづく同期機構をモデル化したものである。全ての振動子が完全に同期して動作する完全同期状態と異なり、進行波状態では、振動子は振動子間で固定の位相差を保ったまま順に発火する (図 1)。パルス結合振動子モデルにおける完全同期状態を、センサネットワークにおける時刻同期などに応用した研究はいくつかあるが [4] ~ [8]、情報伝搬には進行波状態を利用するのが効果的である。これまでに我々は、パルス結合振動子の動作を規定する PRC (Phase-Response Curve: 位相応答曲線) や制御パラメータについて、任意の状態から所望の形状の進行波を生成するための条件や設定方法について検討し、パルス結合振動子モデルを応用したセンサネットワーク通信機構の有効性を示してきた [1]。しかしながら、提案機構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しており、MAC 層での衝突によるパケットの消失や通信遅延などは考慮していない。本稿では、無線センサ端末 MICAz MOTE を用いた実システムへの実装、実証実験により提案手法の実用性、有効性を示し、また、実環境における性能向上のための機構を提案、評価する。

以降、2 章でパルス結合振動子における進行波現象および提案機構の概要について述べる。3 章で提案手法の MICAz MOTE への実装について述べ、実験結果を示す。さらに、パケット衝突を回避するための提案機構の改良およびその有効性の評価を 4 章で行う。最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

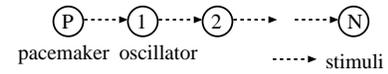


図 2 直線上に並んだ振動子

Fig. 2 Oscillators in tandem

2. 進行波現象を利用したセンサネットワーク通信機構

本章では、まず、パルス結合振動子モデルにおける進行波状態を説明した後、進行波現象を利用したセンサネットワークのための通信機構 [1] の概要を述べる。

2.1 パルス結合振動子モデルと進行波現象

N 個の振動子を考える。振動子 i の位相 ϕ_i ($d\phi_i/dt = 1$) は時間の経過と共に 0 から 1 に遷移し、1 に達すると振動子 i は発火し、位相 ϕ_i は 0 にもどる。このとき、結合関係にある振動子 j は刺激を受け、位相 ϕ_j が次式により偏移する。

$$\phi_j \rightarrow \phi_j + \Delta(\phi_j) \quad (1)$$

関数 $\Delta(\phi)$ を PRC と呼ぶ。式 (1) にもとづく相互作用によって、直接的または間接的な結合関係にある全ての振動子の位相は完全に同期、あるいは振動子間で固定の位相差を保つようになる。前者を完全同期状態、後者を進行波状態と呼ぶ。振動子集合がいずれの状態に達するかは初期位相や PRC の性質によって決まる [9]。なお、振動子は自身の発火の瞬間に受けた刺激を無視するものとし、また、2 つ以上の刺激を同時に受けてもそれらを 1 つの刺激とみなすものとする [3]。

センサネットワークにおいて任意の状態から所望の通信パターンを形成できるよう、初期位相によらず適切な進行波を生成、制御するための PRC について考える。コア端末に対応する振動子をペースメーカーと呼び、通信周期やタイミングを維持するため他の振動子から刺激を受けず、一定の周期で発火するものとする。また、振動子はペースメーカーにより近い近隣振動子からのみ刺激を受けるものとする。この時、1 個のペースメーカーと N 個の振動子が直線状に並ぶ PCO ネットワークにおいて (図 2)、ペースメーカーが発火した後、時間間隔 τ 毎に振動子 1, 振動子 2, ..., 振動子 N が順に発火する進行波を振動子の初期位相によらず生成するための PRC の条件は次式で与えられる [1]。

$$\begin{cases} 0 < \Delta(\phi) \leq 1 - \tau - \phi & (0 \leq \phi < 1 - \tau) \\ \Delta(\phi) = 0 & (\phi = 1 - \tau) \\ 1 - \tau - \phi \leq \Delta(\phi) < 0 & (1 - \tau < \phi < 1) \end{cases} \quad (2)$$

この条件を満たす PRC としては、例えば、

$$\Delta_S(\phi) = a \sin \frac{\pi}{1 - \tau} \phi + b(1 - \tau - \phi) \quad (3)$$

がある。 $\tau = 0.2$ の場合に式 (3) で記述される PRC の例を図 3 に図示する。 a, b が大きいほどより早く進行波状態が達成される。 $\tau < 0.5$ であれば、ペースメーカーから振動子 N に向かって間隔 τ で発火していく進行波が、 $\tau > 0.5$ であれば、振動子 N からペースメーカーに向かって間隔 $1 - \tau$ で発火していく進行波

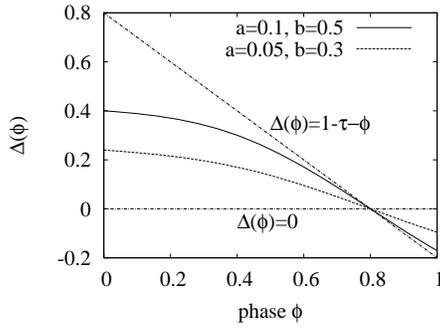


図 3 PRC Δ_S の例

Fig. 3 Examples of PRC Δ_S

が初期位相によらず発生する。

振動子が平面状に並ぶ場合には、ペースメーカーを根としたスパニング木にあわせて刺激を与えるにすれば、直線状の場合と同じく、式 (2) を満たす PRC を用いて所望の進行波を生成することができる。

2.2 センサネットワークのための通信機構

提案機構では、任意のセンサ端末が任意のタイミングでコア端末となって通信を開始することができる。

センサ端末 i ($1 \leq i \leq N$) は、センサとタイマを有し、制御情報としてタイマ位相 $\phi_i \in [0, 1]$, PRC $\Delta(\phi)$, レベル値 l_i (初期値 0), セッション識別子 s_i (初期値 0), 伝搬方向 δ_i , およびオフセット τ ($0 < \tau < 0.5$) を管理する。レベル値はコア端末からのホップ数を表す。 δ_i は情報伝播の方向を制御するパラメータであり、情報収集の場合に -1 , 情報拡散の場合には 1 と設定される。PRC としては、本稿では次式を用いる。

$$\Delta(\phi_i) = a \sin \frac{\pi}{g} \phi_i + b(g - \phi_i) \quad (4)$$

ただし、 $g = (1 - \delta_i \tau) \bmod 1$ である。例えば情報拡散の場合、コア端末のメッセージ送信タイミングにあわせてレベルが 1 大きいセンサ端末、すなわちコア端末に隣接するセンサ端末が、スリープ状態から復帰し、メッセージを受信する。時間 τ の後、これらレベル 1 のセンサ端末がメッセージを送信し、このタイミングにあわせてレベル 2 のセンサ端末がアクティブになる。センサ端末の動作の詳細は次のとおりである。

センサ端末は自身のタイマ位相にもとづいて動作する。センサ端末はタイマ位相が 1 になるよりオフセット τ だけ早くスリープ状態から復帰し、 τ の間、メッセージを受信、処理する。タイマ位相が 1 になるとメッセージをブロードキャスト送信する。センサ端末のブロードキャストするメッセージには、自身のセンサ情報と他のセンサ端末から受信したセンサ情報を集約したもの、レベル値 l_i , 伝搬方向 δ_i , およびセッション識別子 s_i が含まれる。その後、センサ端末はさらに τ だけ待ち、その間受信したメッセージを処理した後、スリープ状態に戻る。すなわち、通信周期を T とすると、センサ端末は $2\tau T$ の間だけアクティブになればよく、電力消費を抑えられる。オフセット τ を小さく設定することによりスリープ制御によるセンサネットワークの長寿命化が期待できる。しかしながら一方で、 τ が小さいと MAC 層におけるバックオフ制御などにより送信が遅



図 4 MICAz MOTE 端末

Fig. 4 MICAz MOTE

れたメッセージを受信し損ねる可能性が高くなる。

新たな通信を開始する場合、コア端末はレベル値として 0 を、セッション識別子として現在のセッション識別子に 1 を加え、メッセージをブロードキャストする。今、センサ端末 i がセンサ端末 j のメッセージを受信したものとす。セッション識別子 $s_j > s_i$ であれば新しい通信が開始されたものとして、レベル値 l_i を $l_j + 1$, セッション識別子 s_i を s_j , 伝搬方向 δ_i を δ_j にそれぞれ設定し、刺激を受ける。一方、セッション識別子が一致する場合には、レベル値 $l_j < l_i$ であればレベル値を $l_i = l_j + 1$, 伝搬方向 δ_i を δ_j にそれぞれ設定し、刺激を受ける。刺激を受けたセンサ端末 i はタイマ位相を PRC によって調整する。なお、刺激を受けたセンサ端末 i は刺激を受けた後 τ の間は他のメッセージからの刺激を受けない。さらに、レベル値 $l_j = l_i - \delta_i$ であれば、受信した情報を自身のものと集約する。これらの条件を満たさないメッセージは無視する。

提案機構では、センサ端末は自身のタイマ位相にもとづいてメッセージを送信するだけで、進行波を生成するための特別な制御メッセージを必要としない。なお、紙面の制限のため詳細は省くが、提案手法はセンサ端末の追加、削除や故障がある場合、コア端末が複数ある場合でも動作するよう設計されている [1]。

3. 進行波現象を利用したセンサネットワーク通信機構の実装

本章では、提案機構の実装および実験による検証結果について述べる。

3.1 MICAz MOTE への実装

実装には Crossbow 製 MICAz MOTE [10] を用いた。MICAz MOTE は全方位アンテナを持ち、単三電池 2 本で駆動するセンサ端末で、図 4 のように 51 ピンのインタフェースを通してさまざまなセンサボードを装着することが出来る。MICAz MOTE は Chipcon CC2420 無線 IC [11] を搭載しており、MAC 層の一部および物理層に IEEE 802.15.4 [12] が使われる。MAC 層プロトコルとしては CSMA/CA の一種である B-MAC [13] が動作する。MICAz MOTE は TinyOS と呼ばれるセンサ端末向けの OS によって制御される。アプリケーションや制御プログラムは NesC と呼ばれる C 言語に似た言語により記述、開発が可能で、記述したプログラムは専用のボードによって MICAz MOTE へ書き込む。

MICAz MOTE は内部に粒度 1 ミリ秒のクロックを持ってい

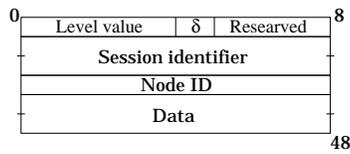


図 5 パケットフォーマット
Fig. 5 Packet format

表 1 MICAz MOTE の主な仕様
Table 1 Details of MICAz MOTE

モジュール	詳細	消費電流
MCU	ATMega128L	稼働時: 12 mA
	7.37 MHz, 8 bit	スリープ時: 0.01 mA
	4 kB RAM	
フラッシュメモリ	AT45DB014B	書込時: 15 mA
	512 kB	読取時: 4 mA
		スリープ時: 0.002 mA
無線通信	CC2420	受信時: 19.7 mA
	IEEE 802.15.4	送信時: 8.5-17.4mA
	2.4 GHz 帯	スリープ時: 0.001 mA
センサ	音, 光, 温度	稼働時: 5 mA
	加速度, 磁気	スリープ時: 0.005 mA

る．本実装では 100 ミリ秒毎に位相 ϕ_i を $0.1/T$ 進めることでタイマを実現している．例えば，情報収集の周期が 10 秒の場合には 100 ミリ秒ごとに位相 ϕ_i を 0.01 ずつ進める．センサ端末の発信するパケットのフォーマットを図 5 に示す．パケットは，レベル l_i ，伝搬方向 δ_i ，セッション識別子 s_i などの情報を格納するための領域 24 ビット，デバッグに用いるセンサ端末識別番号 i を格納するための領域 8 ビット，データ用の領域 16 ビットの計 48 ビットからなる．本実験では，センサデータとして温度情報を用いている．

提案機構では，アプリケーションの要求に従って任意のセンサ端末が任意のタイミングでコア端末となることができる．実験では任意のセンサ端末をコア端末として設定するため，MICAz MOTE に別途試作したスイッチ付きボードを装着している（図 4 左下）．スイッチを押すことで，センサ端末をコア端末として設定できる．

表 1 に MICAz MOTE ハードウェアの主な仕様を示す．MICAz MOTE ではモジュール毎に機能をスリープさせることにより，消費電力を軽減することが可能である．例えば，本表の数値にもとづくと，2000 mAh の容量を持つ標準的なアルカリ電池を用い，10 分に 1 回情報を収集するアプリケーションにおいてオフセット τ を 5 秒 ($\tau = 0.0083$) と設定すると，スリープ制御を使わない場合の寿命は約 2.26 日，スリープ制御を使う場合の寿命は約 132 日になる．

3.2 実験による動作検証

MICAz MOTE に実装した提案機構の動作を確認するために，図 6 に示すように格子状にセンサ端末を配置し，実験を行った．実環境では無線通信環境の変動によってセンサネットワークトポロジが変化するが，安定したトポロジ上での提案機構の有効性を確認するため，図 6 中の破線で結ばれたセンサ端

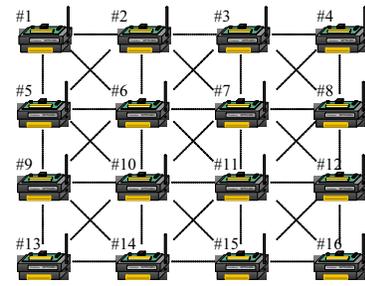
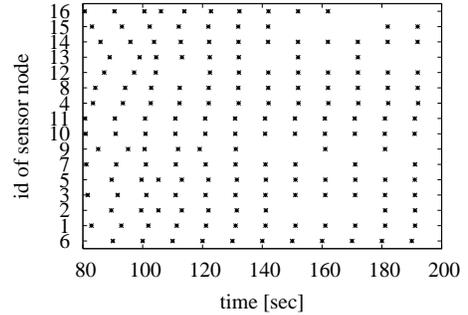
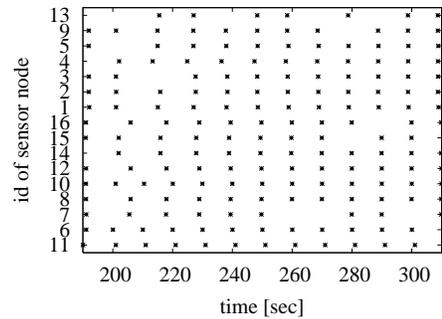


図 6 センサ端末の配置
Fig. 6 Experimental topology



(a) パケット送信のタイミング (情報拡散)



(b) パケット送信のタイミング (情報収集)

図 7 提案機構の実験評価

Fig. 7 Experimental evaluation of proposal

末同士のみが通信を行うようセンサ端末識別子によるフィルタを導入した．情報収集および拡散の周期は 10 秒とし，その他のパラメータとしては， $a = 0.01$ ， $b = 0.5$ ， $\tau = 0.1$ を用いた．順次センサ端末の電源を入れた後，全てのセンサ端末が動作を開始した時点時刻 0 とし，時刻 100 秒にセンサ端末 6 を情報拡散を行うコア端末として設定，時刻 200 秒にセンサ端末 11 を情報収集を行うコア端末として設定した．

センサ端末がパケットをブロードキャストしたタイミングを図 7 (a) と 図 7 (b) に示す．図中の Y 軸にはセンサ端末の識別番号をコア端末からのホップ数順に並べており，‘*’ は，別途設置した動作モニタ用のセンサ端末によって当該センサ端末からのパケットを受信した時刻を表している．動作開始後は，センサ端末は位相の異なるタイマに従って他とは無関係なタイミングでパケットをブロードキャストしている．時刻 100 秒でセンサ端末 6 が情報拡散状のコア端末となり新たなセッションを開始すると，コア端末から順に刺激が伝播することによってセ

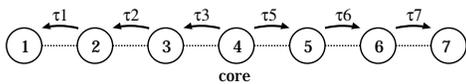


図 8 直線上に並んだセンサ端末のブロードキャストの順序
Fig. 8 Order of broadcasting

ンサ端末のレベル, タイマ位相が適切に設定されていく. その結果, センサ端末 6 からのホップ数の小さいセンサ端末から順にパケットをブロードキャストする, 情報拡散状の通信が時刻 130 秒に達成されている. また, 時刻 200 秒でセンサ端末 11 がコア端末となると, センサ端末 6 をコア端末とした進行波が徐々に崩れ, センサ端末 11 への情報収集状の進行波が形成される. その結果, 時刻 250 秒以降では, センサ端末 11 より遠いセンサ端末から順にパケットをブロードキャストするようになり, センサ端末 11 へセンサ情報が伝搬される.

このように提案機構により進行波が生成されることが確認できた. しかしながら, 本機構では, 同じレベル値を持つセンサ端末が同じタイミングでパケットをブロードキャストするため, 図中に空隙として表されているようにパケットロスが発生し, センサ情報の配送率が低下する. この実験では, 進行波形成後の平均配送率はおよそ 87% であった. また, パケットロスによって進行波の形成に時間がかかると, 通信の応答性の低下, 電力消費の増加などの問題を引き起こす.

B-MAC では, パケット送信に際し, ランダムバックオフの後, キャリア検出を行い, チャンネルが空いている場合にはパケットを送信し, チャンネルが使用中の場合には再度ランダムバックオフを行いパケット送信を試みる. 一定回数バックオフを試行してもチャンネルが空いていない場合は, パケットの送信に失敗する. 複数のセンサ端末が同時にチャンネルの空きを検知してパケットを送信した場合は, パケットが衝突し, 消失する. なお, 本実験では RTS/CTS, MAC 層での再送は行っていない. 実験結果を検証したところ, 最大バックオフ回数 (8 回) に達することによるパケット送信失敗は発生しておらず, パケットロスの原因はパケットの衝突であると考えられる.

4. 進行波現象を利用したセンサネットワーク通信機構の改良と評価

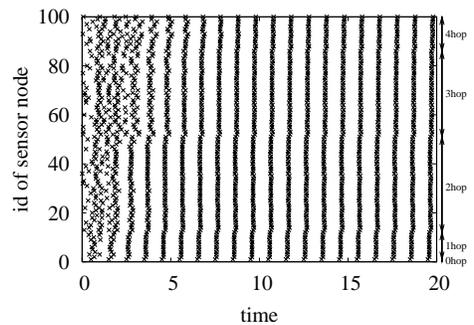
本章ではパケット衝突による性能劣化を抑えるための機構を提案し, その有効性を評価する.

4.1 改良機構

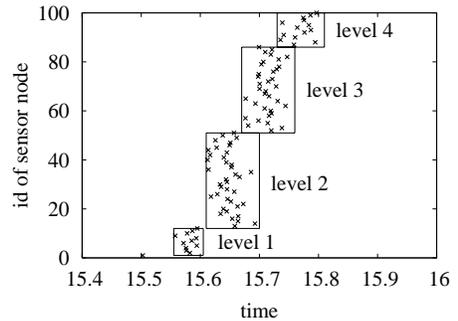
センサ端末 i の持つ PRC を以下のように変更することにより, 同一のレベル値を持つセンサ端末間でブロードキャストのタイミングを分散させる.

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

ただし, $g_i = (1 - \delta_i \tau_i) \bmod 1$ である. τ_i ($\tau_{\min} < \tau_i \leq \tau_{\max} = \tau$) はセンサ端末毎にランダムな値を用いる. 例えば, 図 8 のようにセンサ端末が直線状に並んだセンサネットワークにおいてセンサ端末 4 が情報拡散状のコア端末となった場合, レベル 1 のセンサ端末 3, 5 はセンサ端末 4 のブロードキャストより



(a) 情報拡散のタイミング (時刻 0-20)



(b) 情報拡散のタイミング (時刻 15-16)

図 9 改良機構のシミュレーション評価

Fig. 9 Simulation evaluation of improved mechanism

それぞれ τ_3, τ_5 後にパケットをブロードキャストする.

4.2 改良機構の実験評価

まず, 式 (5) によるブロードキャストタイミング制御の効果をシミュレーションにより確認した. 10×10 の領域に 100 台のセンサ端末をランダムに並べ, センサ端末の無線の送信範囲は 2 とした. センサ端末の初期位相はランダムに与え, PRC のパラメータは前節と同じものを用いた. なお, $\tau_{\max} = 0.1$, $\tau_{\min} = 0.05$ とした. 時刻 0 に領域中央のセンサ端末を情報拡散のコア端末として設定した. この時のセンサ端末のブロードキャストタイミングの変化を図 9 (a) および図 9 (b) に示す. 図 7 と同様に, センサ端末をコア端末からのホップ数順に並び替えている. 図 9 (a) に示されるとおり, コア端末に近いセンサ端末から順番にパケットをブロードキャストする進行波が生成されている. また, 図 9 (a) を拡大した図 9 (b) より, 同じレベル値を持つセンサ端末間でブロードキャストのタイミングが分散していることがわかる.

次に, パケットブロードキャストのタイミングを分散することのパケットロスの改善効果を検証するため, センサ端末数と平均パケットロス率の関係を実験により検証した. いずれもレベル値が 1 となるようにコア端末の近傍にセンサ端末を配置し, センサ端末数を 1 台, 5 台, 10 台と変化した場合の, 100 周期間のパケットロス率を調べた. 結果を図 10 に示す. 図に示される通り, 式 (5) で表される PRC を用いることで, パケットロス率が改善される.

最後に, 図 6 と同じ構成で実験を行った. センサ端末によるパケットブロードキャストのタイミングを図 11 (a) と図 11 (b)

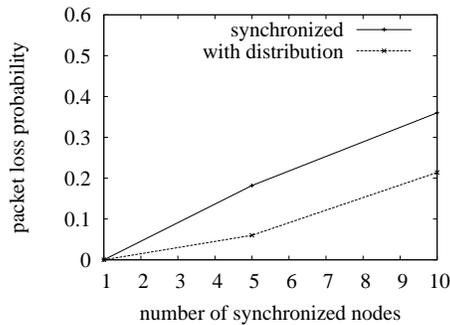
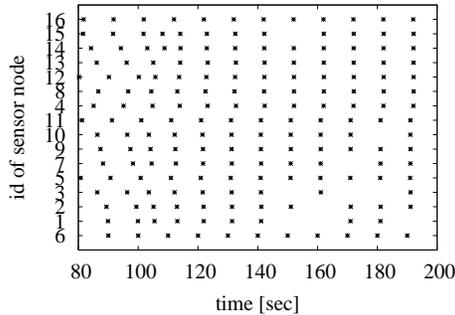
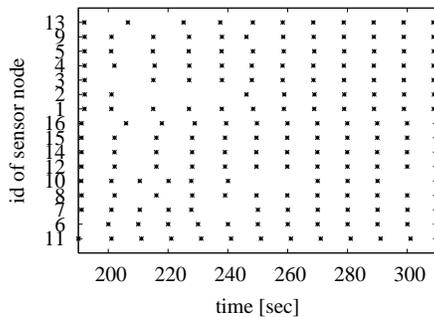


図 10 パケットロス率

Fig.10 Packet loss probability



(a) パケット送信のタイミング (情報拡散)



(b) パケット送信のタイミング (情報収集)

図 11 改良機構の実験評価

Fig.11 Experimental evaluation of improved mechanism

に示す．図 7 (a) および 図 7 (b) と同様に，ブロードキャストのタイミングを分散させても通信形態に応じた進行波が生成されていることがわかる．さらに，パケットロスの発生が抑えられることから，進行波生成後の平均配送率はおよそ 95 % に改善された．

5. おわりに

本稿では，我々の研究グループの提案する進行波現象を利用した通信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 MICAz MOTE への実装と実証実験を行った．さらに，パケット衝突を避けるための機構を提案し，実験によりパケットロス率，センサ情報収集率が改善されることを示した．

本稿の実験では，提案機構の基本動作を検証するため，机上

にセンサ端末を並べ，フィルタによってトポロジを固定している．今後は，センサ端末数の多い大規模な環境，障害物が多い環境，電波環境の悪い環境などより実用的な環境において実験，評価を行い，さらに手法を改良する．

謝辞 本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：ゆらぎプロジェクト」および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] Y. Taniguchi, N. Wakamiya, and M. Murata, "A self-organizing communication mechanism using traveling wave phenomena for wireless sensor networks," in *Proceedings of 2nd International Workshop on Ad Hoc, Sensor and P2P Networks (AHSP 2007)*, pp. 562–569, Mar. 2007.
- [2] R. E. Mirolo and S. H. Strogatz, "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators," *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal*, pp. 1645–1662, Dec. 1990.
- [3] P. Goel and B. Ermentrout, "Synchrony, stability, and firing patterns in pulse-coupled oscillators," *Physica D*, pp. 191–216, Mar. 2002.
- [4] Y.-W. Hong and A. Scaglione, "A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, pp. 1085–1099, May 2005.
- [5] G. Werner-Allen, G. Tewari, A. Patel, M. Welsh, and R. Nagpal, "Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2005)*, pp. 142–153, Nov. 2005.
- [6] A.-S. Hu and S. D. Servetto, "On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 2725–2748, June 2006.
- [7] A. Tyrrell, G. Auer, and C. Bettstetter, "Synchronization inspired from nature for wireless meshed networks," in *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2006)*, pp. 1–4, Sept. 2006.
- [8] 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.
- [9] 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*, pp. 180–195, Feb. 2001.
- [10] "MOTE." available at <http://www.xbow.com/Products/wproductsoverview.aspx>.
- [11] "CC2420 data sheet." available at http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1.4.pdf.
- [12] "IEEE 802.15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)," 2003.
- [13] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004)*, pp. 95–107, Nov. 2004.