

無線センサネットワークの協調のための パルス結合振動子モデルにもとづく段階的同期手法の提案と評価

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 アンビエント情報環境では、環境に存在する複数のネットワークが、状況に応じて相互に情報交換や協調動作し、環境制御や情報サービス提供を行うことが求められる。しかしながら、センサネットワークの動作周期はアプリケーションの要求により決定されるため、双方の動作に大きな影響を与えることなく動作周期の異なるセンサネットワーク間で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の効率的な通信を実現するための段階的同期手法を提案する。提案手法では、パルス結合振動子モデルにもとづき、それぞれのネットワークの境界付近に位置するノードが境界からの距離に応じて動作周期を変更することによって、多くのノードの動作周期を維持したまま、ネットワーク間の動作周期の差を埋めるような段階的な同期が自己組織的に達成される。シミュレーション評価により、提案手法によって、ネットワーク間の動作周期の差によらず、制御情報の棄却がある場合にも、段階的な同期が達成されることを確認した。

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 a stepwise synchronization-based inter-networking mechanism 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 multiple wireless 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 frequency in a stepwise fashion to bridge the gap between intrinsic operational frequency. For this purpose, we adopt the pulse-coupled oscillator model as a fundamental theory of synchronization. Through simulation experiments, we show that the stepwise change in operational frequency emerges in spite of the difference of operational frequency between networks and the existence of packet loss.

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状況に応じて繋がりあい、メッセージを交換し、協調して動作することが必要となる。しかしながら、

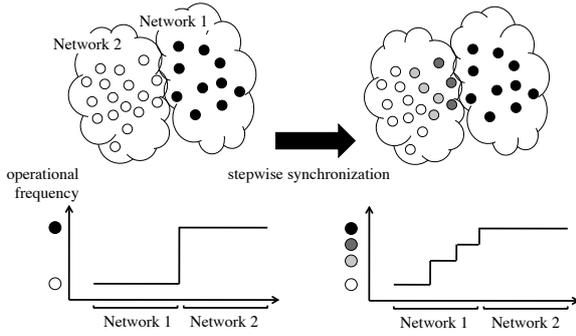


図1 センサネットワークの段階的同期

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られるセンシング頻度や、電力消費、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異なる場合が多い。このような動作周期の異なるネットワーク間で通信を行う場合、特に、動作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メッセージ送信時には、送信側ノードは、受信側ノードが起動して受信可能状態になるまで送信を待機しなければならない。たとえ S-MAC [1] や X-MAC [2] のような省電力 MAC プロトコルによって待機中の電力消費の抑制を図ったとしても、元々の動作周期を乱す上に非効率的である。また、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あわせることも可能であるが、電力効率やアプリケーション動作の観点からは現実的ではない。

したがって、異なるネットワーク間の協調のためには、双方の本来の動作に大きな影響を与えることなく効率的な情報のやりとりを可能にする方法が必要である。このような制御を行う手法として [3] ではオーバーレイネットワークを利用した動作周期の異なるセンサネットワークの結合、融合について、[4] ではオーバーレイ技術による無線ネットワークの協調について提案されているが、無線ネットワーク間の相互作用による動的な協調機構に関する研究は知る限りまだ無い。

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存在する環境において、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 [5]。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完全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て通信の効率化を図る一方で、動作周期の変更を必要とするノード数を抑えることができる。そのため、[5] では、センサネットワークにおけるノード間の自律的な同期制御に用いられるパルス結合振動子モデルにもとづき、段階的

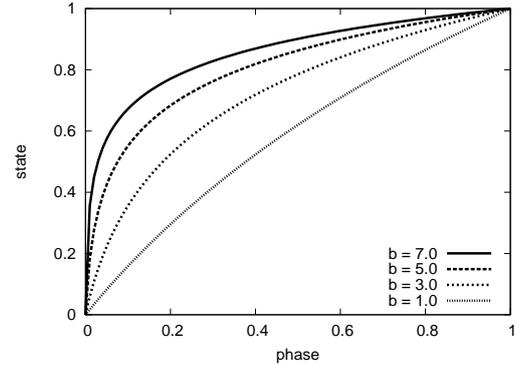


図2 係数 b と位相状態関数

同期を実現する手法を提案しており、シミュレーション評価によって消費電力の削減、動作周期の短いセンサネットワークの長寿命化の効果があることが示されている。しかしながら、[5] では、制御情報の棄却のない理想的な環境における提案手法の有効性のみを評価しており、また、ネットワーク間の動作周期の差の影響についても検証していない。そこで、本稿では、段階的同期を行うネットワーク間の動作周期の差に対する提案手法の適応性、およびパケット棄却に対する提案手法のロバスト性を評価した。

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、続く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、パルスによって相互作用する振動子間の同期の非線形数理モデルである [6]。振動子 i ($1 \leq i \leq N$) 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 の固有周波数を表す。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 ($b > 0$) は、振動子間の相互作用の強さを定める定数である。係数 b と関数の関係を図 2 に示す。

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。

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

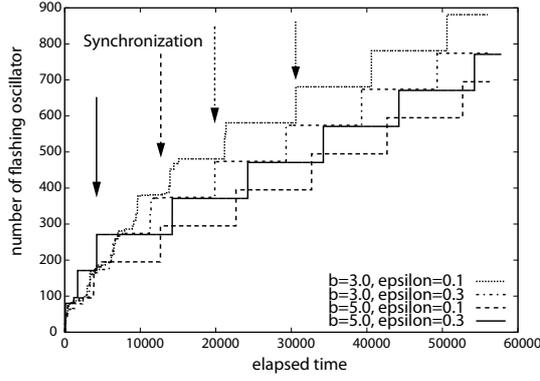


図3 パラメータの違いによる同期速度の違い

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

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。

図 3 に、初期位相をランダムに設定した 100 個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、発火した振動子の累積数の変化を示す。なお、振動子の固有周波数はすべて等しいものとした。図 3 から、振動子間での同期が達成された時刻はそれぞれ、“ $b = 3.0, \epsilon = 0.1$ ” の場合はおよそ時刻 30,000, “ $b = 3.0, \epsilon = 0.3$ ” の場合はおよそ時刻 20,000, “ $b = 5.0, \epsilon = 0.1$ ” の場合はおよそ時刻 13,000, “ $b = 5.0, \epsilon = 0.3$ ” の場合はおよそ時刻 4,000 である。この結果から、係数 b および偏移量 ϵ の値を大きくするにつれて、同期速度が速くなることが分かる。なお、図 3 では、刺激の伝搬遅延や棄却のない理想的な環境を想定しているが、パルス結合振動子モデルでは、伝搬遅延や棄却があった場合でも同期が達成されることが確認されている [7] [8]。

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、[5] において提案したパルス結合振動子モデルにもとづく段階的同期手法について述べる。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、または重なりあって複数存在する環境を考える。協調する前の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ネットワーク固有の同一の動作周期に同期しており、動作周期にしたがってアク

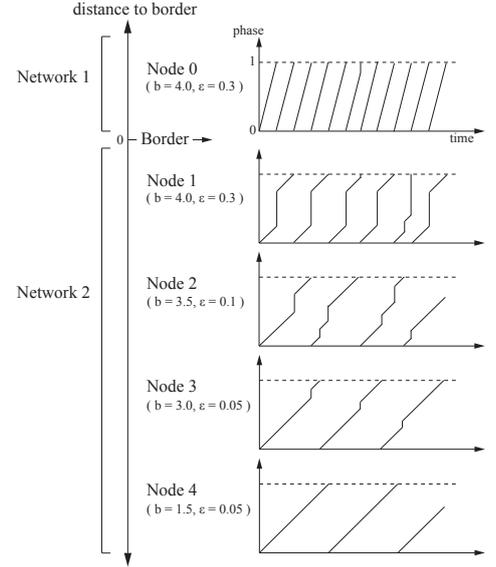


図4 パルス結合振動子モデルにもとづく段階的同期の位相変化

ティブ状態とスリープ状態を遷移する。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。

3.1 概要

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、パラメータ b および ϵ の大きさによって、刺激による相互作用の強さと同期速度が変化することを利用する。パルス結合振動子モデルでは、 b の値が大きくなるにしたがって位相が小さいときの刺激に対する位相の変化量が大きくなり、また、 ϵ の値が大きくなるにしたがって刺激を受けた際に発火しやすくなる。その結果、図 3 に示したとおり、パラメータ b または ϵ が大きくなると同期への引き込みが強くなり、早く同期するようになる。そこで、それぞれのネットワークにおいて、ネットワーク間の境界への近さに応じてパラメータ b, ϵ の大きさを変化させることによって、動作周期の変化の度合いを調整し、段階的同期を実現する。具体的には、最もネットワーク間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、境界から離れるにしたがい、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動作周期の短いネットワークに強く引き込まれる一方で、動作周期の短いネットワークに対する引き込みは弱いため、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。

動作周期の異なる 2 つのネットワークが、提案手法にもとづいて段階的な同期を達成した場合の位相変化の様子を図 4 に示す。なお、ネットワーク 1 の動作周期がネットワーク 2 の動作周期よりも短い。図 4 において、ネットワーク 2 の境界に位置

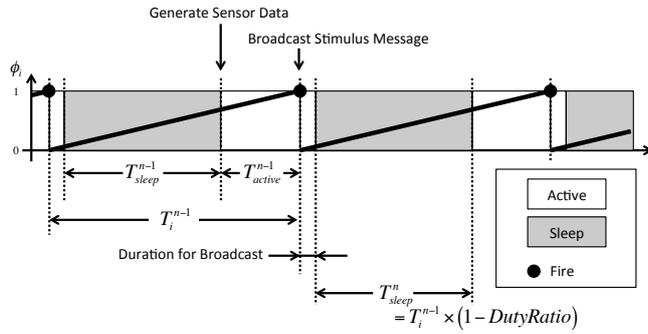


図5 提案手法におけるスリープ制御

するノード1は、 b , ϵ の値を“ $b = 4.0$, $\epsilon = 0.3$ ”と大きく設定している。その結果、ネットワーク1のノード0から受けた刺激に対して大きく状態 x_1 が偏移し、発火しやすくなるため、ノード1は、発火の間隔が短くなり、見かけの動作周期、すなわち位相が1になる間隔が短くなる。また、本来の動作周期よりも頻りにノード1の発火の刺激を受けることにより、ノード2の動作周期も短くなるが、パラメータ b および ϵ をノード1よりも小さく設定しているため、同期状態への引き込みは弱く、その変化量は小さい。さらに、ノード3は、ノード2からの刺激を受けるが、パラメータ b および ϵ がより小さいため、動作周期はあまり変化しない。ノード4は境界から離れているため、境界からの刺激の影響をほとんど受けず、本来の動作周期で動作している。このように、ネットワーク間の境界からの距離に応じてパラメータ b および ϵ を設定することによって、動作周期の変化量を調整し、段階的な同期を達成することができる。

3.2 ノードの動作

提案手法におけるノードの動作は次の通りである。ノードはパルス結合振動子モデルにおける発火周期にもとづいてスリープ制御を行っている(図5)。ノード i は、タイマ位相 ϕ_i と状態 x_i 、および動作周波数 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)、および式(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 $T_{sleep}^n = T_i^{n-1} \times (1 - DutyRatio)$ だけスリープ状態になる。なお、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して、スリープ時間 T_{sleep}^{n+1} を設定し、スリープ状態に移行する。スリープ状態中に発火せずに 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、タイマ位相 ϕ_i 、状態 x_i の値を式(3)、および式(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、スリープ時間 T_{sleep}^{n+1} を設定し、スリープ状態に移行する。

また、アクティブ状態のノードは、異なるネットワークに属するノードから刺激メッセージを受け取ると、自身がネットワークの境界に位置すると判断し、以降、自身がブロードキャストする刺激メッセージに境界からのホップ数を示すカウンタとして1を設定する。境界に位置しないノードは、どのネットワークとの境界かによらず、ホップ数を示すカウンタが設定された刺激メッセージを受信すると、受信したカウンタの値を1だけ増やし、自身における境界からのホップ数として設定するとともに、以降の刺激メッセージにこのホップ数を設定する。なお、境界からのホップ数を示すカウンタの値が異なる刺激メッセージを受信したときは、最も小さな値に1を加えたものを自身のホップ数として用いるものとする。そのため、複数のネットワークが同時に段階的同期を行う場合、ノードは、自身の位置から最も近い境界からのホップ数を用いることとなる。

提案手法では、ネットワーク間での段階的同期を行わないときは、ネットワーク内のすべてのノードが共通の b , ϵ を用い、同じネットワークに属するノードと刺激メッセージのやりとりをすることで、ネットワーク内での同期を確立、維持する。一方、ネットワーク間での段階的同期を行うときには、ノードは、ネットワークの境界からの距離にもとづいて、パルス結合振動子モデルのパラメータ b , ϵ を変更し、自身の属するネットワークまたは協調相手のネットワークに属するノードから刺激メッセージを受け取る。なお、本稿では、ネットワークの境界からの距離に応じたパラメータ設定は予備評価にもとづいて決定したが、現在、自律分散的なパラメータ設定法について検討中である。

アクティブ状態におけるメッセージの送受信にはX-MAC[2]を用いる。X-MACでは、時間 R_s ごとに時間 R_t の間、受信機を動作させて待ち受け状態になり、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。待ち受け状態にあるノードは、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Ackを受け取ってメッセージの送信を開始する。本稿では、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、チャンネルに空きが生じ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。

4. シミュレーション評価

動作周期が様々な異なる場合や、刺激メッセージの棄却がある場合の提案手法の動作をシミュレーションによって確認した。

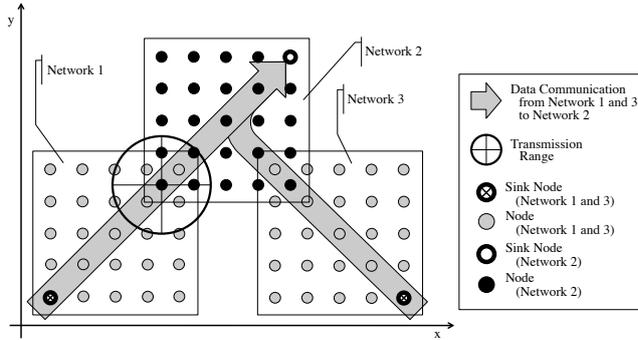


図6 シミュレーションでのノード配置

表1 段階的同期のためのPCOのパラメータ設定

	境界からの距離 (ホップ数)				
	border	1 hop	2 hop	3 hop	4 hop
b	4.0	3.5	3.0	2.0	1.5
ϵ	0.3	0.1	0.05	0.05	0.05

表2 ノードの動作周波数

	動作周波数 [Hz] (動作周期 [s])		
	Network1	Network2	Network3
#1	0.08 (13)	0.007 (143)	0.06 (17)
#2	0.06 (17)	0.007 (143)	0.04 (25)
#3	0.03 (33)	0.007 (143)	0.02 (50)

4.1 シミュレーション設定

75 台のノードを図6のように配置し、ネットワーク1 (動作周波数 F_1)、ネットワーク2 (動作周波数 F_2)、ネットワーク3 (動作周波数 F_3) の3つのネットワークを構成した。初期状態では、それぞれのネットワークごとに、パルス結合振動子モデルにもとづいて全ノードが同期して動作している。シミュレーションにおいて用いた境界からの距離に応じたパラメータ設定を表1に示す。X-MACについては、 $R_s = 200$ [ms]、 $R_l = 20$ [ms]とし、Short PreambleおよびAck、刺激メッセージの送受信にかかる時間はいずれも1 [ms]、データの送受信にかかる時間は3 [ms]とした。また、無線通信の伝播遅延は0.01 [ms]とした。デューティ比 $DutyRatio$ はノードによらず0.3とした。

4.2 動作周期の差に対する適応性

段階的同期を行うネットワーク間の動作周期の差によらず提案手法により段階的同期が達成されることを確認するため、ネットワークの動作周期をそれぞれ表2に示す3通りに変更してシミュレーション評価を行った。

シミュレーションにおいて、シンクノードを除くすべてのノードは、スリープ状態からアクティブ状態へ遷移後すぐに0.01の確率でセンサデータを生成し、ノードの属するネットワークのシンクノードに向けて送信する。また、ネットワーク間協調のため、ネットワーク1およびネットワーク3のシンクノードは、10周期に1回の間隔でデータを生成し、ネットワーク2のシンクノードに向けて送信する。なお、ネットワーク内、ネットワーク間のデータ通信は、送受信ノード間の最短経路上を、隣接ノード間でのユニキャスト通信により伝送される。

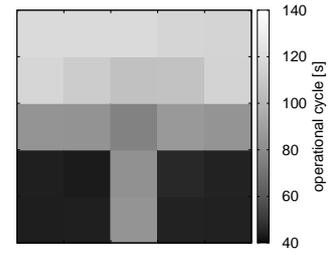


図7 ノードの平均動作周期 (シミュレーション設定2)

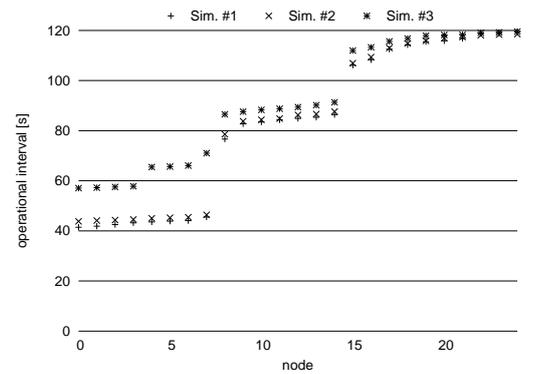


図8 動作周期の差によるノードの平均動作周期の違い

シミュレーション設定2について、シミュレーション終了直前10,000秒間におけるネットワーク2のノードの平均動作周期を図7に示す。それぞれの正方形が1つのノードを表し、色が動作周期を表す。図7から、ネットワークの境界に位置する右下隅、左下隅の8ノードの動作周期が本来の動作周期である143秒から40秒程度にまで短くなっていることが分かる。さらに、その周囲の7ノードの動作周期がおよそ80秒から90秒程度と短くなる一方で、境界から離れた場所に位置する残りの10ノードの動作周期はおよそ110秒から120秒程度と本来の動作周期に近く、段階的同期が達成されていることが分かる。

3つのシミュレーション設定について、シミュレーション終了直前10,000秒間におけるネットワーク2のノードの平均動作周期を図8に示す。なお、図8の横軸は平均動作周期の昇順でノードを並べており、動作周期が短いノードほどネットワークの境界に近いことを意味する。図8から、いずれの設定においても、段階的な同期が達成できていることがわかる。また、シミュレーション設定1, 2のように動作周期が10倍近く異なる場合には、ネットワークの境界に位置する8ノードの動作周期が大きく変更されているが、シミュレーション設定3ではその変化が緩やかであることがわかる。提案手法では、ノードが、より短い動作周期のノードから刺激メッセージを受信することで、本来のタイミングよりも早く発火し、その結果動作周期が短くなる。したがって、ネットワーク間の動作周期の差が小さい場合、相手のネットワークから刺激メッセージを受信する頻度が低いため、動作周期が短くなりにくくなる。ただし、提案

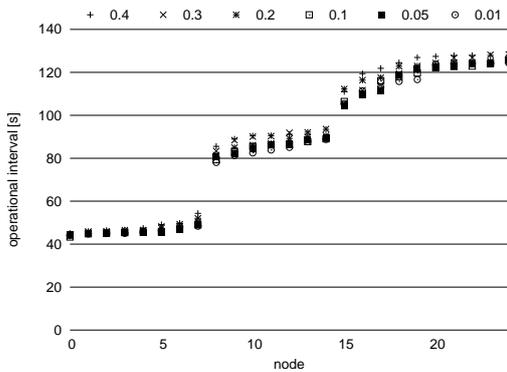


図9 刺激メッセージの棄却率とノードの平均動作周期

手法では、ネットワーク間の動作周期の差を小さくすることによって通信時の電力消費を抑制することなどを目的としているため、境界周辺のノードの動作周期が相手のネットワークの動作周期によらず同じ長さに変更される必要はなく、むしろ相手のネットワークの動作周期にあわせて適応的に変更されることは効果的である。

4.3 刺激メッセージの棄却に対するロバスト性

刺激メッセージの棄却がおこる環境においても提案手法により段階的同期が達成されることを確認するために、刺激メッセージの棄却率を0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4の6通りに変更し、シミュレーション評価を行った。なお、本評価では刺激メッセージの棄却の段階的同期への影響について評価するため、刺激メッセージ以外の通信は行わないものとした。

シミュレーション終了直前10,000秒間におけるネットワーク2のノードの平均動作周期を図9に示す。図9から、いずれのノードにおいてもパケット棄却率が高いと動作周期がわずかに長くなることがわかる。提案手法では、ノードが、より短い動作周期のノードから刺激メッセージを受信することによって、本来のタイミングよりも早く発火し、その結果動作周期が短くなる。そのため、刺激メッセージの棄却が発生すると、動作周期が短くなりにくくなる。ただし、提案手法では、ネットワーク間、および境界から同じホップ数のノード間で完全な同期を達成することを目的としているわけではなく、ネットワーク間の動作周期の差を小さくすることによって通信時の電力消費を抑制することなどを目的としているため、動作周期のわずかな差は問題とはならない。

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ワーク間での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段階的に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の評価を行った。シミュレーション評価の結果、ネットワーク間の動作周期の差によらず、またパケット棄却のある環境においても、センサネットワーク間の段階的な同期が達成できることを確認した。今後は、境界からのホップ数に応じた自律分散的

なパラメータ設定の検討や他の段階的同期手法との比較評価を行う。

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] P. Kersch, R. Szabo and Z. L. Kis: "Self Organizing Ambient Control Space - An Ambient Network Architecture for Dynamic Network Interconnection", Proceedings of the 1st ACM Workshop on Dynamic Interconnection of Networks (DIN), Cologne, Germany, pp. 17–21 (2005).
- [4] E. Poorter, B. Latre, I. Moerman and P. Demeester: "Symbiotic Networks: Towards a New Level of Cooperation Between Wireless Networks", International Journal of Wireless Personal Communications, pp. 479–495 (2008).
- [5] H. Yamamoto, N. Wakamiya and M. Murata: "An inter-networking mechanism using stepwise synchronization for wireless sensor networks", Proceedings of the 1st Workshop on Bio-inspired Models and Technologies for Ambient Information Society (BioAmbIS) (2010).
- [6] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz: "Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators", SIAM Journal on Applied Mathematics, **50**, 6, pp. 1645–1662 (1990).
- [7] S. Kashiwara, N. Wakamiya and M. Murata: "Implementation and evaluation of a synchronization-based data gathering scheme for sensor networks", Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Wireless Networking (ICC), Seoul, Korea, pp. 3037–3043 (2005).
- [8] A. Mutazono, M. Sugano and M. Murata: "Evaluation of robustness in time synchronization for sensor networks", Proceedings of the 2nd International Conference on Bio-Inspired Models of Network (Bionetics), Budapest, Hungary, pp. 89–92 (2007).