

パルス結合振動子モデルにおける進行波状態を応用した センサネットワークのための自己組織型通信機構

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 本稿では、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様々な形態の通信に自律的に適応する通信機構を提案している。提案機構は、パルス結合振動子モデルにおける進行波状態にもとづくことにより、通信のタイミングや周期、形態などを自律的に制御する。シミュレーションによる評価の結果、提案機構を用いることによって、無作為にセンサ端末が配置された環境において効率的な情報収集や情報拡散が行えることを示した。

キーワード センサネットワーク, 進行波状態, パルス結合振動子モデル

A Distributed and Self-organizing Communication Mechanism based on Traveling Wave Phenomena 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 In this paper, we propose a distributed and self-organizing communication mechanism for a wireless sensor network where a large number of sensor nodes are deployed. 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. We considered conditions of a phase-response curve to attain wave-formed message propagation. Through simulation experiments, we confirmed that our mechanism can gather or distribute information effectively in accordance with application's requirements.

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

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 [1]。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、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応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、無作為に配置されたセンサネット

ワークにおける、全てのセンサ端末から基地局への定期的なセンサ情報収集のための電力効率の良い同期型センサ情報収集機構を提案し [2]、シミュレーションや実機を用いた実験によりその有効性を示している。同期型センサ情報収集機構は、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、削除に対する適応性、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。同期型センサ情報収集機構では、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、順次基地局へ同心円状にセンサ情報を転送していく。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の同期を達成するために、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 (pulse-coupled oscillator

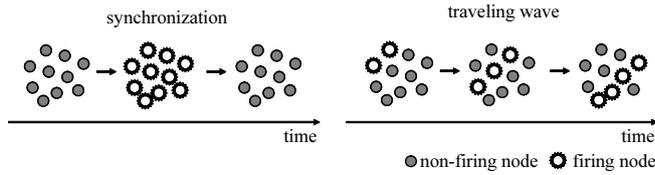


図 1 完全同期状態と進行波状態

model)[3] 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．

しかしながら，アプリケーションによっては，全センサ端末から基地局への周期的な情報収集に限らず，例えば全センサ端末の情報共有など，基地局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や，センサからアクチュエータへの情報伝達など，様々な形態の通信が求められる．そこで本稿では，単純なアルゴリズムで動作するセンサ端末間の局所的な相互作用によってアプリケーションに応じた様々な形態の通信に自律的に適応する通信機構について検討する．提案機構は，文献[4]で述べられているパルス結合振動子モデルにもとづく進行波状態を応用する．進行波状態では，全ての振動子が完全に同期する完全同期状態と異なり，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)．パルス結合振動子の動作を規定する PRC (phase-response curve: 位相反応曲線) や制御パラメータを適切に設定することにより，所望の周期，向き，形状の進行波を発生させることができれば，アプリケーションの要求に応じた形態の通信が自律的に行える．これまでに，文献[5]において，振動子の初期位相を適切に設定することにより，様々な進行波を生成できることを示したが，初期位相の設定誤差，電波干渉などによる位相ずれが生じると所望の進行波を発生，維持することができなかつた．そこで，本稿では，振動子の初期状態によらず所望の進行波を生成するための仕組みについて検討し，センサネットワークにおける通信機構に応用する．

以降，2章では本稿で対象とするパルス結合振動子モデルについて述べ，3章で所望の進行波を生成するための PRC について検討する．4章で進行波状態を応用した通信機構について述べ，5章で述べるシミュレーションにより提案機構の有効性を評価する．最後に6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

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，位相は 0 にもどる．振動子 i が発火すると，結合関係にある振動子 j は刺激を受け，位相が次式により偏移する．

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

$\Delta(\phi)$ を PRC と呼び，例えば，QIF (quadratic integrate-and-fire) モデルでは $\Delta_{\text{QIF}}(\phi) = a(1 - \cos 2\pi\phi)$ ，RIC (radial isochron clock) モデルでは $\Delta_{\text{RIC}}(\phi) = -a \sin 2\pi\phi$ が用い

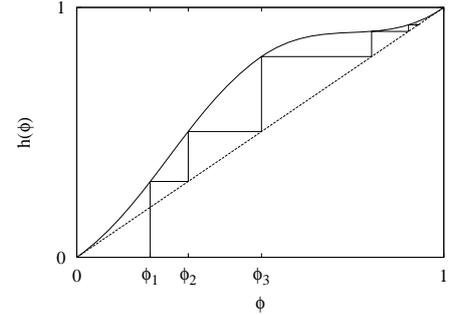


図 2 完全同期状態に達する場合

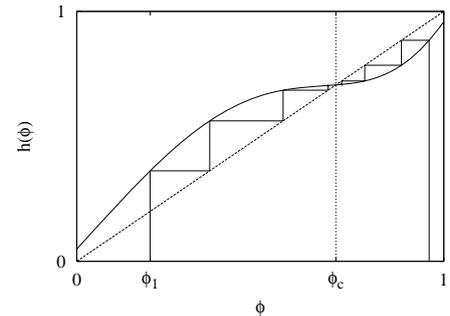


図 3 進行波状態に達する場合

られる[4]．ただし，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[4]，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．

式(1)にもとづく直接的，または間接的な相互作用によって，全ての振動子は完全に同期，あるいは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[6]．位相 ϕ で近隣振動子から刺激を受けた振動子が再び近隣振動子から刺激を受ける時の位相 $h(\phi)$ は図2(QIFモデル)のような形で表される．図中，破線の直線は $\phi = h(\phi)$ を，折れ線は，位相 ϕ_1 の振動子が近隣振動子からの刺激を受け取るたびに徐々に位相を偏移させる様子を表している．位相 ϕ_1 で振動子が刺激を受けると，式(1)により位相が偏移し，位相が ϕ_2 の時に次の刺激を受けようになる．さらに刺激を受けた結果，その次の刺激を受ける位相は ϕ_3 となる．刺激を受けることでいずれ $h(\phi) = 1$ となり，近隣振動子と同時に発火するようになる．一方，PRC によって決まるこれら位相の関係が図3のような形であれば，刺激を受ける瞬間の位相は 0 または 1 以外のある値(図中， ϕ_c)に収束し，近隣振動子の発火との位相差が固定され，進行波となる．

3. 所望の進行波を生成する PRC

本章では，初期位相によらず，所望の進行波を生成するための PRC を導出する．なお，情報収集源あるいは情報拡散源となる振動子をペースメーカーと呼ぶ．情報収集および拡散の周期，タイミングがずれないように，ペースメーカーは近隣振動子からの刺激を受けず，所望の情報収集または拡散の周期，タイミングにあわせて一定の間隔で発火するものとする．

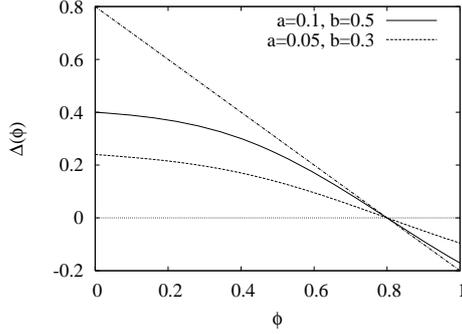


図4 式(5)で記述されるPRC Δ_2

3.1 振動子が直線状に並ぶ場合

直線状に並ぶ1個のペースメーカーと N 個の振動子において、ペースメーカーが発火した後、間隔 τ 毎に振動子1, 振動子2, ..., 振動子 N が順に発火する形状の進行波について考える。ただし、 $0 < \tau < 1$ とする。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。ペースメーカーは一定の時間間隔 1 で発火を繰り返すものとする。

まず、進行波状態における振動子の位相の推移を考える。位相 ϕ の振動子が刺激を受けた直後の位相を $F(\phi) = \phi + \Delta(\phi)$ とする。また、振動子 i ($1 \leq i \leq N$) は発火した t 後に振動子 $i-1$ から (振動子1はペースメーカーから) 刺激を受けるものとする。刺激を受けた振動子は τ 後に発火するが、進行波状態において、振動子はペースメーカーと同じ時間間隔 1 で発火を繰り返すことから、 $t + \tau = 1$ である。また、間隔 τ で発火するためには、刺激を受けた振動子の位相は $1 - \tau$ であるので、 $F(t) = 1 - \tau$ が成立する。したがって、 $F(\phi) = \phi + \Delta(\phi)$ に注意して展開すると、次式が得られる。

$$\Delta(1 - \tau) = 0 \quad (2)$$

振動子の初期位相によらず所望の進行波が得られるようにするためには、式(2)を満たしつつ、刺激を受け取った後の振動子の位相 ϕ が $1 - \tau$ に近付くようなPRCを用いるとよいと考えられる。すなわち、刺激を受け取った後の位相が $1 - \tau$ に近付くよう、自身の位相 ϕ が $0 \leq \phi < 1 - \tau$ で刺激を受け取った時には位相を進め、 $1 - \tau < \phi < 1$ で刺激を受け取った時には位相を戻すよう、PRCが次式を満たせばよい。

$$\begin{cases} 0 < \Delta(\phi) \leq 1 - \tau - \phi & (0 \leq \phi < 1 - \tau) \\ \Delta(\phi) = 0 & (\phi = 1 - \tau) \\ 1 - \tau - \phi \leq \Delta(\phi) < 0 & (1 - \tau < \phi < 1) \end{cases} \quad (3)$$

例えば、

$$\Delta_1(\phi) = b(1 - \tau - \phi) \quad (4)$$

$$\Delta_2(\phi) = a \sin \frac{\pi}{1 - \tau} \phi + b(1 - \tau - \phi) \quad (5)$$

などが考えられる。式(5)で記述されたPRCを図4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。

進行波状態が達成されると、ペースメーカーが発火した後、振動子は間隔 τ 毎に振動子1, 振動子2, ..., 振動子 N の順に

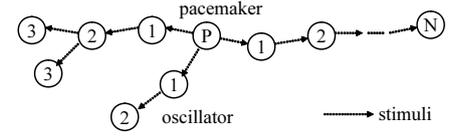


図5 振動子が平面状に並ぶ場合

発火していくが、これは、間隔 $1 - \tau$ 毎に振動子 N , 振動子 $N - 1, \dots$, 振動子1, ペースメーカーの順に振動子が発火していくとみなすことができる。すなわち、 $\tau < 0.5$ 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 で発火していく拡散状の、 $\tau > 0.5$ であれば、振動子 N からペースメーカーに向かって間隔 $1 - \tau$ で発火していく収集状の進行波が発生する。

3.2 振動子が平面状に並ぶ場合

振動子が平面状に並ぶ場合には、図5のように、ペースメーカーを起点としたスパニング木にあわせて刺激を与えるようにすれば、直線状の場合と同じPRCを用いて所望の進行波を生成することができる。なお、図中、円は振動子を表し、矢印は刺激を与える関係を表す。Pはペースメーカー、数字は振動子のペースメーカーからの距離(ホップ数)である。

4. 進行波状態を応用した通信機構

本章では、パルス結合振動子モデルにおける進行波状態を応用したセンサネットワーク通信機構を提案する。提案機構では、任意のセンサ端末が情報の拡散源または収集源となる。これをコア端末と呼び、センサネットワーク内で同時に高ター台のコア端末がアプリケーションの要求する期間、通信を行う。

センサ端末 i ($1 \leq i \leq N$) は、センサとタイマを有し、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), およびオフセット τ ($0 < \tau < 0.5$) を持つ。PRC Δ は、前節で述べた式(5)を元に例えば次式を用いる。

$$\Delta(\phi) = a \sin \frac{\pi}{g} \phi + b(g - \phi) \quad (6)$$

ただし、 $g = (1 + \delta_i \tau) \bmod 1$ である。 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 -1 , 情報拡散の場合 1 と設定される。センサ端末は自身のタイマ位相が1になるよりオフセット τ だけ早く起動し、その間受信したメッセージを処理し、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。その後、さらに τ だけ待ち、その間受信したメッセージを必要に応じて処理した後、スリープする。オフセット τ は、前段、後段のセンサ端末からの電波の衝突を考慮したメッセージ受信成功率と、スリープによるセンサネットワークの運用期間の伸張のトレードオフにもとづき、決定する。

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、レベル値 l_i , パラメータ δ_i , およびセッション識別子 s_i が含まれる。なお、コア端末はレベル値として0を、自身がコア端末になる以前のセッション識別子に1を加えたものを用いる。

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ると、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 、パラメータ 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 $l_i = l_j + 1$ とし、刺激を受ける。刺激を受けたセンサ端末 i は PRC にもとづいて位相を偏移させる。なお、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刺激を受けない。さらに、レベル値 $l_j = l_i - \delta$ 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。

運用当初はセンサ端末は常に無線送受信機の電源を入れているが、進行波状態を確立した後は、位相が τ から $1 - \tau$ の間はスリープを行う。ただし、位相 τ において他のセンサ端末からメッセージを受信しなかった場合には、進行波状態が失われたものと判断し、再度、進行波状態が確立されるまで受信機の電源を入れ続ける。

5. シミュレーションによる評価

提案機構の動作をシミュレーションによって確認した。10 × 10 の領域に 100 個のセンサ端末をランダムに配置した。なお、センサ端末のブロードキャスト半径は全て等しく 2 とした。初期位相は 0 から 1 の間でランダムに与え、PRC としては式 (6) を用いた。ただし、 $a = 0.01$ 、 $b = 0.5$ 、 $\tau = 0.1$ とした。時刻 0 から時刻 20 に、あるセンサ端末 A を情報拡散を行うコア端末とし、時刻 20 から時刻 40 に異なるセンサ端末 B を情報収集を行うコア端末とした。

図 6 にセンサ端末がメッセージをブロードキャストするタイミングを点で示す。なお、見やすさのため、それぞれの期間において、センサ端末をコア端末からのホップ数順に並べ替えている。時刻 0 でセンサ端末 A がコア端末となつてからしばらくの間は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メッセージを発信しているが、刺激を受けることにより次第にレベル、位相が適切に設定される。その結果、センサ端末 A からのホップ数の小さいセンサ端末から順にメッセージをブロードキャストする情報拡散状の通信が達成されている。また、時刻 20 でセンサ端末 B がコア端末となつてからも同様に、時間の経過に伴い、ホップ数の大きいセンサ端末からメッセージをブロードキャストする情報収集状の通信を達成している。

6. おわりに

本稿では、全てのセンサ端末から情報収集源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、アプリケーションの要求に応じた形態の通信に自律的に適応する通信機構を提案した。また、シミュレーション評価により、動作を確認した。

本稿での評価は理想的な通信環境を想定しているが、実際のセンサネットワークでは、センサ端末の追加、故障、除去、あるいは、不安定、非対称な無線リンクなどによりネットワークトポロジは動的に変化する。今後、そのような環境で提案機構を評価、改良するとともに、実機を用いた実装実験を行う。

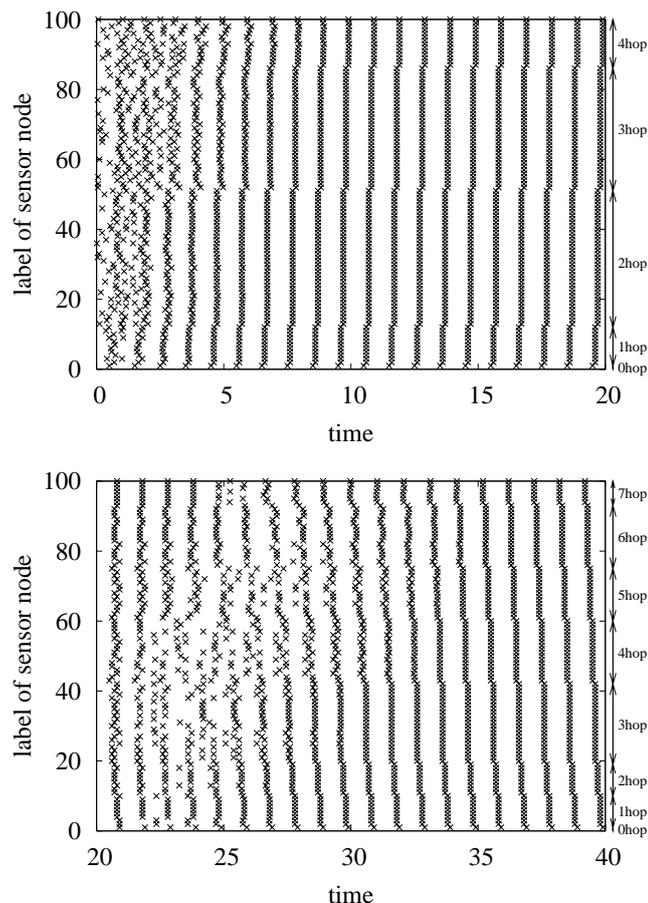


図 6 センサ端末の情報送信のタイミング

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. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks (Elsevier) Journal*, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [2] 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.
- [3] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators," *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal*, pp. 1645–1662, Dec. 1990.
- [4] P. Goel and B. Ermentrout, "Synchrony, stability, and firing patterns in pulse-coupled oscillators," *Physica D*, pp. 191–216, Mar. 2002.
- [5] Y. Taniguchi, N. Wakamiya, and M. Murata, "A distributed and self-organizing data gathering scheme in wireless sensor networks," in *Proceedings of APSITT 2005*, pp. 299–304, Nov. 2005.
- [6] 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.