

パケット衝突率の変化が マルチエージェントシステムの合意制御に与える影響

野呂 俊介¹ 小林 健太郎² 岡田 啓² 片山 正昭²

概要: マルチエージェントシステムの合意制御について考える。エージェント間の情報交換に無線通信を用いた場合、無線通信特有の制約を考慮する必要がある。各エージェントは、通信範囲のエージェントのみと通信が可能である。そして、エージェントが移動する場合には、通信範囲内のエージェント数が時間変化する。そのため、それに伴いパケット衝突率が変化する。制御分野における研究では、パケットの衝突率の変化が合意制御に与える影響について明らかにされていない。そこで、本稿ではパケット衝突率の変化を考慮し、規模が異なるマルチエージェントシステムの合意制御における特性の解析を行う。

キーワード: マルチエージェントシステム, 合意制御, 平均合意, パケット衝突

Influence of packet collision rate variation on consensus control of multi-agent systems

SHUNSUKE NORO¹ KENTARO KOBAYASHI² HIRAKU OKADA² MASAOKI KATAYAMA²

Abstract: This paper deals with consensus control of multi-agent systems. When agents exchange their local information by wireless communication, it is required to consider constraints on communication resources. Since the communication range and the number of available channels are limited, the number of agents within the communication range changes with time according to the movement of the agents, and it affects the packet collision rate. Influence of such a time variation of the packet collision rate on consensus control has not been clarified. Therefore, this paper analyzes the influence of packet collision rate variation on consensus control of multi-agent systems.

Keywords: Multi-agent systems, Consensus control, Average-consensus, Packet collision

1. はじめに

マルチエージェントシステムとは、局所的な情報を用いて自律分散的な動作を行う要素 (エージェント) で構成されるシステムである。各エージェントが相互に影響を及ぼしあうことで、システム全体での振る舞いが決定する。マルチエージェントシステムの協調制御の中でも、合意問題は基本的な問題として古くから研究が行われている [1, 2]。

合意とは、すべてのエージェントがネットワークを介した情報交換により、状態変数を一定の値に収束させることである。この問題は、UAV(Unmanned Aerial Vehicle) の協調制御 [3]、飛行機や衛星のフォーメーション制御 [4, 5]、自動ロボットの協調制御 [6] など、様々な制御問題への応用を含んでいる。

これまでに、エージェント間の通信に通信レート制約 [7] や時間遅れ [8]、や通信路雑音 [9]、通信の失敗 [10] が存在する場合の検討が行われている。制御分野において、合意問題を扱う研究の主題は、これらの通信制約が合意の達成や収束速度に与える影響を評価し、適切な制御設計を行うことである。特に、通信の失敗が存在するネットワークに

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻
Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 名古屋大学未来材料・システム研究所
Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University

おける合意問題は、確率的にネットワーク構造が変化するスイッチングネットワークとして扱われ、盛んに研究が行われている [10–15]。これらの研究における通信の失敗はある一定の確率で生じるものとしている。しかし、エージェントが無線通信による情報交換を行いながら、移動する状況を想定したとき、通信の失敗確率は変化する。なぜなら、移動することで通信範囲内に存在するエージェント数が増加すれば、送信パケットが衝突する確率も増加するためである。これまでの研究では、エージェントの移動によるパケット衝突率の変化が、合意制御に与える影響については明らかにされていない。また、通信範囲は収束速度の観点から見たとき重要なパラメータである。パケット衝突がない場合には、通信範囲を大きくすることで、エージェントはより多くのエージェント通信することができ、収束速度が向上する。しかし、パケット衝突を考慮したとき、通信範囲を大きくすることで、通信の失敗が多くなる。したがって、通信範囲を大きくして多くのエージェントの情報を得ることと通信が成功することの間にはトレードオフ関係が存在する。

筆者らはこれまでに、複数のロボットを格子状に配置し、互いに位置情報を交換しながら一箇所に集合させるような合意制御について考え、通信範囲の変化とエージェントの移動によるパケット衝突率の変化が制御品質に与える影響を評価した [16]。その結果、通信範囲を小さくすることでパケット衝突率が下がり制御品質は向上するが、通信範囲を大きくしても多くのエージェントの情報を得ることによる制御品質向上が見られなかった。また、合意制御の制御品質評価において、エージェントの初期配置が大きく影響することがわかった。

そこで本稿では、複数のロボットを一様ランダム配置した場合の合意制御について考え、パケット衝突率の変化が制御品質に与える影響を評価する。具体的には、エージェントの移動や通信範囲、システムの規模を変化させ、合意の成功率と収束速度を計算機シミュレーションによって評価する。

2. マルチエージェントシステムの合意制御

本稿では、自律分散的に動作する N 台の移動ロボット (エージェント) が一箇所に集合する制御問題を扱う。各エージェントは、通信範囲内のエージェントから取得した位置情報 \mathbf{x} に基づいて移動する。この問題は、エージェント間の情報交換によって状態変数を一致させる、マルチエージェントシステムの合意制御として扱われる。まず、本稿で扱うマルチエージェントシステムの定式化を行う。そして、合意制御について述べる。

2.1 マルチエージェントシステム

本稿では、2次元平面を移動するエージェント i が次の

状態方程式

$$\mathbf{x}_i[k+1] = \mathbf{x}_i[k] + \mathbf{u}_i[k], \quad \mathbf{x}_i[0] = \mathbf{x}_{0i} \quad (1)$$

で表されるマルチエージェントシステムについて考える。ここで、時刻 $t = kT_s$ (T_s : サンプル周期, $k = 1, 2, \dots$) におけるエージェントの状態を $\mathbf{x}_i[k]$, 入力を $\mathbf{u}_i[k]$ とする。各エージェントは2次元平面を移動するものとし、初期状態を \mathbf{x}_{0i} , 状態と入力は2次元のベクトルとする。

次に、エージェント間のネットワーク構造を与える。本稿では、エージェントの移動と、パケット衝突による通信誤りを考慮するため、エージェント間のネットワーク構造は時間変化するものとする。したがって、時刻 k におけるネットワーク構造を、有向グラフ $\mathcal{G}[k] = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}[k]\}$ により定義する。ここで、 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ は、グラフを構成するエージェントの集合である。また $\mathcal{E}[k] = \{(i, j) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}\}$ は、通信の経路が存在するエージェントの組の集合である。

エージェント j から i への通信が可能なとき、すなわち $(j, i) \in \mathcal{E}[k]$ のとき、エージェント j は i に隣接するという。そして、すべてエージェントの隣接関係を隣接行列 $\mathbf{A}[k] = [a_{ij}[k]] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ によって表す。隣接行列の要素 $a_{ij}[k]$ は、エージェント j が i の隣接であるときに1、それ以外の場合に0となる。また、エージェント i が隣接する他エージェントの集合を、エージェント i の隣接集合と呼び $\mathcal{N}_i[k] = \{j \in \mathcal{V} | (j, i) \in \mathcal{E}[k], i \neq j\}$ と定義する。

2.2 合意制御

マルチエージェントシステムにおいては、大域的な位置情報が得られないことを想定して、エージェント間で位置情報を交換しながら一箇所に集合することが基本的な合意制御として捉えられている [17]。マルチエージェントシステムが合意を達成するとは、任意の初期状態 $\mathbf{x}_{01}, \mathbf{x}_{02}, \dots, \mathbf{x}_{0N}$ に対して全てのエージェントの状態 $\mathbf{x}_1[k], \mathbf{x}_2[k], \dots, \mathbf{x}_N[k]$ がある値に漸近的に一致すること、すなわち、すべての $i \in \mathcal{V}$ について

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{x}_i[k] = \alpha \quad (2)$$

が成り立つことである。ここで、収束する値 $\alpha \in \mathbb{R}^2$ は合意値と呼ばれる。また、エージェントの集合問題において合意値は初期状態の平均値 $\bar{\mathbf{x}}_0$ となること、つまり、

$$\alpha = \bar{\mathbf{x}}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{0i} \quad (3)$$

とする。マルチエージェントシステムの合意制御の中でも、特に式 (4) が成り立つとき、平均合意を達成するという。

エージェント i の入力 $\mathbf{u}_i[k]$ は、自己の状態と隣接するエージェントの状態の偏差を用いて、次式で与えられる。

$$\mathbf{u}_i[k] = -\varepsilon_i[k] \sum_{j=1}^N a_{ij}[k] (\mathbf{x}_i[k] - \mathbf{x}_j[k]) \quad (4)$$

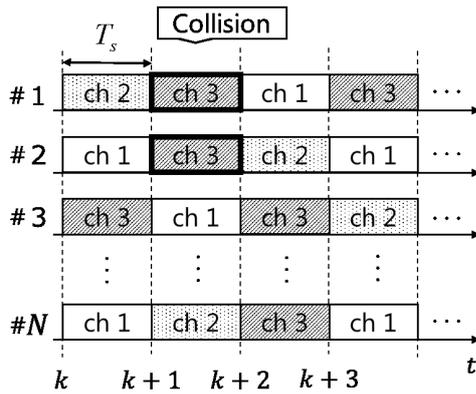


図 1: タイムチャート

表 1: シミュレーション諸元

Parameters	Values
エージェントの配置	一様ランダム配置
エージェント数 (N)	10, 20
配置領域	200 [m]×200 [m], 283 [m]×283 [m]
通信・制御周期 (T_s)	100 [ms]
最大速度	10 [m/s]
収束半径 (δ)	20 [m]
通信範囲 (R)	100, 200, 300 [m]
チャンネル数 (C)	3 ~ 10
試行回数	1000 [回]

ここで $\varepsilon_i[k]$ は $0 < \varepsilon_i[k] < 1/\Delta[k]$ を満たす実数である。また、 $\Delta[k]$ はグラフの最大次数である。

3. 通信範囲とパケット衝突

本稿では、簡単のために、エージェント間の通信をマルチチャンネル Slotted-ALOHA によってモデル化する。各エージェントの送信タイミングは同期されており、スロット毎に C 個ある通信チャンネルの中からランダムに選択して使用するものとする。そのとき時刻 $t = kT_s$ において、エージェント j がエージェント i の隣接 (i が j の状態情報を受信可能) となるために必要な条件を以下の 2 つとする。

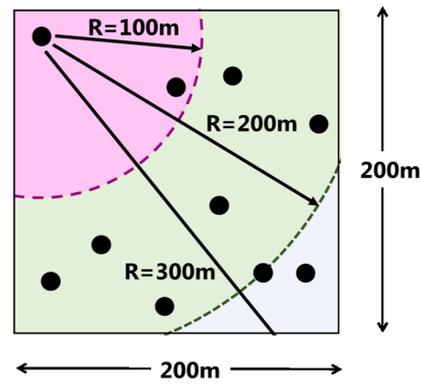
- エージェント i の通信範囲 R 内に存在する。

$$\|x_i[k] - x_j[k]\| \leq R \quad (5)$$

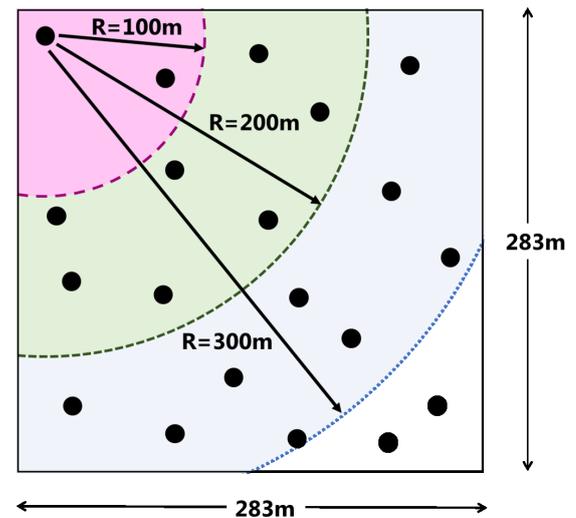
- エージェント i と、 i の通信範囲内に存在する j 以外のエージェントと使用する通信チャンネルが重複しない。
(パケットが衝突しない)

これらの条件を満たす場合に隣接行列の要素を $a_{ij} = 1$ とする。それ以外の場合には、エージェント j は i の通信範囲外となる、またはパケットが衝突するとして $a_{ij} = 0$ とする。なお、エージェント i がどのエージェントとも通信できなかった場合は、入力は 0 となり、その時刻では移動しない。

与えられる通信チャンネル数が限られているため、通信範囲内のエージェントが増加したとき、パケット衝突率は高



(a) エージェント数 $N=10$



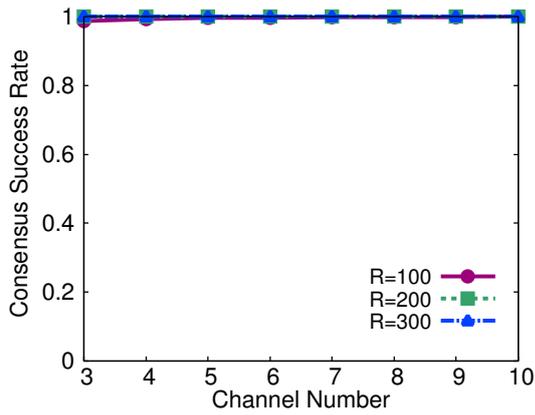
(b) エージェント数 $N=20$

図 2: 初期配置と通信範囲

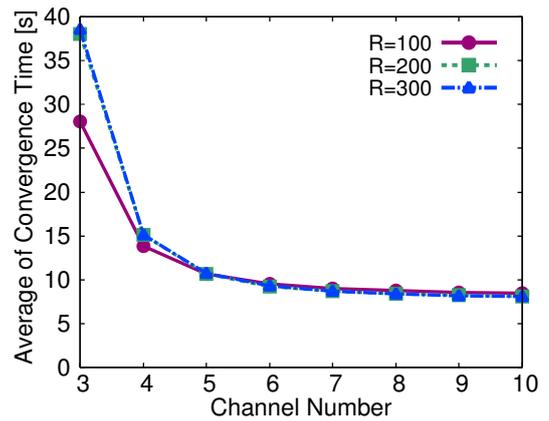
くなる。したがって、エージェントが移動する場合、また、通信範囲を拡大・縮小した場合にパケット衝突率は変化する。一方、制御分野における研究では、隣接エージェント数が多いほど、素早く合意に近づくことができるとされている。したがって、制御の観点では、通信範囲を拡大して隣接エージェント数を増加させることで制御品質を向上でき、通信の観点では、通信範囲内のエージェント数が増加することでパケット衝突率が高くなるというトレードオフの関係が存在する。

4. 評価指標

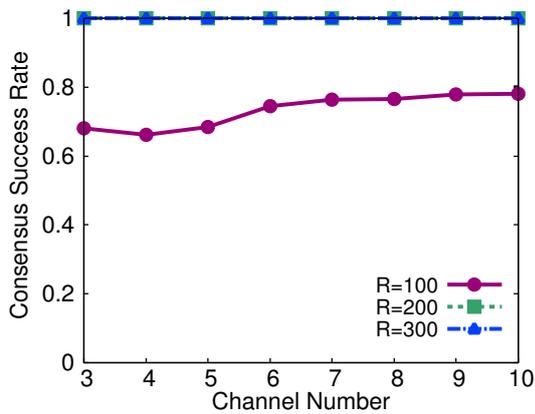
マルチエージェントシステムの合意制御において、合意を達成できるかどうか、いかに早く合意を達成するかが重要な問題となる。これらの問題を合意成功率と収束時間によって評価する。本稿では、式 (6) のように、エージェント間の距離の最大値が、ある距離 δ 以下に収束することを合意の成功と定義する。そして、合意が成功する確率を合意成功率とする。



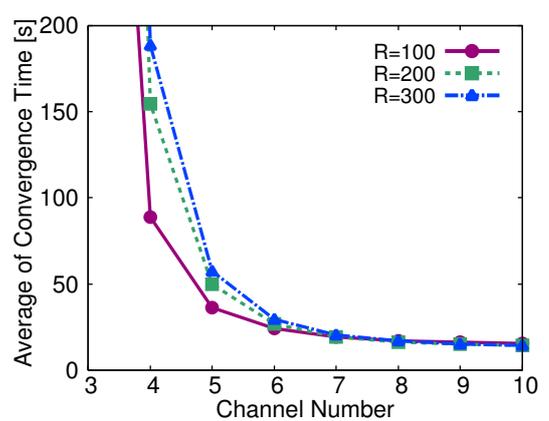
(a) エージェント数 N=10



(a) エージェント数 N=10



(b) エージェント数 N=20



(b) エージェント数 N=20

図 3: チャンネル数に対する合意成功率

図 4: チャンネル数に対する平均収束時間

また、合意を達成するまでにかかる時間を収束時間として定義する。

$$\max_{\forall i,j} \|x_i[k] - x_j[k]\| < \delta \quad (6)$$

一般的に、隣接エージェント数が多いほど、収束時間が小さくなるとされている。

5. シミュレーション

5.1 シミュレーション諸元

パケット衝突率の変化が合意制御に与える影響を解析するため、計算機シミュレーションを行う。本稿で扱うのは、複数のロボットが位置情報を交換しながら、式 (1) および式 (4) にしたがって移動し、一箇所へ集合する合意制御である。ここで、入力における係数 $\varepsilon_i[k]$ は、各エージェントが状態情報を得たエージェントとの中心へ移動するように

$$\varepsilon_i[k] = \frac{1}{|\mathcal{N}_i| + 1} \quad (7)$$

とする。ここで $|\mathcal{N}_i|$ は、隣接するエージェント数である。また、最大速度を超えての移動はできないものとする。シミュレーション諸元を表 1 に示す。エージェント数は 10, 20 の 2 通りを考え、エージェントの密度は一定のままで小規模なシステムと大規模なシステムの比較を行った。エー

ジェントの配置は図 2 に示すように一様ランダム配置とするが、初期配置の状態でグラフが非連結となり合意を達成する可能性がない場合は試行から除いた。そして通信範囲とチャンネル数を変えることにより、パケットの衝突率を変化させ、制御品質を評価した。制御品質の評価指標については、前節で述べた通りである。

5.2 合意成功率

合意成功率の結果を図 3 に示す。横軸はチャンネル数、縦軸は合意成功率を示す。通信範囲が 100m のとき、エージェント数 10, 20 いずれの場合にも合意に失敗していることがわかる。エージェント数 10 の場合、チャンネル数 3 のときに、わずかではあるが合意に失敗している。エージェント数 20 の場合、チャンネル数が大きいときにも合意に失敗している。これらの合意失敗には 2 つの原因が考えられる。1 つ目は、エージェントが孤立する場合である。初期配置では通信範囲内にエージェントが存在していたとしても、パケット衝突によって他のエージェントの状態情報を受け取ることができず、移動しない間に通信範囲のエージェントが存在しなくなり、合意に失敗することが考えられる。2 つ目は、エージェントが複数のグループに分裂す

る場合である．各エージェントは，位置情報を取得した通信範囲内のエージェントに近づくように移動するため，必ずしも全エージェントの初期位置の平均の方向に移動するとは限らない．したがって，初期配置が複数箇所に偏っている場合には，エージェントのグループが複数の箇所に集まっていき，グループが分裂することで合意に失敗する．エージェント数が 20 の場合に注目すると，チャンネル数が大きく，パケット衝突率が小さい場合にも合意に失敗しているため，前者の影響と比較して後者の影響が大きいことがわかる．

一方，通信範囲が 200, 300m のとき，エージェント数 10, 20 いずれの場合にも合意に成功している．これより，合意成功の可否はパケット衝突率が低いかどうかではなく，システムの規模に対して十分に通信範囲が大きいかどうかの影響が大きいことが明らかとなった．

5.3 収束時間

収束時間の結果を図 4 に示す．横軸はチャンネル数，縦軸は平均収束時間を示しており，合意に失敗した場合は除いている．エージェント数が 10, 20 の両方の場合において，チャンネル数が小さい領域では，通信範囲が 100m のときに最も収束時間が早くなっている．チャンネル数が大きい領域では，通信範囲の大きさに関わらず，同等の収束時間となっている．合意成功率の結果の図 3 を併せて見たとき，以下の 2 つが明らかになる．1 つ目は，通信範囲縮小によってパケット衝突率は小さくなり，収束時間は早くなるが，大規模なシステムの場合には，分裂による合意失敗の可能性が高くなることである．2 つ目は，通信範囲拡大に伴う隣接エージェント数増加による収束時間短縮は期待できないが，大規模なシステムの場合には，確実に合意成功できることである．

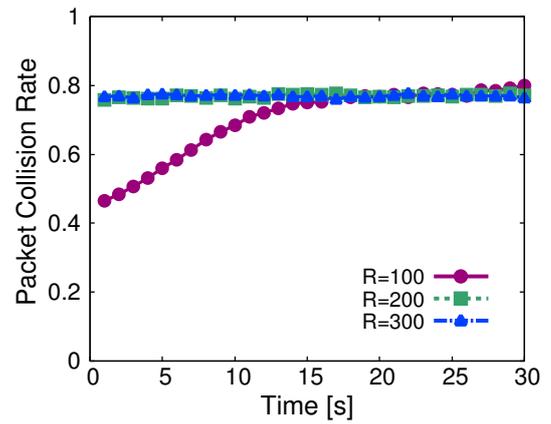
5.4 パケット衝突率の時間変化

これらの結果となる理由を考察するため，パケット衝突率の時間変化を見てみる．本稿では，各エージェントが各タイムスロットで隣接エージェント数が 0 となった場合に，パケット衝突が生じたと定義する．そして，10 タイムスロット間で生じたパケット衝突の平均をパケット衝突率 $P_{\text{COLLISION}}[l]$ ($l = 10, 20, \dots$) とする．

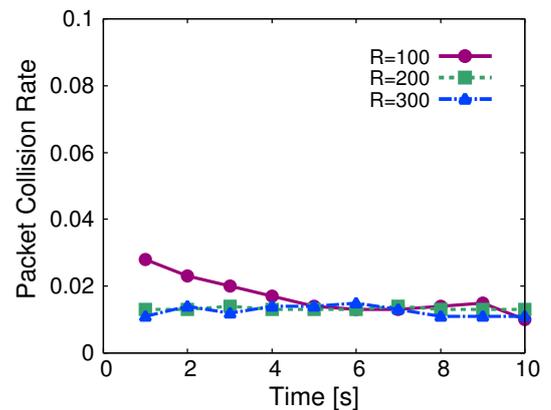
$$P_{\text{COLLISION}}[l] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{10} \sum_{k=l-10}^{l-1} c_i[k] \right) \quad (8)$$

$$c_i[k] = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathcal{N}_i[k] = 0 \\ 0 & \text{if } \mathcal{N}_i[k] > 0 \end{cases} \quad (9)$$

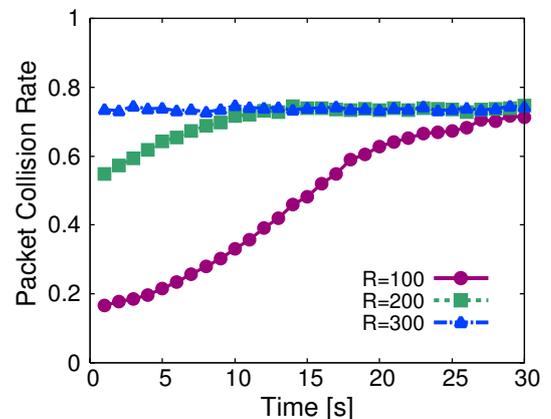
エージェント数が 10 のときには，チャンネル数 3 と 10，エージェント数が 20 のときには，チャンネル数 5 と 10 に注目し，パケット衝突率の変化を図 5 に示した．まず，図



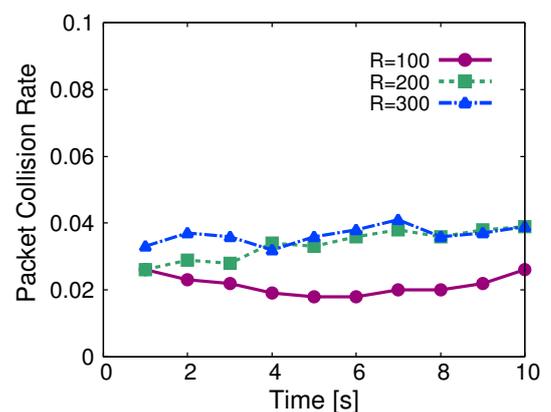
(a) エージェント数 $N=10$, チャンネル数 $C=3$



(b) エージェント数 $N=10$, チャンネル数 $C=10$



(c) エージェント数 $N=20$, チャンネル数 $C=5$



(d) エージェント数 $N=20$, チャンネル数 $C=10$

図 5: パケット衝突率の時間変化

5(a),(c) のチャンネル数が小さい場合を見る。通信範囲が 100m のときは、初期配置から合意に近づくにつれて、パケットの衝突率が高くなっていくことがわかる。通信範囲 200, 300m のときには、初期配置から多くのエージェントが通信範囲内に存在するため、パケット衝突率は一定である。これより、初期位置から合意に近づくまでの間、通信範囲縮小によるパケット衝突率の減少によって収束時間が早くなることを確認できた。一方、図 5(b),(d) のチャンネル数が大きいときを見ると、通信範囲の大小に関わらず、時間に対しておおよそ一定のパケット衝突率となっていることがわかる。そして、十分な通信チャンネルが与えられている場合には、通信範囲を大きくしたとしても、パケット衝突率が小さくなっていることを確認できた。正確には、図 5(b) を見ると、通信範囲が 100m のときに、200, 300m と比較して合意に達するまでのパケット衝突率がわずかに大きくなっているが、これは初期配置で通信範囲内のエージェント数が少なく、隣接エージェント数が 0 になってしまう確率が高くなるためである。

6. むすび

本稿では、通信の失敗が起こるマルチエージェントシステムの合意制御について考えた。そして、通信範囲、通信チャンネル数に伴うパケット衝突率の変化が、規模が異なるマルチエージェントシステムの合意制御に対して与える影響を計算機シミュレーションにより解析した。その結果、通信範囲を縮小することで、初期位置から合意に近づくまでの間に、パケット衝突率が低くなることで、収束時間を早くできることがわかった。しかし、通信範囲縮小によってエージェントが複数のグループに分裂し、合意失敗が生じることから、システムの規模に合わせた十分な通信範囲確保が重要であることがわかった。

謝辞 本研究を進めるにあたり、適切なアドバイスと有意義な議論を頂いた名古屋大学教養教育院山里敬也教授、名古屋大学工学研究科道木慎二教授に感謝する。本研究の一部は、JSPS 科研費(若手(B))[15K21071]を受けて行われたものである。記して謝意を表す。

参考文献

[1] R. Olfati-Saber and R.M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.49, no.9, pp.1520–1533, Sept. 2004.

[2] W. Ren and R.W. Beard, "Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.50, no.5, pp.655–661, May 2005.

[3] W. Ren, R.W. Beard, and E.M. Atkins, "Information consensus in multivehicle cooperative control," IEEE Control Systems, vol.27, no.2, pp.71–82, April 2007.

[4] H. Zhang, G. Feng, H. Yan, and Q. Chen, "Observer-based output feedback event-triggered control for consensus of multi-agent systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.61, no.9, pp.4885–4894, Sept. 2014.

[5] R.W. Beard, J. Lawton, and F.Y. Hadaegh, "A coordination architecture for spacecraft formation control," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.9, no.6, pp.777–790, Nov. 2001.

[6] L.C.A. Pimenta, G.A.S. Pereira, N. Michael, R.C. Mesquita, M.M. Bosque, L. Chaimowicz, and V. Kumar, "Swarm coordination based on smoothed particle hydrodynamics technique," IEEE Transactions on Robotics, vol.29, no.2, pp.383–399, April 2013.

[7] Q. Zhang and J.-F. Zhang, "Distributed quantized averaging under directed time-varying topologies," IFAC Proceedings Volumes, vol.44, no.1, pp.2356–2361, Jan. 2011.

[8] H.J. Savino, C.R.P. dosSantos, F.O. Souza, L.C.A. Pimenta, M. deOliveira, and R.M. Palhares, "Conditions for consensus of multi-agent systems with time-delays and uncertain switching topology," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.63, no.2, pp.1258–1267, Feb. 2016.

[9] T. Li and J.F. Zhang, "Consensus conditions of multi-agent systems with time-varying topologies and stochastic communication noises," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.55, no.9, pp.2043–2057, Sept. 2010.

[10] C.N. Hadjicostis, N.H. Vaidya, and A.D. Dominguez-Garcia, "Robust distributed average consensus via exchange of running sums," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.61, no.6, pp.1492–1507, June 2016.

[11] Y. Hatano and M. Mesbahi, "Agreement over random networks," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.50, no.11, pp.1867–1872, Nov. 2005.

[12] C.W. Wu, "Synchronization and convergence of linear dynamics in random directed networks," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.51, no.7, pp.1207–1210, July 2006.

[13] A. Tahbaz-Salehi and A. Jadbabaie, "A necessary and sufficient condition for consensus over random networks," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.53, no.3, pp.791–795, April 2008.

[14] Y. Zhang and Y.-P. Tian, "Consentability and protocol design of multi-agent systems with stochastic switching topology," Automatica, vol.45, no.5, pp.1195–1201, May 2009.

[15] Y. Fan, L. Liu, G. Feng, C. Song, and Y. Wang, "Virtual neighbor based connectivity preserving of multi-agent systems with bounded control inputs in the presence of unreliable communication links," Automatica, vol.49, no.5, pp.1261–1267, May 2013.

[16] 野呂俊介, 小林健太郎, 岡田 啓, 片山正昭, "通信範囲とパケット衝突がマルチエージェントシステムの合意制御に与える影響," 信学技報, RCC2016-62, pp.149–154, Dec. 2016.

[17] 桜間一徳, 中野和司, "非対称な時間遅れをもつマルチエージェントシステムの平均合意問題," 計測自動制御学会論文集, vol.47, no.2, pp.100–109, Dec. 2011.