

センサネットワークにおける干渉範囲を考慮した自律分散通信タイミング制御

Communication Timing Control with Interference Detection for Wireless Sensor Networks

久保 祐樹[†]
Yuki Kubo

関山 浩介[‡]
Kosuke Sekiyama

1. はじめに

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 [1]。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 [2]。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。

我々はこれまでに無線通信ノードが自律的に通信タイミングを調整することによって衝突を回避するように振舞うことが可能なタイミング制御方式 (位相拡散時分割方式) を提案している [3]。しかしながら、この検討では干渉波の影響を考慮していない。干渉波は通信プロトコルに影響をあたえ、例えば CSMA ベースのアプローチにおいて隠れ端末回避のメカニズムとして知られている RTS, CTS の制御メッセージに交換による方式も干渉波の影響を考慮すると適切ではないことが指摘されている [4]。また、ノードが自律的にスロット割り当てを行う分散 TDMA 方式 [5, 6, 7] においても干渉波の影響を考慮していないため、適切なスケジュールになっているとは言えない。本稿では、提案している通信タイミング制御方式において、干渉波の影響を考慮した拡張方式について述べる。この方式は各無線通信ノードが近傍ノードからの受信電力強度を交換することによって、ノード配置に応じて適切にタイミング制御を行うノードを選択するものである。

2. 位相拡散時分割方式

2.1 概要

提案するタイミング制御方式では、無線ノードは周期的にデータパケットを送信するものと仮定している。そのため、無線ノードは周期的に通信状態と非通信状態を繰り返す振動子であるとモデル化し、無線ノードの状態を位相として表現する。無線ノード i の位相を

θ_i として、図 1(b) のように無線ノード i は $[0, 2\pi)$ 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 $0 < \theta_i < \phi_c$ 以外で通信をすれば衝突は起こらないため、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。図 1(a) はノード配置、図 1(b) はノード 0 からみた近傍のノードの位相を表している。図 1(b) 左はタイミング制御の初期状態のイメージを表しており、各ノードが十分な位相差を形成できていないため衝突が起こる。しかしながら、収束状態のイメージを表す右図のようにタイミング形成を行うことによって衝突を回避して通信を行うことができる。タイミング制御を行うためのノード間の相互作用として、各無線ノードが $\theta_i = 0$ の時に制御メッセージを送信する。各ノードは近傍無線ノードからの制御信号を受けることで、互いの位相を取得し、近傍ノードの位相に基づき位相ダイナミクスを計算することでタイミング調整を行うことができる。

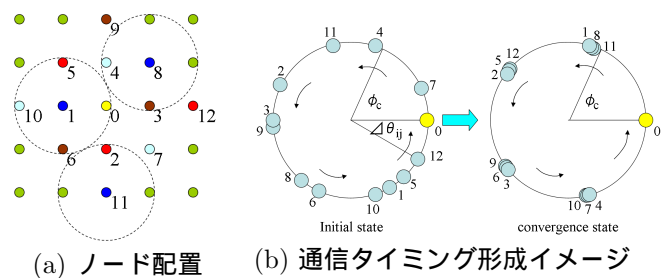


図 1: PDTD による通信タイミング形成

2.2 制御信号と相互作用

各ノードは近傍ノードに自分の通信タイミングを伝えるために周期的に制御メッセージを送信する。制御メッセージには次の情報が含まれる。

1. 自ノードから 1 ホップのノードの ID $j = (0, 1, 2, \dots)$ 。
2. 自ノードから 1 ホップのノードの位相情報 $(\tilde{\theta}_{i0}, \tilde{\theta}_{i1}, \tilde{\theta}_{i2}, \dots, \tilde{\theta}_{ij})$ 。
3. 自ノードから 1 ホップのノードからの受信電力強度 $(P_{i \leftarrow 0}, P_{i \leftarrow 1}, P_{i \leftarrow 2}, \dots, P_{i \leftarrow j})$ 。

ここで、近傍ノードの位相はタイミング調整に必要であり、近傍ノードからの受信強度は干渉ノードの特定に必要である。次に近傍ノードの情報が伝搬するプロセスを説明する。図 2 はノード 2 がノード 1 に制御メッセージを送信した場合の例を示したものであり、この時の送信ノード 2 と受信ノード 1 の動作を説明する。図 2(b) 右の位相関係図はノード 1、左の位相関係図はノード 2 に対応している。ノード 2 は位相 0 で制御メッセージを

[†] 沖電気工業株式会社 研究開発本部

[‡] 名古屋大学 マイクロ・ナノシステム工学専攻

送信する状態であり、制御信号として1ホップ近傍に存在するノード1,3,4,5に関する情報を送信する．これを受信したノード1はノード2,3,4,5に対応するノードを生成する．ノード1の位相関係図の点線で丸がついているものは、受けとった制御メッセージに基づいて生成した位相を表している．ここで、制御メッセージの送信元のノード2に対応するノードは1ホップ近傍のノードのノードであるとし、それ以外のノードは2ホップ近傍のノードのノードであると保存する．ただし、この例のノード3のようにノード1からも1ホップにあるような場合は、ノード3からの制御信号の受信時に1ホップに存在するノードであることを優先して保存する．このように周期的に1ホップ近傍のノードの情報を送信することで、各ノード2ホップ近傍のノードの情報を保持できる．

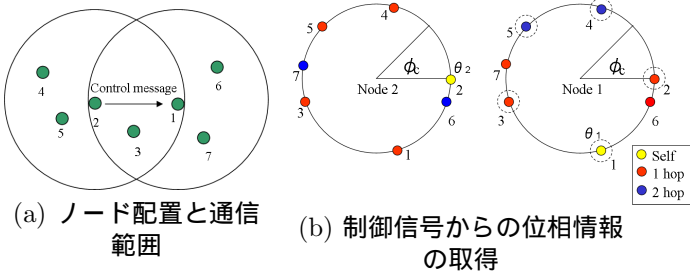


図 2: 制御信号の交換による相互作用

2.3 位相ダイナミクス

我々はこのような通信タイミング制御を行うため、次の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 [3] を参照して頂きたい．

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j \in K_i} R(\Delta\tilde{\theta}_{ij}) + \xi(S_i). \quad (1)$$

式 (1) はノード i の位相 θ_i のダイナミクスを表しており、相互作用範囲のノード集合 (K_i) のノードとの位相差 $\Delta\tilde{\theta}_{ij} = \tilde{\theta}_{ij} - \theta_i$ に基づいてタイミング調整を行うものである．さらに自己から見たローカルな通信タイミングパターンを評価し S_i を決定し、その評価に基づいて確率的な探索動作を $\xi(S_i)$ として表現している．各ノードが式 (1) に基づいてタイミング調整を行うことによって、全体として衝突を回避するような通信タイミングパターンが形成される．

3. 干渉ノードの選択

3.1 干渉モデル

前節の通信タイミング制御方式においては干渉波を考慮していない．このため、あるノードが衝突を考える場合においては、そのノードから2ホップ内のノードとタイミング形成を行えば衝突は起こらないと単純化して考えることができた．しかし、干渉を考慮するとタイミング制御をしなければならないノードの存在範囲を2ホップと決めることができない．前節の制御方法を実験環境の実験に適用した場合、2ホップ外からの干渉波によるパケットロスが起こる可能性がある．

無線通信での干渉は受信側での信号対干渉雑音電力比 (SIR:Signal to Interference Ratio) で評価できる．所要 SIR は通信方式、受信機的设计などによって決まるものである．そこで、干渉波の影響を考慮した通信タイミング制御を行うために、受信信号電力強度に基づいて相互作用ノードを選択する方式が必要となる．まず、図 3 のようにノード間距離 d_s のノード i と j において、ノード i がノード j に送信するとき、干渉源ノード k によってノード j で起こる干渉について考える．前提として全てのノードが同じ送信電力 t_p で送信すると仮定する．ノード i が送信した時にノード j が距離 d で受信した時の受信電力強度 $p(p, d)[mW]$ は次式のように距離の α 乗に反比例して減衰するモデルに従うとする．

$$p(t_p, d) = \frac{ct_p}{d^\alpha} \quad (2)$$

干渉源のノード k との距離を d_i とすると、信号対干渉雑音電力比 (SIR. signal to interference power ratio) は次式となる．

$$SIR = \frac{p(d_s)}{p(d_i)} = \left(\frac{d_i}{d_s}\right)^\alpha \quad (3)$$

正しく受信するための所要 SIR が e_{sir} であったとすると、 $SIR \leq e_{sir}$ からノード k が干渉源となる距離が次式のように求まる．

$$d_i \leq \sqrt[\alpha]{e_{sir}} d_s. \quad (4)$$

この式から干渉源の存在範囲は送信したいノードとの距離に比例することがわかる．つまり、干渉を受ける範囲はどのノードに通信するかによってそれぞれ個別に考える必要がある．

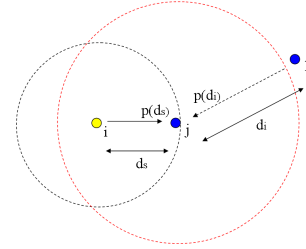


図 3: 干渉ノードの存在範囲

3.2 干渉ノードの選択

3.2.1 干渉ノードの存在範囲

干渉波の存在下で正しく受信するための条件は次式となる．

$$P_s - P_i > E_{sir}. \quad (5)$$

ここで P_s [dBm] は所望波の強度、 P_i [dBm] は干渉波の強度、 E_{sir} [dB] は所要 SIR を示す．図 4 の例のように距離の違うノードへ送信するときの干渉源の存在範囲を考える．ノード 1 が通信範囲の端のノード 2 に送信する時に、ノード 2 での受信電力強度を P_{min} [dBm] とし、正

しく受信するために所要 SIR が E_{sir} [dB] であった場合には、式 (5) から、 $P_{min} - E_{sir}$ [dBm] 以上の強度の干渉波を受けると正しく受信できない。図 4 に図示するように、この範囲はノード 2 の通信範囲外のノードを含んでいる。このため、2.2 節の方法で 2 ホップ近傍のノードの情報を基にタイミング制御を行うだけでは干渉ノードすべてを特定することができない。

ここで、ノード 2 よりも近くに存在するノード 3 について考える。ノード 1 の送信をノード 3 が $P_c = P_{min} + E_{sir}$ [dBm] で受信できたとする。この時は $P_c - E_{sir} = P_{min}$ [dBm] 以上の強度の干渉波を受けると正しく受信できない。これはノード 3 の通信範囲と同じである。つまり、2 ホップより外のノードからの干渉を受けることはない。よって、 P_c よりも強い強度で送信できるノードとのみデータパケットの送信を行うものと限定することによって、2 ホップ外に干渉ノードが存在する場合をなくすることができる。

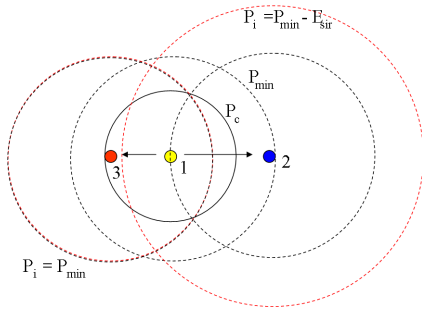


図 4: 送信相手の制限と干渉ノードの存在範囲

3.2.2 干渉ノードの選択プロセス

干渉が起こる状況として、自分の送信が他ノードから干渉を受ける場合と自分が干渉源となる場合がある。図 5 にこの 2 つの場合の干渉ノードの存在範囲を示す。図 5(a) は自分の送信が他ノードから干渉を受ける場合であり、ノード 1 が P_c よりも強い強度で制御メッセージを受信した場合には、自分の送信が他ノードから干渉を受けないかを評価し干渉ノードを特定する。この図はノード 2 の制御メッセージからノード 1 が干渉ノードを特定する例である。ノード 2 の送信した制御メッセージにはノード (1,3,4,5,6,8,10) のからの受信電力強度が書かれている。ノード a の送信し、ノード b が受信した時の受信電力強度を $P_{b \leftarrow a}$ と表すとすると、 $P_{2 \leftarrow 1}$ と、干渉強度 $P_{2 \leftarrow x}$ ($x = 3, 4, 5, 6, 8, 10$) を比較して所要 SIR を得られているかを評価することで干渉ノードを特定できる。干渉源となるノードの存在範囲は図 5(a) の塗りつぶされた範囲となる。この図の例のように十分遠い位置にあるノード 10,8 からの信号強度は小さいため干渉は起こらない。ノード a からノード b への通信に干渉を与えるノード集合 L_I は次式となる。

$$L_I(b \leftarrow a) = \{x | P_{b \leftarrow x} \geq P_{b \leftarrow a} - E_{sir}, x \neq a\}. \quad (6)$$

図 5(b) は自分が干渉源となる場合を表す。ノード 1 が P_c よりも弱い強度でノード 9 から制御メッセージを受信

した場合には送信相手の制限からノード 1 はノード 9 にデータパケットを送信することはないため、ノード 1 が送信することによって他のノードの送信に干渉を与えてしまう場合を考える。ノード 9 の送信した制御メッセージに含まれるノード情報ノード ($x=1,5,8,11,12,13,14$) から $P_{9 \leftarrow 1}$ を干渉波の強度と考え、 $P_{9 \leftarrow x}$ に干渉を与えてしまうことが無いかを評価する。図 5(b) の塗りつぶされた範囲が干渉を与える範囲となる。ノード b へ送信するノードの内ノード a が送信から干渉を受けるノードの集合 C_I は次式となる。

$$C_I(b \leftarrow a) = \{x | P_{b \leftarrow x} \leq P_{b \leftarrow a} + E_{sir}, P_{b \leftarrow x} \geq P_c, x \neq a\} \quad (7)$$

つまり、式 (1) の K_i を以上の手続きで生成した $L_I(j \leftarrow i) \cup C_I(j \leftarrow i)$ 。とすることで適切にタイミング制御を行うことができる。

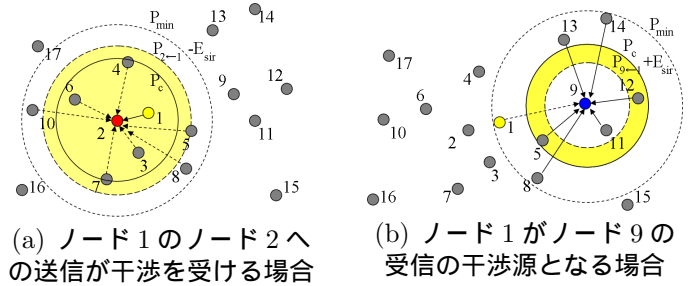


図 5: 干渉ノードの選択

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション設定

提案方式の動作検証として、図 6 の様にノード 10x10 を配置したネットワークを想定してシミュレーションを行った。表 1 のように無線のパラメータを選んだ。図 6 の大円がこの時の通信範囲を示す。ノードのタイミング調整に関するパラメータは 2 のように選んだ。シミュレーションを簡単化するために、トラフィックの発生やフローを簡単化し、ノードは位相が $0 < \theta_i < \phi_c$ の範囲において必ず送信を行うものとした。送信先については再近接のノードの内一つをランダムに選択するものとしている。シミュレーションで評価している送信成功率とは 1 周期中に正しく通信できた時間を送信しようとする最大時間 (ϕ_c / ω_i) で規格化したものであり、逆に衝突となった時間を ϕ_c / ω_i で規格化したものが衝突率である。

表 1: 無線パラメータ

$c \cdot p_t$	Radio parameter	0.01135
α	Signal attenuation coefficient	4
E_{sir}	Necessary SIR	10 [dB]
P_{min}	Lowest reception electric power	-90 [dBm]

表 2: ノードパラメータ

ϕ_c	Communication interval	$2\pi/27$ [rad]
n	Calculation cycle of collision rate	5
ω	Angular velocity	$2\pi/5$ [rad/s]
κ	Constant coefficient	2.6
β	Sensitivity of stochastic jump	10

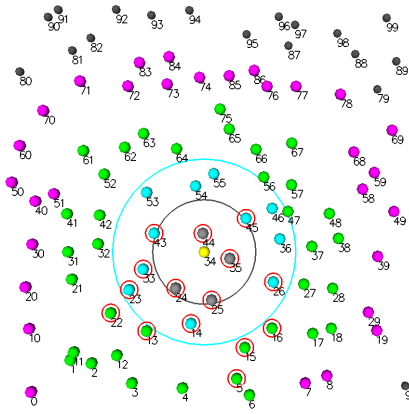


図 6: ノード配置と通信範囲

表 3: 受信電力強度による相互作用ノードの選択

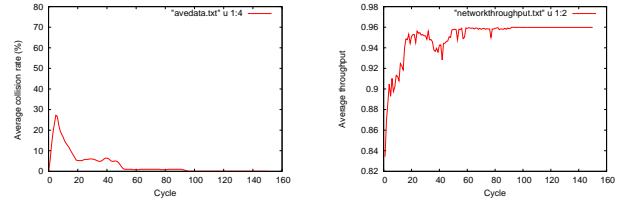
$P_{b \leftarrow a}$	Strength [dBm]	SIR [dB]
$P_{35 \leftarrow 34}$	-68.3	Desired wave
$P_{35 \leftarrow 14}$	-86.5	18.2
$P_{35 \leftarrow 15}$	-89.5	21.2
$P_{35 \leftarrow 16}$	-87.8	19.5
$P_{35 \leftarrow 24}$	-83.1	14.8
$P_{35 \leftarrow 25}$	-77.5	9.2 ○
$P_{35 \leftarrow 26}$	-79.2	10.9
$P_{35 \leftarrow 27}$	-87.2	18.9
$P_{35 \leftarrow 33}$	-89.2	20.9
$P_{35 \leftarrow 36}$	-80.7	12.4
$P_{35 \leftarrow 37}$	-88.2	19.9
$P_{35 \leftarrow 43}$	-87.5	19.2
$P_{35 \leftarrow 44}$	-74.0	5.7 ○
$P_{35 \leftarrow 45}$	-76.8	8.5 ○
$P_{35 \leftarrow 46}$	-84.1	15.8
$P_{35 \leftarrow 47}$	-86.4	18.1
$P_{35 \leftarrow 54}$	-87.5	19.2
$P_{35 \leftarrow 55}$	-88.7	20.4
$P_{35 \leftarrow 56}$	-89.1	20.8

4.2 シミュレーション結果

相互作用ノードの選択に関するシミュレーション結果を図 6 に示す。ノード 34 は P_c ノード 24, 25, 35, 44 に送信する可能性があり、これらのノードに送信する時に衝突を引き起こす可能性のあるノードを相互作用ノードとして選択する必要がある。ノード 34 が選択した相互作用ノードを小さい円で囲んで表示している。表 3 はノード 35 の送信した制御メッセージをノード 34 が受信した時の受信強度の情報である。ノード 34 は式 (6) に基づいて相互作用ノードを選択し、ここでは 25, 44, 45 と送信タイミングをずらす必要があると判断している。これは選択したノードの一部である。このように各ノードからの制御メッセージの受信ごとに判定することによって全ての相互作用ノードを選ぶことができる。

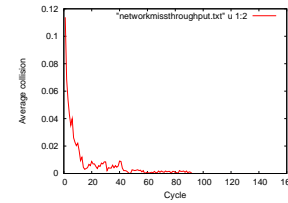
Fig. 7(a) は通信タイミング形成を評価した結果であり、あるノードが通信状態の時にそのノードと干渉を起こす位置関係にあるノードが同時に通信状態をとっている状態を通信タイミングの重複とし、過去にわたる重複の割合を評価したもので、重複率が 0 となることは、通信タイミングがうまく形成されていることを示す。Fig. 7(a) の重複率の変化をみると、60 サイクルほどで収束していることがわかる。Fig. 7(b) の送信成功を示す指標も重複率の現象に伴って増加していることがわかる。収束状態

でも 1 にならないのは制御メッセージのオーバーヘッド分のためである。衝突に関しても Fig. 7(c) のように衝突を回避できていることがわかる。このように干渉波の影響を考慮しても、受信電力強度に基づいて相互作用ノードを選択してタイミング制御を行うことができています。



(a) 平均重複率

(b) 平均送信成功率



(c) 平均衝突率

図 7: シミュレーション結果

5. おわりに

本稿では筆者らが提案する自律分散的に通信タイミングを形成し、衝突を回避する位相拡散時分割方式を説明し、この方式の拡張として干渉波対応について述べた。拡張方式は各ノードが受信電力強度に基づいて相互作用ノードを選択するものである。今後の課題として、今回のシミュレーションでは受信強度の変動を考慮していないが、実際は受信強度は人の移動など影響を受け変動するものであるため、受信強度の変動を考慮した方式への拡張や実機を用いた実環境での実験を行う予定である。

謝辞 本研究は平成 17 年度総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) 「大規模ユビキタスセンサーネットワークを自己組織化する相互適応通信制御方式の研究開発」により行なわれたものである。

参考文献

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks (Elsevier)*, Vol. 38, No. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] Jan M. Rabaey, M. Josie Ammer, Julio L. da Silva, Danny Patel, and Shad Roundy. Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. *Computer*, Vol. 33, No. 7, pp. 42–48, 2000.
- [3] Kosuke Sekiyama, Yuki Kubo, Shigeru Fukunaga, and Masaaki Date. Distributed time division pattern formation for wireless communication networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, pp. 283–304, 2005.
- [4] S. Yi F. Ye and B. Sikdar. Improving spatial reuse of IEEE 802.11 based ad hoc networks. *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, pp. 1013–1013, 2003.
- [5] Mahesh K. Marina, George D. Kondylis, and U.C. Kozat. Rbrp: A robust broadcast reservation protocol for mobile ad hoc networks. *IEEE Globecom*, pp. 878–885, 2001.
- [6] C.D. Young. Usap multiple access: dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking. *Proceedings of IEEE MILCOM '99*, pp. 271–275, 1999.
- [7] Zhenyu Tang and J. J. Garcia-Luna-Aceves. A protocol for topology-dependent transmission scheduling in wireless networks. *Proceedings of IEEE WCNC'99*, pp. 1333–1337, 1999.