

個体間の移動速度差を考慮した個体群モデルにおける 交流頻度の実験的評価

Experimental Evaluation of Interaction Frequency in Population Protocol Model of Agents with Different Moving Speeds

本村 駿弥†
Shunya Motomura

首藤 裕一†
Yuichi Sudo

角川 裕次†
Hirotsugu Kakugawa

増澤 利光†
Toshimitsu Masuzawa

1. はじめに

分散システムとは、ネットワークで接続された多数の計算機からなるシステムである。近年、計算機の能力や利用できる資源が制限されている場面での応用が増えてきている。例えば、電力供給に制限がある無線センサネットワークでは、能力の高い計算機はバッテリー寿命の短さが原因で使えない場合がある。このような計算能力や利用できる資源の制約の中で計算機を効率的に利用するために、能力の弱い計算機を協調して動作させるための研究が行われている [1, 2, 3]。

Augluin らは、資源の非常に制約された小型デバイスで構成されるモバイルネットワークの抽象モデルとして個体群プロトコルモデル (population protocol model) [1, 2] を提案した。このモデルにおいては、個体 (センサノード) 間の通信は、物理的距離が十分に接近したときにのみ行われる。この 2 個体間での通信のことを「交流」と呼ぶ。例えば、通信範囲の極めて狭いセンサノードを鳥の群れの一羽一羽に取り付けることで構成されるセンサネットワークは、個体群プロトコルモデルで表現することができる。なぜならば、このようなセンサネットワークにおいては、各ノードの通信範囲が極めて狭いために、ノード間の通信はそれらのノードを付けられた鳥同士が十分に接近したときにのみ行えると考えられるからである。

個体群プロトコルでは既に多くの研究が存在しており、実験的評価の方法としてシミュレーションやテストベッド開発、実際のセンサ群でのテストなどがある。Chatzigiannakis ら [10] は個体群プロトコルのシミュレータを作成した。彼らは個体群プロトコルのスケジューラとして、ランダムスケジューラ、状態スケジューラ、遷移関数スケジューラを採用できるシミュレータを作りシミュレーションによって比較した。ランダムスケジューラは、全ペアを独立かつ一様ランダムに同確率で選択する。状態スケジューラは、独立かつ一様にペアを選ぶのではなく、プロセスの状態に基づき交流するペアを選択する。初めに状態のペアを選択し、続いてそれぞれの状態からプロセスを 1 つずつ選択する。これにより、意味のある遷移をより多く選択できる遷移関数スケジューラでは、遷移する状態ペアのみを選択するように制限した状態スケジューラである。つまり、遷移をしない個体ペアの交流は無視する。これらのスケジューラを論理 OR プロトコル、リーダー選挙プロトコル、多数決プロトコルにおいてシミュレーションにより実験的に評価している。ただし、これらの従来の個体群プロトコルモデルでは、全ての個体が同じ速度で動くことを前提としている。また、全ての個体において交流確率は同

じと考えている。しかしながら、移動速度が同じであり、交流確率が同じであるという場合は現実世界において限定的な状況である。本論文では、個体群プロトコルモデルでそのような限定的な状況ではない場合を考えられるようにするために、一部の個体だけが他とは独立した速度、方向で移動する場合について考える。また、個体群の個体それぞれが他の個体と独立した速度、方向で移動する場合について考える。そのような個体群モデルのことをハイブリッド個体群モデルと呼ぶ。本論文では、従来の個体群プロトコルモデルと比較してハイブリッド個体群モデルにおける個体の交流頻度をシミュレーションにより実験的に解析する。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 節では、従来の個体群プロトコルモデルの説明を行う。第 3 節では、提案モデルの説明を行う。第 4 節では、本論文で行ったシミュレーション実験についての説明と結果を示し、考察を行う。第 5 節では、本論文の結果をまとめ、今後の課題について述べる。

2. 個体群プロトコル

個体群とは、個体と呼ばれる有限個のセンサノードで構成されるシステムである。各個体は状態を持ち、交流 (他の個体との通信) の発生によってその状態を変化させる。単純かつ弱連結有向グラフ $G(V, E)$ で表現する。各個体は状態を持ち、交流 (他の個体との通信) の発生によってその状態を変化させる。単純かつ弱連結有向グラフ $G(V, E)$ で表現する。 $V(|V| \geq 2)$ は個体の集合、 $E(\subseteq V \times V)$ は有向辺の集合を表す。各辺は、発生しうる個体間の関係を表す。 $(u, v) \in E$ のとき、個体 u, v はそれぞれ呼びかけ側、応答側として交流しうる。任意の二つの個体 $u, v \in V$ において、 $(u, v) \in E \Leftrightarrow (v, u) \in E$ を満たす場合、 $G(V, E)$ を無向グラフと呼ぶ。本論文では、単純無向グラフのみを考え、 $n = |V|, m = |E|$ と定義する。相異なる 2 個体 $u, v \in V$ 上の距離 (最短の経路長) を l として定義し、 $d(u, v)$ と表す。本論文では無向グラフのみを考えるため任意の $u, v \in V$ について $d(u, v) = d(v, u)$ である。また、任意の $v \in V$ について $d(v, v) = 0$ とする。

個体群プロトコルは、 $P(Q, Y, I, T, O)$ と表す。 Q は個体の状態の有限集合、 Y は個体の出力シンボルの有限集合を表し、 I は $I: V \rightarrow \mathcal{I}$ ($\mathcal{I}$ は個体がとりうる識別子の集合) となる関数を表す。各個体 v は固有の識別子 $I(v) \in \mathcal{I}$ を持つ。 $\mathcal{I}$ の要素のうち、ある個体の識別子に一致するものを真の識別子、そうでないものを偽の識別子と呼ぶ。二つの個体間で交流が発生するとき、遷移関数 $T: (Q \times \mathcal{I}) \times (Q \times \mathcal{I}) \rightarrow Q \times Q$ は二つの個体の状態と識別子に基づいて次の状態を

定める．出力関数 $O: Q \times J \rightarrow Y$ は各個体の出力をその状態と識別子をもとに定める．すなわち，状態 s の個体 v の出力は $O(s, v.id)$ となる．

状況は，各個体の状態を特定する写像 $C: V \rightarrow Q$ である．以降，プロトコル P における状況の集合を $C_{all}(P)$ とする． $(C'(u), C'(v)) = T(C(u), u.id, C(v), v.id)$ ，かつ任意の個体 $w \in V \setminus \{u, v\}$ について $C'(w) = C(w)$ が成り立つとき，状況 C_e は交流 $e = (u, v)$ によって状況 C' に遷移するといい， $C \rightarrow C'$ と表す．スケジューラは，各時刻に発生する交流を決定する．多くの従来研究では，一様ランダムなスケジューラ $\Gamma = \Gamma_0, \Gamma_1, \dots$ を仮定している．ここで，各 $\Gamma_t \in E$ は，時刻 t で発生する交流を表現する確率変数である．すなわち，時刻 t において，隣接する 2 つの個体 u と v が交流する確率は $Pr(\Gamma_t \in \{(u, v)(v, u)\}) = 2/m$ である．

初期状況 C_0 に対して，スケジューラ Γ が与えられたときのプロトコル P の実行を $\Xi_P(C_0, \Gamma) = C_0, C_1, \dots (s.t. \forall t \geq 0, C_t \rightarrow C_{t+1})$ で定める．

3. 提案モデル

本節では，個体の移動速度差を考慮した場合の個体群モデルについて説明する．従来の個体群モデルでは，各個体は自身の移動を制御できず，全ての個体が同じ速度の場合を想定している．本論文では，各個体が他の個体から独立した目的地，速度，方向を自由に選択して移動できるような個体群モデルを考え，ハイブリッド個体群モデルと呼ぶこととする．

2 次元ユークリッド平面 $\mathbb{R}^2$ に n 個の個体が存在するものとする．ここでは簡単のため，個体が存在する空間を 2 次元ユークリッド平面に限定するが，3 次元ユークリッド空間 $\mathbb{R}^3$ ，あるいは一般の正整数 k について $\mathbb{R}^k$ 上に個体を配置するモデルも同様に定義できる．

3.1 移動モデル

2 次元ユークリッド平面上を動く n 個の個体はそれぞれ異なった動きをすることができる．一定の時間間隔を 1 ラウンドとして，個体は各ラウンドで移動する距離と方向または目的地を持つ．1 ラウンドで移動する距離は後述する交流半径よりも小さいものとする．

3.2 スケジューラ

2 次元ユークリッド平面において，2 つの個体が交流する条件は以下の通りである．個体群中の全個体は共通の交流可能半径を持つ．各個体から見て，交流可能半径内に個体が 1 つのみある場合に交流を行う．もしその交流可能半径内に 2 つ以上の個体が存在する場合は，それらの個体は無線通信によるコリジョンが起こればと考えられるので交流しないこととする．また，個体 v の交流可能半径内に他の個体 (u とする) が一つしかない場合でも，個体 u の交流可能半径内に v 以外の個体が存在する場合は，やはりコリジョンが起こればと仮定して交流は発生しないものとする．直近に交流した同じ個体と連続して幾度も交流することを避けるためカウントダウンタイマーを用いた交流の制限を行う．各個体は，交流を行う度に，直近に交流を行ったことを示すフラグを立てる．交流した位置から，交流可能半径を出る距離だけ進んだときに，再度交流が可能である状態にするようにフラグを下ろすこととする．したがって，交流不可能フラグが立っている間に他の交流可能個体の交流半径内に入ったとしても，交流は行わない．このように設定す

ることによって，同じ個体と連続して交流を行うという現象を避けることができる．なお，個体 u と個体 v が交流可能半径内に位置し， u と v の交流半径内には交流不可状態 (フラグがあがった状態) な個体のみが存在する場合にも， u と v は交流を行わないものとする．

4. 実験と結果

本節では，はじめに個体間の移動速度差を考慮した個体群モデルにおける交流頻度を調べる実験を行うための環境と実験に使用する設定を説明した後，実験の結果を示す．実験は実環境を想定した計算機上でのシミュレーション実験を 2 種類行う．

4.1 シミュレーション環境

本実験では，計算機上でのシミュレーション実験における基本的な設定を説明する．

ノードは 2 次元ユークリッド平面のフィールド上にランダムに配置する．フィールドの大きさは， 1000×1000 の正方形とする．ノード数は 50 とし，ノードを $0, 1, \dots, 49$ と表す．各ノードはこのフィールド内を自由に移動することが可能である．また，各ノードは交流半径を持ち，この交流半径内に存在するノードとのみ交流可能である．この交流半径は全てのノードにおいて 10 とする．交流判定をする単位時間のラウンド数は 1,000,000 回に設定する．シミュレーション結果はそれぞれ 100 回行ったものの平均値をグラフ化する．

プログラムの流れは以下の通りである．

1. フィールド上にランダムにノードを配置．
2. ノードに速度を与える．
3. ノードの移動方向をランダムに決定．
4. 単位時間当たりのループを繰り返す．

(ア) 全ノードを現在の位置から，次の位置へ移動

(イ) 交流ノードの選択

(ウ) 交流実行

5. 結果を出力．

ノード i と j が交流した回数を結果としてグラフに出力する．

移動モデル ノードは最初に与えられた速度で等速直線運動を行う．指定されたフィールドの領域の端まで到達すると，その領域の線に対して入射角と反射角が同じ角度になるように反射する．

交流ノードの選択 交流半径 (10) 以内に自分以外のノードが 1 つのみあった場合，そのノードの交流不可能フラグが立っていないければ，交流を実行する．もし，交流半径内に 2 つ以上ノードがあったら無線通信のコリジョンを避けるため交流を行わない．一度交流したノードはすぐにまた近くにあった同じノードと交流するのを避けるために，一定期間は交流を行わないように，交流不可能フラグを立て，カウントダウンタイマーを設置する．カウントダウンタイマー終了後に交流不可能フラグを下ろし，交流可能になる．

カウントダウンタイマー 交流半径 (10) よりも速度が十分に小さい前提でこのシミュレーションを行う．交流を一度したノードと再度すぐに交流することがないように，一定間隔をあけて次の交流をするようにするためにこのカウントダウンタイマーを用いる．移動速度が速いノードほどすぐに交流を再開し，遅いノードは再開までに時間がかか

る．ノードの速度を W とすると，交流した後 $[10.0 \div W]$ の間，交流不可能となる．

なおどのノードも自分自身と交流しないので，実験のグラフはすべて $i = j$ の値は空白となっている．

4.2 実験 1

ノードの速度を $0.2 \sim 10.0$ の範囲内で均等に分布させる．ノード数を 50 としているので，ノード間に 0.2 ずつ差をつけて移動速度を決定する．つまり，ノード i の速度を $0.2(i + 1)$ とする．

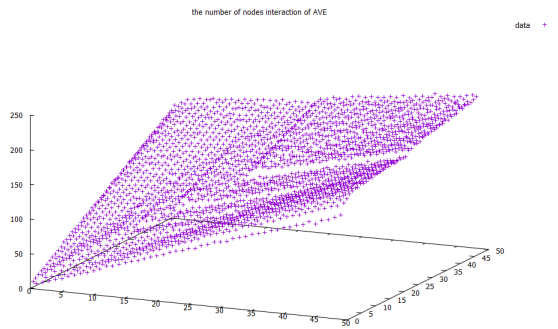


図 1a:実験 1 の結果グラフ(俯瞰)

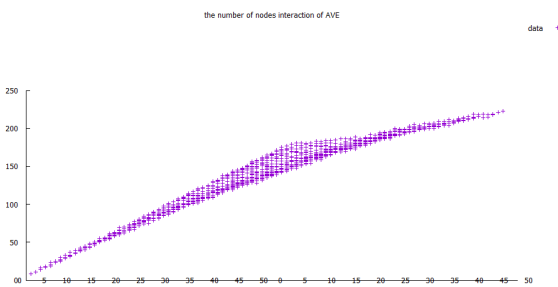


図 1b:実験 1 の結果グラフ($i = 50, j = 0$)

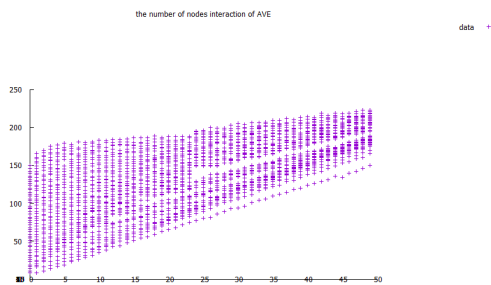


図 1c:実験 1 の結果グラフ(i 軸側から)

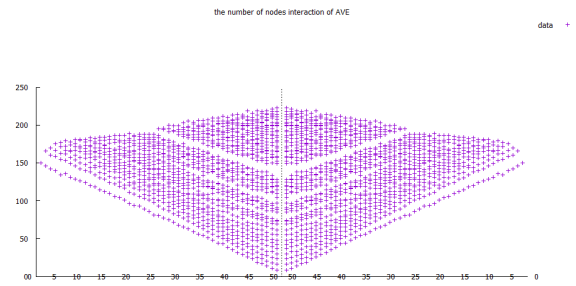


図 1d:実験 1 の結果グラフ(原点から)

4.3 実験 2

ノードの速度を 2 種類のみに分ける．一方は遅いノード群として，速度 1.0 とする．もう一方は速いノード群として，速度 10.0 とする．どちらの速度のノードもそれぞれ 25 個ずつとする．

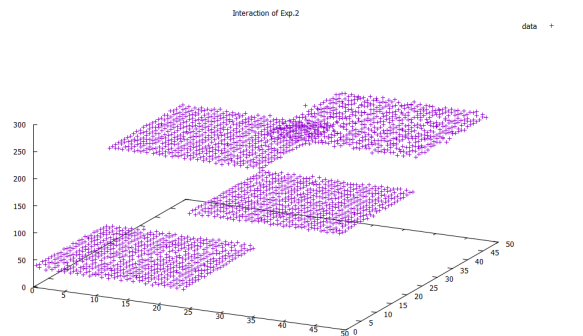


図 2a:実験 2 の結果グラフ(俯瞰)

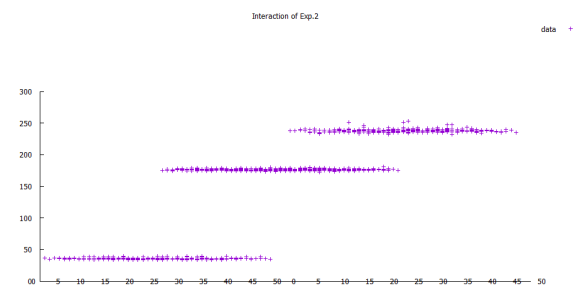


図 2b:実験 2 の結果グラフ($i = 50, j = 0$)

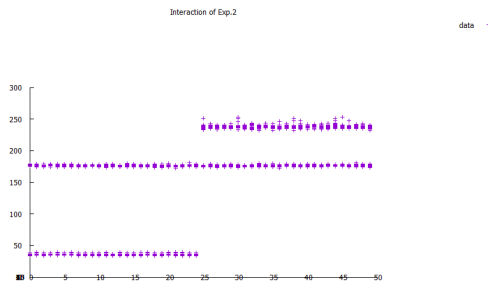


図 2c:実験 2 の結果グラフ(i 軸側から)

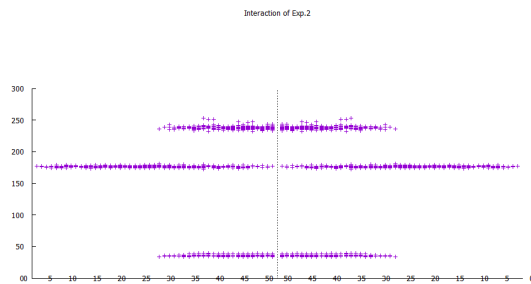


図 2d:実験 2 の結果グラフ(原点から)

4.4 考察

本実験の結果より、速いノードの交流頻度は速ければ速いほど高く、対照的に遅いノードの交流頻度は遅ければ遅いほど低くなることからわかる。実験 1 のように最も速いもの同士の交流頻度であるのは原点から一番距離が離れた点であり、その点が最も交流頻度が高いのがわかる。実験 2 より、速いノード同士の交流頻度が最も高く、遅いノード同士の交流頻度は最も低い。速いノードと遅いノードの交流頻度はその間に位置する。原因として、速度が速ければ同じ時間経ったときの移動距離が長くなるため他の多くの個体と接触または隣接する機会が多くなる。このことから、実際に個体の速度を上げることで交流頻度を上げることができる。

i 軸側から見た図 1c の 24 番目以降の結果に一部穴がある部分、また前面から見た結果、図 1d における線のように空いている部分について、ここのグラフがなぜ滑らかになっていないかという理由は、次の通りである。交流頻度の設定として用いられたカウントダウンタイマーの値は式(1)をとるため、

$i=24$ の時にカウントダウンタイマーの値が 2 になり、一つ前の $i=23$ の時のカウントダウンタイマーの値が 3 から 1 減るためだと考えられる。同様に、 $i=0$ と $i=1$ の間にも同じような線での空白があるが、 $i=1$ の約 2 倍の数、 $i=0$ のカウントダウンタイマーが発動するために起こっている現象である。($i=0$ のときカウントダウンタイマーは 25, $i=1$ のときカウントダウンタイマーは 13 である。)

5. まとめ

本論文では、個体間の移動速度差を考慮した個体群モデルにおける交流頻度を計算機上のシミュレーションによっ

て解析した。個体の速度が速ければ速いほど交流頻度が高くなることを示し、遅ければ遅いほど交流頻度は低くなることを示した。つまり、個体の速度と交流頻度に正の相関があるということを示した。

以降の課題としては、異なる移動モデルでのシミュレーションを解析することや、速度を変更することによって交流頻度がどのように変化するかを解析することがあげられる。さらに、解くことができる問題のクラスが拡大する領域を探求することや、このような個体間の移動速度差がある場合の個体群モデルによって従来モデルでの計算量が改善できる領域を探求することがあげられる。

謝辞

本研究は一部 JSPS 科研費 17K19977, 16K00018, 18K18000, JST 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] D. Angluin, J. Aspnes, Z. Diamadi, M.J. Fischer, and R. Peralta. Computation in networks of passively mobile finite-state sensors. *Distributed Computing*, 18(4):235-253, 2006.
- [2] D. Angluin, J. Aspnes, D. Eisenstat, and E. Ruppert. The computational power of population protocols. *Distributed Computing*, 20(4):279-304, November 2007.
- [3] I.Suzuki and M.Yamashita. Distributed anonymous mobile robots: Formation of geometric patterns. *SIAM J.Comput.*, 28(4):1347-1363, March 1999.
- [4] A. Gupta, H.Sadawarti and A. Verma. Performance Analysis of MANET Routing Protocols in Different Mobility Models. *I.J. Information Technology and Computer Science*, 73-82, June 2013.
- [5] J. Broch, D. Maltz, D. Johnson, Y. Hu, and J. Jetcheva. “Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols.” *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'98)*, pages 85-97, 1998
- [6] S.Lee, M. Gerla, and C. Chiang. “On-Demand Multicast Routing Protocol.” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99)*, 1999.
- [7] E. Royer, P. Melliar-Smith, and L. Moser. “An Analysis of the Optimum Node Density for Ad hoc Mobile Networks.” *Communications*, 2001. *ICC 2001. IEEE International Conference on*, June 2001.
- [8] M. Sanchez and P. Manzoni. “ANEJOS: a java based simulator ad hoc networks simulator.” *Future Generation Computer Systems*, 17(5):573-583, March 2001.
- [9] Z. Haas. A new routing protocol for reconfigurable wireless networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC)*, pages 562-565, Oct. 1997.
- [10] I. Chatzigiannakis, S. Dolev, S. Fekete, O. Michail, and P. Spirakis. “On the Fairness of Probabilistic Schedulers for Population Protocols” <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2010/2428/>