

Social Particle Swarm: 関係性ダイナミクス分析のための自己駆動粒子系モデル

西本恵太[†] 鈴木麗壘[†] 有田隆也[†]

[†]名古屋大学 大学院情報科学研究科

1 はじめに

集団における個体を自律駆動できる「粒子」ととらえる自己駆動粒子系によって、人の歩行、魚、鳥の群れ等の群集ダイナミクスがモデル化されてきた [1]. 我々は自己駆動粒子系が社会的ダイナミクスの分析にも利用可能であると考え、粒子の状態とゲーム理論の利得行列によって社会的相互作用を表現し、その利得に基づく粒子の移動によって社会における関係性のダイナミクスを表現する抽象社会モデル *Social Particle Swarm* を提案する.

2 モデル

二次元トーラス平面に配置された各々内部状態を持つ N 個の粒子によって、社会における個人を表現する. 各粒子の状態はゲームにおける戦略を表し、付近の粒子 (個体) との社会的相互作用を規定するゲーム利得行列に基づいて利得を得る. 各粒子の戦略は前ステップの周囲の粒子の戦略分布に基づいて変化する. 粒子間の距離の近さは個人間の関係の強さを表し、二粒子が接近すればするほど双方が受ける利得の絶対値が大きくなる. 各粒子は受け取る利得の正負、大きさに基づいて力を発生させ一定の速さ v で移動を行う. 具体的には、自らに利益をもたらす個体には近づいてより多くの利益を得、逆に不利益になる個体からは離れることで損害を低減させる. これは物理的、もしくは社会的に近接する個人間の社会的相互作用の結果に基づいた関係性の変更を表し、関係性のダイナミクスは粒子の動きによって表現される. 本研究では、囚人のジレンマゲームの利得行列を用いてモデルの基本的分析を行う. 粒子の毎ステップにおける行動は以下のふたつのフェーズからなる.

(i) 戦略決定フェーズ: ステップの開始時に自らを中心とした認識半径 R の円内にいる個体を「近隣個体」として定義する. 各エージェントは、他個体に対する協調しやすさを表す協調度 $c_i (= [0, 1])$ を持っている. 近

隣個体集団の中で前ステップにおいて協調を選んだ個体の割合 r_c が $(1 - r_c) < c_i$ を満たすとき、エージェントは現ステップにおける戦略として「協調」を選ぶ. 条件を満たさなければ「裏切り」を選ぶ.

(ii) 移動フェーズ: 粒子 i は自らと各近隣粒子 j の状態 (戦略 s_i, s_j), およびゲーム利得行列 (表 1) によって規定され ($P(s_i, s_j)$: 利得関数), 粒子間の距離 $|\vec{d}_{i,j}|$ ($\vec{d}_{i,j}$: i から j へのベクトル) に反比例した利得 $p_{i,j}$ を得る (式 1). 粒子はゲームの利得が正であった粒子には近づく方向の力を、負であった粒子からは離れる方向の力を発生させる. 力の大きさは利得の絶対値に比例する. 合力 $\vec{c}_i$ を一定速 v で正規化したものをそのステップにおける移動速度ベクトル $\vec{v}_i$ とする (式 2, 3).

表 1: 利得行列 ($\alpha > 1$).

		player j	
		Cooperate	Defect
player i	Cooperate	1	$-\alpha$
	Defect	α	-1

$$p_{i,j} = \frac{P(s_i, s_j)}{|\vec{d}_{i,j}|}, \quad (1)$$

$$\vec{c}_i = \sum_{j \in \text{neighbors}_i} p_{i,j} \frac{\vec{d}_{i,j}}{|\vec{d}_{i,j}|}, \quad (2)$$

$$\vec{v}_i = \frac{v}{|\vec{c}_i|} \vec{c}_i. \quad (3)$$

3 結果

700×700 の二次元トーラス空間において、エージェント数 $N = 700$, 認識半径 $R = 150$, 速さ $v = 10$, 利得変数 $\alpha = 1.4$, 反転確率 $p_m = 0.03$, エージェントの初期配置, および開始ステップ時の戦略はランダムとして 2000 ステップの実験を行い、挙動を観察した. 結果、全体の状態は次の 3 つの状態に落ち着くことが分かった. 状態 1: 全体の半数以上が裏切りを選択し、個体は反発しあって空間を動き続けている状態. 状態 2: ほぼ全員が協調を取り、クラスタを作って固まっている状態. 状態 3: (a) クラスタの形成 → (b) 裏切り個体の侵入と増加 → (c) クラスタの崩壊と個体の拡散という 3

Social Particle Swarm: Self-driven particle model to analyze the dynamics of social relationship

[†] Keita Nishimoto Reiji Suzuki Takaya Arita

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University

つのプロセスが繰り返される状態。協調個体の割合は一定に落ち着くことなく振動する。本研究では状態3に着目し、プロセス(a)~(c)に関して分析を行った。図1(上)はある試行における協調個体の割合、平均近隣個体数の変化、(下)は各エージェントが1ステップに全近隣エージェントから得た総利得 tp の平均値の変化を示す。

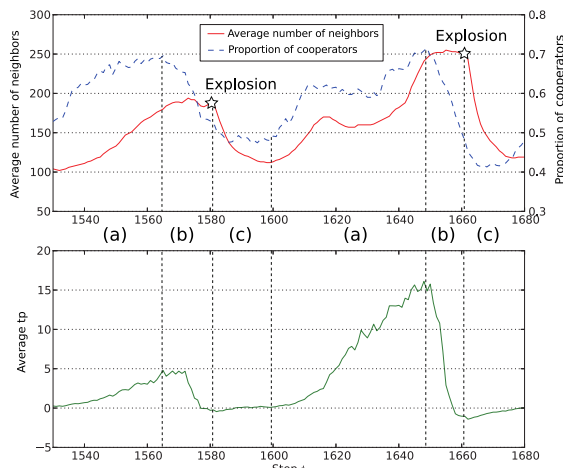


図1: (上) 協調個体の割合、平均近隣個体数の変化。(下) 平均総利得の変化。

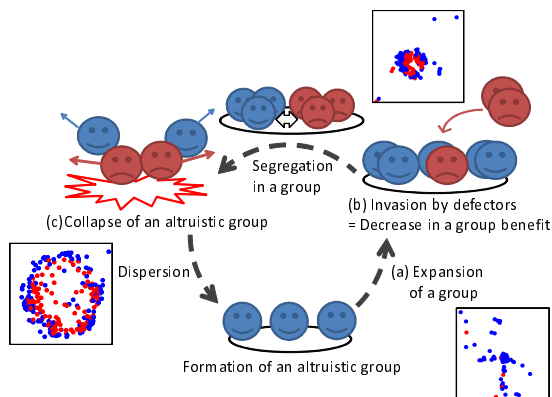


図2: 互恵集団の形成と崩壊のシナリオ (青: 協調個体, 赤: 裏切り個体)。

(a) クラスタ形成: 「協調」を取り、かつ協調傾向の強い個体 (c_i 大) が互いに引き寄せ合い、クラスタを形成し始める。クラスタはある程度大きくなると周囲の個体を引き込むためさらにその大きさを増す。個体間の距離が近くなるため、平均近隣個体数が上昇する。またクラスタ内では、元々裏切り戦略をとっていた個体も多数派である協調個体に影響されて戦略を変更す

るため、協調個体の割合と平均利得が上昇する。

(b) 裏切り個体の侵入: クラスタが大きくなると、「裏切り」を取り、かつ c_i が低い個体がクラスタ内に多く入り込むようになる。 c_i が極端に低い個体は協調個体が多いクラスタ内でも裏切り戦略を取り続けることが出来る。低 c_i 個体の侵入や、突然変異が原因となってクラスタ内の裏切り個体の数がある程度まで増えると、これまで協調戦略をとってきた個体が裏切りへと戦略を反転させ始め、裏切り個体の数がさらに増加する。同時に協調者への搾取と裏切り合いが広まるので平均利得が急落する。裏切り個体がクラスタの中心部に集まり、協調個体はクラスタの外延部に移動するという「分化」が発生し始め、中心部の裏切り個体から離れようとする力が協調個体同士が引き合う力を超えたとき、クラスタは崩壊し、個体は爆発するように拡散する。

(c) 個体の拡散と新たなクラスタ形成: クラスタ中心部にいた裏切り個体同士が反発しあいながら外延部の協調個体を追いかけて、協調個体が外側へ拡散するため、クラスタが爆発するような現象が見られる。各個体間の距離が急激に広がるため、平均近隣個体数は減少し協調個体の割合も減少する。また、一斉に個体が移動するため、その直後は空間内に個体密度の偏りが発生する。個体密度の低い場所において高協調度個体が引き合いクラスタをつくると、周囲に多少の裏切り個体が存在したとしても維持される。ここに他の個体が引き寄せられ始め、再び大きなクラスタが形成される。

4 まとめ

粒子の状態とゲーム理論の利得行列によって社会的相互作用を表現し、その利得に基づく粒子の移動によって社会における関係性のダイナミクスを表現する *Social Particle Swarm* を提案した。本研究で観察されたダイナミクスは、社会における互恵集団の形成、その拡大、裏切り者の侵入による集団の崩壊を表現する(図2)。ネットワークの形成と崩壊が繰り返されるダイナミクスは他の研究[2]でも報告されており、その普遍性を示しているものと考えられる。

参考文献

- [1] D. Helbing. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 73, pp. 1067–1141, 2001.
- [2] M. Cavaliere et al. Prosperity is associated with instability in dynamical networks. *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 299, pp. 126–138, 2012.