センサネットワークにおける自律分散通信タイミング制御方式の開発

久保　祐樹　　伊達　正晃　　松永　聡彦
福永　茂　　関山　浩介

近年，無線通信機能を有する多数のセンサを環境に分散配置し，マルチホップ通信を介して情報収集を行うセンサネットワークの研究が盛んに行われている。センサネットワークの研究成果は，在庫管理システム，道路交通監視システム，大規模施設の空調，照明制御システムなど広範な分野への適用が期待されている。一方，センサネットワークにおける未解決な技術的課題はまだ多く存在する。特に，無線ノード数が大幅に増加した際に，それら無線ノードをいかに管理・運用するかは，大きな課題である。無線ノードの数が増加すると，それら無線ノードの集中的な管理・運用が困難になる。携帯電話システムや無線LANシステムなどでは，基地局やネットワーク管理装置で集中的に無線ノードの管理を行っているが，センサネットワークシステムでは数千〜数万といった膨大な数の無線ノードに対応するため，それら管理装置を必要としない管理・運用手法が求められる。その他にも，無作為な無線ノードの配置，無線ノードの故障，無線ノードのシステムへの追加，削除に柔軟に対処できる手法など，従来の集中管理的手法から自律分散的手法への転換により解決が期待されている課題が多い。

また，センサネットワークではバッテリー駆動が基本となるため，省電力化は非常に重要な課題である。無線通信では送信距離の2〜4乗に比例した送信電力が必要となるため，長距離を1ホップで通信する代わりに，複数の無線ノードを中継するマルチホップ通信を利用した通信により，1ホップを短くすることで，消費電力の節約につなげようとするアプローチがある。しかしマルチホップ通信を用いる場合，自律分散的なアクセス制御方式として広く用いられているCSMA（Carrier Sense Multiple Access）などのプロトコルでは，マルチホップ通信によるパケットの増加にともない通信衝突が頻繁に発生し，スループットの著しい低下が生じるという問題がある。一方，衝突の起こらない通信方式としてTDMA（Time Division Multiple Access）方式があるが，これは時間分割の多重化技術であり，1フレームの特定スロットを各無線ノードが通信するタイミングとして割当てることによって通信タイミングの重複を避けるので，各スロットの各無線ノードへの割り当てを集中管理的に行う必要があるという問題がある。

本稿では筆者らが提案している，通信タイミングの重複がお互いに発生しないように振舞うことが可能な自律分散通信タイミング制御方式（位相拡散時分割方式）の動作原理と評価実験結果について述べる。本手法は多数の無線ノードが，無線通信を行う際に効率的な通信タイミングを近傍の無線ノードの情報のみに基づいて形成するものである。時間分割のタイミング調整は，TDMA のような固定スロットの割当てにより実現するのではない。ノードの通信タイミングを位相で表現し，そのタイミング調整を表す位相ダイナミクスを定式化し，衝突が起こりうるノードとの位相差を自律的に形成することによって実現しており，無駄のないタイムスロット割り当てが可能になる。

センサネットワークと通信衝突

対象とするシステムについて，無線ノードの配置と通信距離を示した**図1**を用いて説明する。図中の小円（実線）が無線ノード0の通信範囲を示し，各無線ノードは最近接無線ノードとのみ通信を行うことができると仮定する。このような形態のネットワークにおいては，通信範囲外の無線ノードへの情報伝達は，マルチホップ通信を利用す

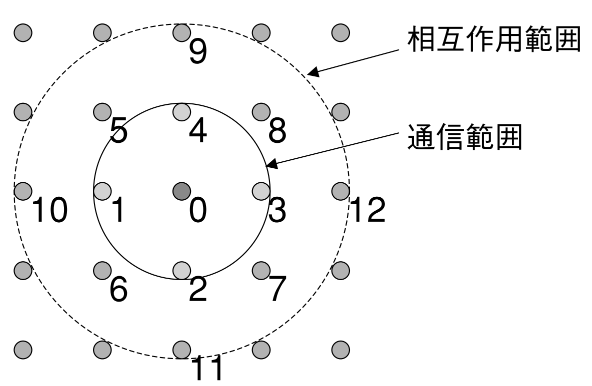


図1　ノードの配置と通信範囲

ることにより実現する。この環境において，近傍無線ノード間で同時に送信が行われると，電波干渉が発生してデータの送受信に失敗するので，通信衝突を回避して効率的な通信を行うためのタイミング制御が必要となる。

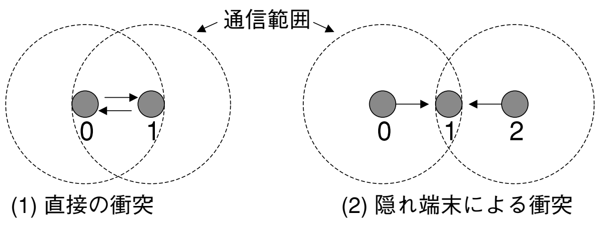


図2　通信の衝突

通信衝突は，大きくわけると二つ場合（**図2**）が存在する。**図2**（**1**）はお互いに通信範囲内に存在する無線ノードが同時に通信を行う場合であり，お互いに送信されたデータを受信できない。**図2**（**2**）はお互いには通信範囲内に存在しない無線ノード（図中の無線ノード0と無線ノード2）が同時に無線ノード1にデータを送信した場合であり，この例の場合，無線ノード1はどちらから送信されたデータも受信することができない。これは一般に隠れ端末問題と呼ばれている問題である。衝突回避を行うために，通信タイミングを考慮しなければならないノードが存在する範囲は，無線ノード0から見た時には**図1**の大円（破線）となる。本稿ではこの範囲をノードの相互作用範囲と呼ぶ。本手法では，相互作用範囲内において各無線ノードが局所的にタイミング制御を行うことにより，効率的な通信が実現される。

位相拡散時分割方式

提案する位相拡散時分割方式では，無線ノード間における通信タイミングの相互調整を結合振動子モデルに基づいて定式化する。無線ノードｉの位相をθ_iとして，**図3**のように無線ノードiは位相（0，2π）の内，$0<\theta_i<\phi_c$の範囲で通信を行うものとする。他の無線ノードが$0<\theta_i<\phi_c$以外の位相で通信をすると，適切な通信タイミング制御が実現されていることになる。各無線ノードは，$\theta_i=0$の時にインパルス信号を発信し，近傍無線ノードからのインパルス信号を受けることで，お互いの位相調整を行い，近傍無線ノードとの通信タイミングの重複を回避する。この調整イメージを**図3**に示す。**図3**中のノード番号 は**図1**のノード番号と対応している。初期状態（**図3左**）では適切な通信タイミングが形成されておらず，位相差が十分でない無線ノード同士の通信は衝突を起こしてしまう。しかし，収束状態（**図3右**）では，各無線ノードは隠れ端末を含む衝突の可能性がある無線ノードすべてと十分な位相差を形成することによって衝突を起こさず通信を行うことができる。さらにお互いの空間的な位置が十分離れている無線ノード（ノード1，8，11など）は，同時に通信を行っても衝突が起こらないため，それら無線ノードの位相が同じになるように調整する。この図では説明のために無線ノードに番号を示してあるが，本手法はインパルス信号にノード番号を含める必要はない。また，本手法では無線ノードの位相差の関係から衝突率を定義する。これは，実際の通信が衝突したかどうかを示す指標ではなく，位相差を十分形成できていない時を衝突とみなし，各無線ノードが位相差を十分形成し通信衝突を回避できているかどうかを評価するために用いる指標である。本手法では，実際の通信の衝突を検出するのではなく，仮想的に他の無線ノードとの通信タイミングの重複を位相の重なりから検出することにより指標化できる。

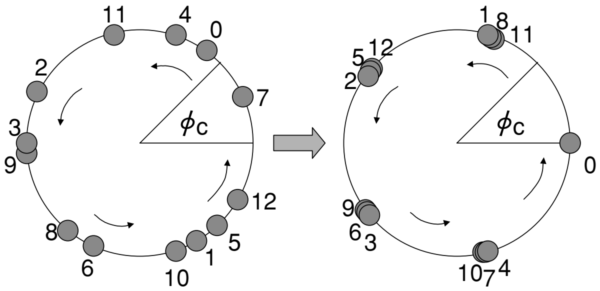


図3　通信タイミングの調整イメージ

我々はこのような通信タイミング制御を行うため，次の位相ダイナミクスを提案している。紙面の関係上この位相ダイナミクスの詳細は文献 1）,2）を参照していただきたい。本稿では，位相ダイナミクスの概要を説明する。

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{k}{N}\sum_{j\in k_i} R(\Delta\theta_{ij}) + \xi(S_i) \qquad (1)$$

式（1）の位相ダイナミクスは，各無線ノードの角速度ω_iの項，近傍無線ノードとの反発によってタイミング調整を行う相互作用項，確率的に位相を変化させる確率項の三つの項から構成される。次に各項の概要を説明する。

[固有振動数]

角速度ω_iによって無線ノードの通信周期が決まる。収束過程では他の項の影響により周期は一定ではないが，収束状態では各無線ノードは一定周期で振動し，無線ノードはこの周期に一回の通信が可能となる。この時に与えられる通信時間はω_iとϕ_cの関係で決まる。

［相互作用項］

各無線ノードは近傍無線ノードの位相に基づいて位相調整を行う。式（1）においてNは近傍ノード数，kはノード間の位相調整の強度を示す係数である。$R(\Delta\theta_{ij})$を位相応答関数と呼んでおり，各無線ノードの位相調整の特性は位相応答関数により決定する。位相応答関数は近傍の無線ノードとの位相差$\Delta\theta_{ij}$に基づいて位相差を形成するような反発特性を有する関数とする。

［確率項］

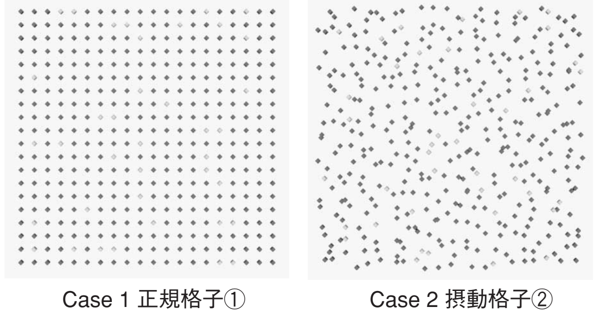
相互作用項による反発のみでは，局所的に相互作用を行う複数の近傍無線ノードからの反発が均衡して十分な位相差を形成できない場合が起こる。確率項はこの状態を回避する役割を持つ。動作概要は次のようになる。まず，十分な位相差を形成できない均衡状態においては，無線ノード間の通信衝突が起こる。そこで衝突率に基づいて無線ノードにストレスが蓄積する仕組みを導入する。各無線ノードがそのストレスの蓄積S_iに基づいて大きく位相をシフトさせ，適切な無線ノードの順序関係を探索する。この動作によって，十分な位相差を形成できない状態で衝突を回避できないまま位相差パターンが固定されてしまう状態を回避できる。

検証実験

（1）シミュレーション実験

提案手法の検証として行った計算機シミュレーションについて説明する。各無線ノードの初期状態として位相初期値を（0，2π）でランダムに設定し，固有振動数ω_iは30rad/s，通信範囲は37mとした。無線ノードの配置として以下に述べるCase 1，Case 2の2種類を評価した。このときの無線ノード配置を**図4**に示す。

- Case 1 正規格子（**図4** ①）縦20横20体のノードをグリッドに整列配置し，ノードの間隔を29mとした。
- Case 2 摂動格子（**図4** ②）正規格子の配置から縦横一様に±14mの摂動を加えて配置した。



Case 1 正規格子①　　Case 2 摂動格子②

図4　ノード配置

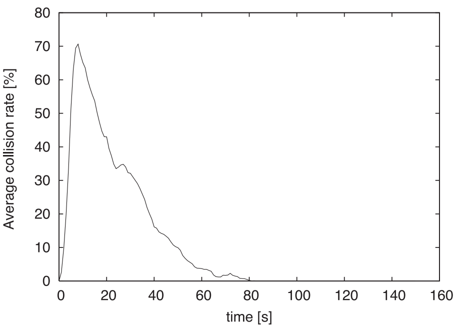


図5　平均衝突率 （Case 1）

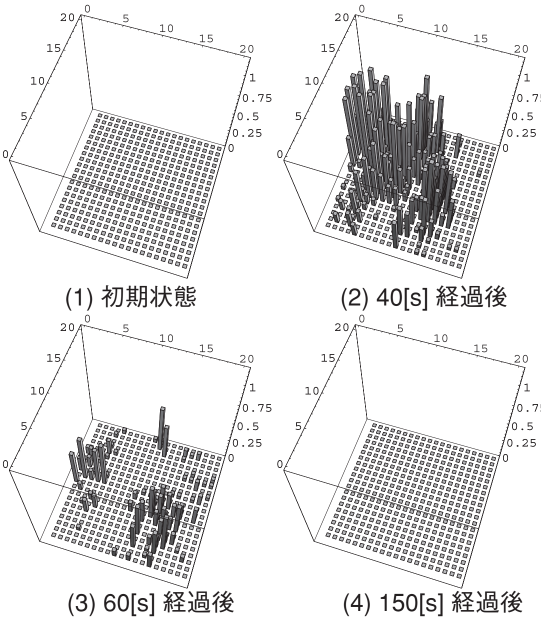


図6　各ノードの衝突率 （Case 1）

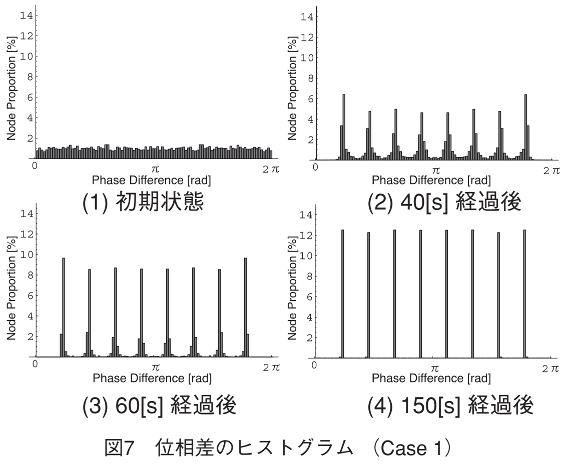


図7　位相差のヒストグラム （Case 1）

● Case 1　正規格子

図5，**図6**，**図7**がシミュレーション結果である。**図5**は平均衝突率の時間変化を表す。徐々に衝突率が減少し，最終的には衝突を完全に回避できていることがわかる。収

束時間はノードの周期に依存し周期を短くすれば収束時間も短くなる。**図6**はそれぞれのノードの衝突率を棒グラフで示したものである。近傍ノード数が少ないネットワークの端の部分から衝突が解消されていくことがわかる。**図7**の位相差のヒストグラムは，横軸は位相差，縦軸は対応する位相差をもつノード数の割合であり，位相を100等分して，相互作用範囲の無線ノードとの位相差が100等分した内のどこに対応するかを数え，全ての無線ノードについて平均をとったものである。t = 0［s］ではどの位相差もほぼ均等な値をとるのは各無線ノードの初期位相をランダムに設定したことによるものであり，衝突が完全に回避されたt = 150［s］では位相を均等に9分割する部分が高い値となっている。これは相互作用範囲の無線ノードとの間で，位相を9分割するパターンを形成している事を示している。この分割数は位相応答関数の特性に依存する。

● Case 2　摂動格子

センサネットワークなどのアプリケーションでは空間に無作為に無線ノードを配置することが予想される。そこで，正規格子から摂動を加えた配置での検証を行った。**図8**に平均衝突率の観測結果を示す。摂動格子に配置した場合においても，衝突が回避されていくことがわかる。本手法は厳密な正規格子の配置のみに限定される手法ではなく，摂動格子のように無線ノードが配置された環境にも対応できると言える。

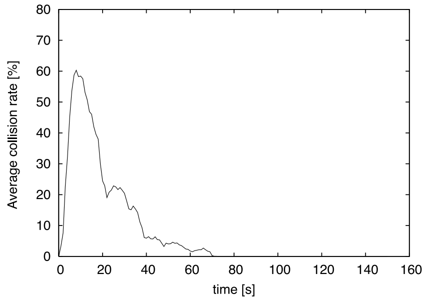


図8　平均衝突率 （Case 2）

（2）ハードウェア実験

IEEE802.15.4準拠の2.4GHz無線LSIを搭載した無線ノードを使用して実験を行った。この実験環境は**写真1**にあるように，8台の無線ノードが自律分散的にタイミング調整を行い，そのタイミング調整の過程をノートパソコン上に表示するものである。画面上の丸は各無線ノードの通信タイミングを表しており，白い丸は現在通信中の無線ノードを示している。この例は隠れ端末の存在しないもっとも基本的な場合ではあるが，**写真1**のように適切な分割数のパターンが形成できている。今後は隠れ端末が存在する配置なども含めてパフォーマンスの検証を行っていく予定である。

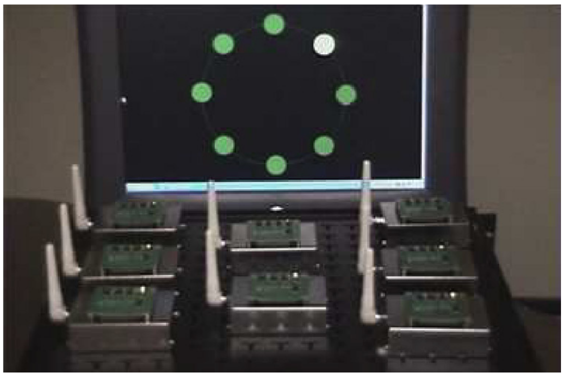


写真1　実機検証

お　わ　り　に

本稿では通信衝突回避を行う完全自律分散的な通信タイミング制御方式として筆者らが提案する位相拡散時分割方式を説明した。通信タイミングの相互調整を位相ダイナミクスに基づいて定式化し，各無線ノードが通信衝突を回避する位相差を形成することによって無線ノード数が膨大であっても衝突を起こさずに通信できることを計算機シミュレーションによって示した。今後は実機検証によって得られた知見を基に理論展開を行う予定である。 ◆◆

■参考文献

1）K. Sekiyama, Y. Kubo, S. Fukunaga and M. Date, “Phase Diffusion Time Division method for Wireless Communication Network” ,IEEE IECON 2004, 2004-Nov.

2）K. Sekiyama, Y. Kubo, S. Fukunaga and M. Date, “Self-Organizing Communication Timing Control for Sensor Network” , The 7th Asia-Pacific Conference on Complex Systems （Complex2004）

●筆者紹介

久保祐樹：Yuki Kubo. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

伊達正晃：Masaaki Date. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

松永聡彦：Toshihiko Matsunaga. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

福永茂：Shigeru Fukunaga. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ

関山浩介：Kosuke Sekiyama. 福井大学工学部 知能システム工学科 助教授