

パルス結合振動子モデルにもとづく段階的同期による ネットワーク協調手法の提案と評価

山本 宏[†] 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: †{hirosi-y,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし アンビエント情報社会において、ユーザのおかれる環境や状況に応じた適切な情報サービス、環境制御を提供するためには、それぞれ独立に動作する複数のセンサネットワークが動的に繋がりがあ、協調して動作することが求められる。しかしながら、センサネットワークの動作周期は、それぞれのセンサネットワークが提供するアプリケーションの要求により決定されるため、センサネットワーク間で異なる場合が多く、双方の動作に大きな影響を与えることなくメッセージをやりとりする仕組みが必要となる。そこで本稿では、動作周期の異なる複数のセンサネットワーク間で効率的な通信を実現するための、パルス結合振動子モデルにもとづく自律的な段階的同期機構を提案する。提案手法の有効性を、計算機シミュレーションによって評価し、ノード間での電力消費の偏りを抑え、システム稼働時間をおよそ7.5%延長できることを確認した。

キーワード センサネットワーク, 段階的同期, パルス結合振動子モデル

Proposal and evaluation of an inter-networking mechanism using stepwise synchronization for wireless sensor networks

Hiroshi YAMAMOTO[†], Naoki WAKAMIYA[†], and Masayuki MURATA[†]

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

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

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

Abstract To realize the ambient information society, multiple wireless networks deployed in the region or carried by users are required to cooperate with each other. Since duty cycles and operational frequencies are different among networks, we need a mechanism to allow networks to efficiently exchange messages. In this paper, we propose a novel inter-networking mechanism where two networks are synchronized with each other in a moderate manner, which we call stepwise synchronization. With our proposal, nodes at the border of networks adjust their operational frequencies in a stepwise fashion to bridge the gap between intrinsic operational frequencies. For this purpose, we adopt the pulse-coupled oscillator model as a fundamental theory of synchronization. Through simulation experiments, we show that the operational time is prolonged by about 7.5%.

Key words Wireless Sensor Network, Stepwise Synchronization, Pulse-Coupled Oscillator Model

1. はじめに

アンビエント情報社会においては、例えば、建物に敷設された様々なセンサ群によって構成されるセンサネットワークとユーザが身につけているセンサや機器によって構成されるセンサネットワークが協調することによって、ユーザのおかれた環境や状況、ユーザの要求に応じた情報サービスや、職住環境制

御が提供される。そのため、それぞれ独立に動作する複数のセンサネットワークが状況に応じて繋がりがあ、協調して動作することが求められる。しかしながら、動作周期をはじめとする運用ポリシーの異なるネットワーク間の円滑な協調を実現することは容易ではない。

一般的にセンサネットワークは省電力化のために間欠制御を行っており、その動作周期は、アプリケーションによって定め

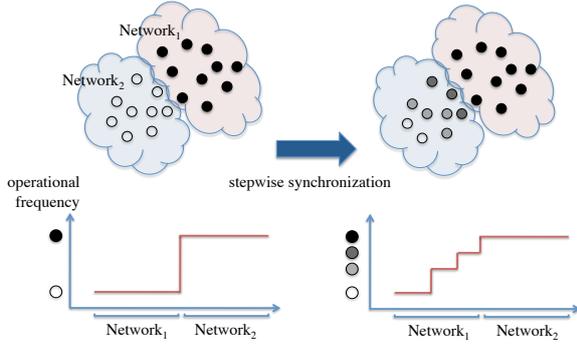


図1 センサネットワーク間での段階的同期

られるセンシング頻度、電力消費やセンシング能力などのデバイス特性などから決定されるため、協調しようとするネットワーク間でも異なる場合が多い。このように動作周期の異なるネットワーク間では、何らかの制御なしには、データの送受信タイミングが合わず、情報のやりとりがうまく行えない。一方のネットワークの動作周期を一時的に他方の動作周期に合わせることも可能ではあるが、電力効率やアプリケーションの観点から現実的ではない。たとえば、S-MAC [1] や X-MAC [2] のような省電力 MAC プロトコルを利用したとしても、周期の短いネットワークから周期の長いネットワークへの通信を行うときには、受信側ノードが受信可能状態になるまでの待機時間が長くなり、元々の動作周期を乱す上に非効率的である。

我々の研究グループでは、動作周期の異なるセンサネットワークが複数共存する環境において、それぞれのセンサネットワークができる限り本来の動作周期を維持しつつ、センサネットワーク間で効率的な通信を実現するための手法として、センサネットワーク間での段階的同期について検討している [3]。段階的同期では、動作周期の異なるセンサネットワークに属するすべてのノードが、ある一つの動作周期に同期するのではなく、これらのネットワークの境界付近に位置するノード群が境界からの距離にあわせて段階的に動作周期を変更する (図 1)。このような段階的同期によって、隣接ノード間での動作周期の差を小さくし通信の効率化を図る一方で、動作周期の変更を必要とされるノード数を抑えることができる。このような段階的同期を実現するため、本稿では、蛍の群れの明滅同期現象を説明する非線形数理モデルであるパルス結合振動子モデルをネットワーク間での動作周期制御に応用した。提案手法では、ネットワークの境界からの距離によってパルス結合振動子モデルのパラメータを変更することによって段階的同期を達成する。

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 章でパルス結合振動子モデルにもとづいたネットワーク間での段階的同期手法について述べる。4 章においてシミュレーション評価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

パルス結合振動子モデルは、蛍の群れの明滅同期現象を刺激による振動子間の相互作用によって説明する数理モデルであ

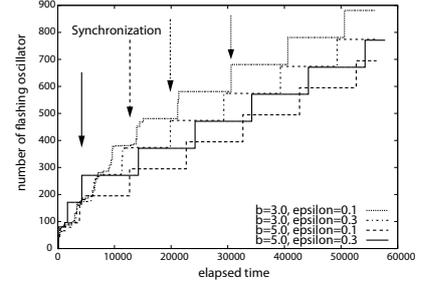


図2 パラメータの違いに対する同期速度の違い

る [4]。文献 [4] では、振動子 i は、タイマ位相 ϕ_i ($0 \leq \phi_i \leq 1$) とタイマ位相から決定される状態 x_i ($0 \leq x_i \leq 1$) を持つ。タイマ位相は時間経過とともに式 (1) にしたがって、線形に増加し、1 に達すると 0 に戻る。

$$\frac{d\phi_i}{dt} = F_i \quad (1)$$

F_i は振動子 i の固有振動数を表す。状態 x_i はタイマ位相 ϕ_i をもとに式 (2) のような非線形関数によって求められる。

$$x_i = \frac{1}{b} \ln[1 + (e^b - 1)\phi_i] \quad (2)$$

式 (2) において係数 b は、刺激による相互作用の強さに影響する定数である。

タイマ位相 ϕ_i および状態 x_i がともに上限である 1 に達すると、振動子 i は発火して、タイマ位相と状態をともに 0 に戻す。振動子 j が発火した振動子 i と結合関係にある場合、振動子 j は、式 (3) にしたがって状態 x_j を微量 ϵ だけ偏移させるとともに、式 (4) にしたがってタイマ位相 ϕ_j の値を更新する。

$$x_j(t^+) = B(x_j(t) + \epsilon), \quad (3)$$

$$\phi_j(t^+) = \frac{e^{bx_j(t^+)} - 1}{e^b - 1} \quad (4)$$

ただし、 $B(x)$ は次式で与えられる。

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

刺激を受けることによって振動子 j のタイマ位相 ϕ_j および状態 x_j が 1 に達すると、振動子 j も振動子 i と同様に発火する。この時、時刻 t において振動子 i, j 間での同期が達成されたとみなす。このような発火による刺激を相互に与えあうことにより、振動子群全体が同期し、同じタイミングで発火するようになる。ただし、ある時刻 t において、発火した振動子は他の振動子の発火に刺激を受けず、また、ある振動子が複数の刺激を受け取ったとしても 1 つの刺激とみなすものとされている。

図 2 に、100 台の振動子からなるネットワークにおいて、係数 b および偏移量 ϵ を変えた場合の、発火した振動子数の累積値の変化を示す。 b と ϵ がそれぞれ 3.0, 0.1 の場合、累積発火振動子数が時間とともに徐々に増加した後、時刻 30,000 あたりで累積発火振動子数の瞬時増加数が振動子数に等しくなっ

おり、全体同期が達成されていることが分かる。また、図2より、 b や ϵ が大きいほど、全体同期を達成するまでの時間が短くなる事が分かる。

3. パルス結合振動子モデルにもとづくネットワーク間での段階的同期

本章ではパルス結合振動子モデルにもとづくネットワーク間での段階的な同期を達成する制御手法を提案する。提案手法では、異なる動作周期で動作するセンサネットワークが隣接して複数存在し、それぞれのセンサネットワークに属するノードはすべて同一の動作周期に同期して動作している環境を想定する。アクティブ状態にあるノードは、通信範囲にある他のアクティブ状態にあるノードと通信可能であるものとする。また、ノードはネットワークの境界からの距離またはホップ数を取得、認識可能であるものとする。

ネットワーク間での段階的同期を実現するために、パルス結合振動子モデルにおいて、 b の値を大きく設定するにしがって、同期速度が速くなり、また、 ϵ の値を大きくすることによって、刺激に対して状態 x_i が大きく変化するようになり、刺激を受けると同時に発火しやすくなることを利用する。具体的には、それぞれのネットワークにおいて、最もネットワークの境界に近いノードのパラメータ b 、 ϵ を大きな値に設定することによって、動作周期の長いネットワークの境界に位置するノードの動作周期を、他方のネットワークの動作周期に近づける。一方で、2つのネットワークが完全に同期してしまわないよう、ネットワークの境界から離れるにしがたい、パラメータ b 、 ϵ を小さい値に設定する。なお、制御に対称性を持たせるため、動作周期の短いネットワークのノードもパラメータを変更しているが、パルス結合振動子モデルにもとづく同期では、動作周期の長いネットワークが一方向的に引き込まれるため、動作周期の短いネットワークのノードの動作周期はほとんど変わらない。

提案手法におけるノードの動作は次の通りである。ノード i はタイマ位相 ϕ_i と状態 x_i 、および動作周期 F_i を管理しており、タイマ位相 ϕ_i 、状態 x_i の値はノードの稼働状態によらず式(1)、(2)にしたがって変化する。タイマ位相 ϕ_i および状態 x_i が1に達したとき、ノード i は発火して、隣接ノードに対して刺激メッセージをCSMAによりブロードキャスト送信する。ここで、第 n 回目の発火から第 $n+1$ 回目の発火までの時間を、第 n 回目の周期と呼び、その長さを T_i^n と表記する。ノード i が第 n 回目に発火すると、第 $n-1$ 回目の動作周期 T_i^{n-1} とデューティ比 *DutyRatio* によって定められる時間 $T_{sleep}^n = T_i^{n-1} \times (1 - \text{DutyRatio})$ だけスリープ状態になる。なお、スリープ状態では隣接ノードからの刺激メッセージを受信しないが、タイマ位相は進むものとし、ノードがスリープ状態にあるときに、タイマ位相が1に達すると、ノードはすぐにアクティブ状態へ移行し、発火して、刺激メッセージを送信するものとする。 T_{sleep}^n 時間経過すると、ノード i はアクティブ状態に移行し、刺激やセンサデータを送受信可能になる。アクティブ状態のノード i は、刺激メッセージを受け取ると、タイ

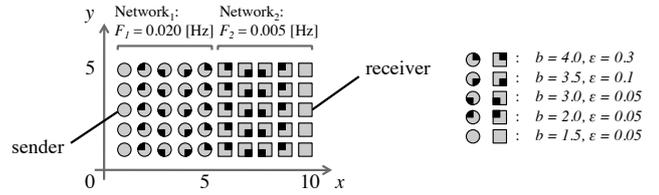


図3 ノード配置とパルス結合振動子モデルのパラメータ設定

マ位相 ϕ_i 、状態 x_i の値を式(3)、(4)にしたがい、更新する。その結果、ノード i のタイマ位相 ϕ_i 、状態 x_i が1に達すると、ノード i はすぐに刺激メッセージをブロードキャスト送信して、スリープ状態に移行する。

ノードは、アクティブ状態において、X-MACを用いてセンサデータの送受信を行う。X-MACでは、アクティブ状態にあるノードは、時間 R_s ごとに受信機を動作させ、時間 R_l の間、自身宛のメッセージの有無を確認する。メッセージを送信したいノードは、Short Preambleと呼ばれる受信依頼メッセージを連続送信し、受信ノードからのAckの受信を待つ。ノードは、自身宛のShort Preambleを受信すると、送信ノードにAckを送り、送信ノードはメッセージの送信を開始する。X-MACにもとづいて間欠制御を行っているノードが刺激メッセージを受信できるよう、刺激メッセージのブロードキャスト送信は、X-MACにおける受信機の動作間隔 R_s の間、連続的に行われるものとした。ただし、同期達成時には複数のノードがほぼ同時に発火し、刺激メッセージのブロードキャスト送信を開始するため、発火時刻から時間 R_s の間、チャンネルが空かず刺激メッセージをブロードキャスト送信できなかった場合は、刺激メッセージは送信されることなく破棄されるものとし、CSMAの送信待ちによる刺激の遅延を避けた。なお、本稿では、ネットワークの境界からの距離と設定されるパラメータの関係は、予備評価を行い、その結果にもとづいて決定したものを用いた。

4. シミュレーション評価

4.1 シミュレーション設定

提案手法の動作をシミュレーションによって確認した。50台のノードを 10×5 の格子状に配置し、左側をネットワーク1(動作周波数 F_1)、右側をネットワーク2(動作周波数 $F_2 < F_1$)とした。初期状態においては、ノードはそれぞれのネットワークにおいて、パルス結合振動子モデルにもとづいて同期して動作している。シミュレーションに用いたパラメータ設定を図3に示す。X-MACに関する設定は、 $R_s = 500[\text{ms}]$ 、 $R_l = 20[\text{ms}]$ とし、Short Preambleおよびデータ、Ackの送受信にかかる時間はいずれも $2[\text{ms}]$ とした。デューティ比 *DutyRatio* はノードによらず0.3とした。また、無線通信の伝播遅延は $0.01[\text{ms}]$ とした。センサデータは図3中の送信ノードsenderにより、10周期($10 \times 1/F_1 = 500[\text{s}]$)に1回ずつ生成され、受信ノードreceiverに向けて送信される。送信されたセンサデータは送受信ノード間を直線上に、隣接ノード間でのマルチホップ通信により伝送される。

シミュレーションでは、ホップごとの通信遅延の中央値、ノー

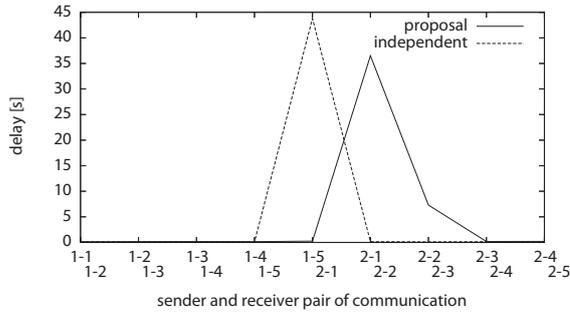


図4 ホップごとの通信遅延の中央値

ドごとの1時間あたりの平均消費電力, および, いずれかのノードの残余電力がなくなるまでの平均時間について評価した. 電力モデルとしては, プロセッサとして Atmel 社製 ATmega128L, 無線チップとして Texas Instruments 社製 CC2420 を搭載し, AA 電池を2本用いたセンサノードを想定し, 表1に示すように電力を消費するものとした.

4.2 シミュレーション結果

まず, シミュレーションを通して行われたセンサデータの通信における, ホップごとの通信遅延の中央値を図4に示す. 図4において, ノード1-1からノード1-5は動作周期の短いネットワーク1に属するノード, ノード2-1からノード2-5は動作周期の長いネットワーク2に属するノードであり, ノード1-5とノード2-1がそれぞれのネットワークの境界に位置するノードである. また, 横軸において, 上段が送信元のノードを, 下段が送信先のノードを表している. 図4から, ネットワーク間で段階的同期を行わない“independent”では, 同一のネットワークに属するノード間での通信にかかる遅延は, いずれのホップにおいても非常に短い一方で, ネットワーク1とネットワーク2の境界ノード間の通信には, 境界ノード1-5における境界ノード2-1の起動待ちのため, 45秒の遅延がかかることが分かる. 一方で, 提案手法を適用した場合は, 段階的同期により, ノード間で動作周期の差が生まれることから, ネットワーク2内の通信遅延が増加している一方で, 境界ノード間の通信にかかる遅延を小さく抑えられていることが分かる.

次に, センサデータの通信経路上に位置するノードについて, ノードごとの1時間あたりの消費電力を図5に示す. 図5から, “independent”では, それぞれのネットワーク内ではノードの消費電力が一定である一方で, ネットワーク1の境界ノード1-5では, 境界ノード2-1の起動待ちのため, 1時間あたり10.5 [mAh]の電力を消費することが分かる. 一方, 提案手法を適用した場合は, 段階的同期によりネットワーク2内のノードにおける消費電力が増加する一方で, ノード1-5の消費電力をおよそ9.0 [mAh]に抑えられていることが分かる. そのため, システムの稼働時間は, 段階的同期を行わない場合はおよそ7.9日, 提案手法を適用した場合はおよそ8.5日となり, 7.5%程度延長できる.

5. おわりに

本稿では, 異なる動作周期で動作する複数のセンサネット

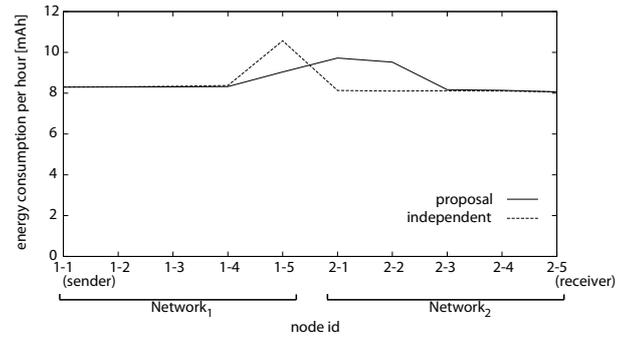


図5 1時間あたりの消費電力

表1 電力モデル

パラメータ	値
初期電力	2000 [mAh]
プロセッサ アクティブ時電流	8 [mA]
スリープ時電流	15 [uA]
無線チップ送信時電流	9.2[mA]
待受・受信時電流	19.7 [mA]

ワーク間で効率的な通信を実現するために, ネットワークの境界付近に位置するノードがネットワークの境界からの距離にあわせて動作周期を変更することによって, 隣接ノード間での動作周期の差を小さくしつつ, 動作周期の変更を必要とするノード数を抑える段階的同期機構を提案した. 提案手法では, 段階的同期を達成するために, パルス結合振動子モデルを応用し, 自律分散的な制御を実現している. 提案手法の有効性を, 計算機シミュレーションによって評価し, ノード間での電力消費の偏りを抑え, システム稼働時間をおよそ7.5%延長できることを確認した. 一方で, 段階的同期によって, ネットワーク内に位置するノード間で動作周期に差が生まれ, これらのノードにおける消費電力が増加することを確認した. 今後の課題として, ネットワーク内に位置するノードにおける消費電力を抑えることが必要である.

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) の補助によるものである. ここに記して謝意を表す.

文 献

- [1] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin: “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), New York, USA, pp. 1567–1576 (2002).
- [2] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson and R. Han: “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks”, Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Boulder, USA, pp. 307–320 (2006).
- [3] N. Wakamiya and M. Murata: “Dynamic Network Formation in Ambient Information Networking”, Proceedings of the 1st International Workshop on Sensor Networks and Ambient Intelligence (SeNAM), Dunedin, New Zealand, pp. 443–448 (2008).
- [4] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz: “Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators”, SIAM Journal on Applied Mathematics, **50**, 6, pp. 1645–1662 (1990).