

会話のネットワークにおける集団の合意形成

理学専攻・情報科学コース 1840659 久保 鮎乃

1 はじめに

現実世界に則したネットワークは複雑であり、その1つに時刻情報を含むテンポラルネットワークがある[1, 2]. 先行研究[3]によると、ネットワーク上の社会的ダイナミクスはどのペアが先に通信するかによって加速・減速する場合があることが知られている。では集団でグループに分かれて会話を行う場合、その人数によって合意形成の様子は異なるのだろうか。本研究では人間の会話において、会話する順番(リンクオーダー[3])と人数が集団の合意形成に与える影響を検証した。

2 順序依存性

2.1 1対1で会話を行うモデル

まず N 個のノードと M 個のリンクを持つネットワークを考える。各ノードは時間とともに変化する連続状態 $x_i \in \mathbb{R}$ ($0 \leq i \leq N$) を持つ。リンク (i, j) が適用される期間 $0 \leq t \leq \tau$ のダイナミクスは次式で与えられる[3].

$$\frac{dx_i}{dt} = x_j - x_i, \quad \frac{dx_j}{dt} = x_i - x_j \quad (1)$$

リンク (i, j) 適用後の状態 $x_i(\tau), x_j(\tau)$ は、リンク適用前の状態 $x_i(0), x_j(0)$ に対して以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} x_i(\tau) \\ x_j(\tau) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1+e^{-2\tau}}{2} & \frac{1-e^{-2\tau}}{2} \\ \frac{1-e^{-2\tau}}{2} & \frac{1+e^{-2\tau}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i(0) \\ x_j(0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{x}(\tau) = (x_1(\tau) \cdots x_N(\tau))^T$ を用いて書くと、

$$\mathbf{x}(\tau) = \exp(-L^{(ij)}\tau)\mathbf{x}(0) = (I - \varepsilon L^{(ij)})\mathbf{x}(0) \quad (3)$$

ここで、 I は $N \times N$ 単位行列、 $\varepsilon = \frac{1-e^{-2\tau}}{2}$ である。 $L^{(ij)}$ はシングルリンクラプラシアン行列で、 $(L^{(ij)})_{ii} = (L^{(ij)})_{jj} = 1$ と $(L^{(ij)})_{ij} = (L^{(ij)})_{ji} = -1$ で定義される。 $L^{(ij)}$ の他の要素は 0 である。したがって、リンク e_1, \dots, e_M に対してネットワークの最終状態は次式で表せる。

$$\mathbf{x}(M\tau) = T\mathbf{x}(0) \quad (4)$$

ここで、 $T = (I - \varepsilon L^{(e_M)})(I - \varepsilon L^{(e_{M-1})}) \cdots (I - \varepsilon L^{(e_1)})$ である。状態ベクトルは $\mathbf{x}(t) \equiv (x_1(t) \cdots x_N(t))^T$ で表され、行列 T は初期状態ベクトル $\mathbf{x}(0)$ を最終状態ベクトル $\mathbf{x}(M\tau)$ に写像する。

2.2 合意の程度の基準値

次に、時刻 $t = M\tau$ のときの合意形成のレベルを定量化する距離 d を導入する。各ノードの初期状態 $x_i(0)$ ($i \leq i \leq N$) が平均 0 と標準偏差 σ を持つ独立かつ同一の正規分布に従うときの正規化された平均距離を d と定義する[3].

$$d \equiv \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{2}{N(N-1)} [x_i(t) - x_j(t)]^2 \right\} \quad (5)$$

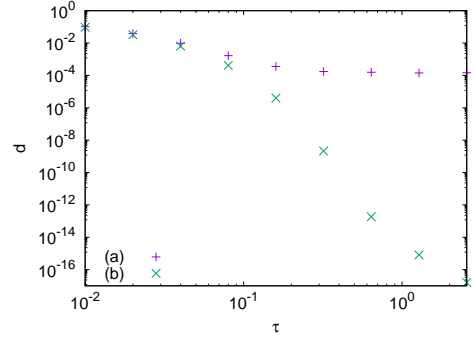


図 1: (a) 実際の時刻順. (b) ランダムリンクオーダー.

2.3 結果と考察

KONECT (<http://konect.uni-koblenz.de>) からダウンロードしたネットワークデータ hypertext について d の計算を行い比較した。このデータは会議における対面コンタクトを記録したものであり、リンクには接触があった時点での時刻情報が記録されている。ノード数 $N = 112$ 、リンク数 $M = 20816$ である。1対1の会話を想定し hypertext について 2 通りの場合で d を計算した結果が図 1 である。その際各ノードの初期状態 $x_i(0)$ に 0 から 1 までの乱数を与え、100 個のサンプルについて計算を行った。図 1 を見ると、(b) ランダムリンクオーダーの方が (a) 実際の時刻順より d が小さく合意が取れている結果となった。この結果からリンクオーダーによって合意形成の速度に差が出ることが確認できた。

3 1度の会話人数による合意度への影響

3.1 3人以上の会話に対応したモデル

N 個のノードと M 個のリンクを持つネットワークについて、相互作用行列の集合 $\mathcal{M} \in \{M^{(0)}, \dots, M^{(r-1)}\}$ を考える。 r は相互作用行列 M の個数を表す。まず長さ τ の会話時間に対し $M^{(0)}$ が作用し、次に別の行列 $M^{(1)}$ が時間 τ の間作用する。 N 次元の状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ は次式により発展する[4].

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = M^{(\lfloor t/\tau \rfloor)}\mathbf{x}(t) \quad (6)$$

ここで、 $t \geq 0$ 、 $\lfloor t/\tau \rfloor$ は時間 t までの時間間隔 τ の数である。また持続時間 $r\tau$ における相互作用の順序は $S = (M^{(0)}, M^{(1)}, \dots, M^{(r-1)})$ によって決まる。式 (6) によるダイナミクスは形式解 $\mathbf{x}(r\tau) = T(S; \tau)\mathbf{x}(0)$ で表される。ここで

$$T(S; \tau) = \exp(\tau M^{(r-1)}) \exp(\tau M^{(r-2)}) \cdots \exp(\tau M^{(0)}) \quad (7)$$

である。初期状態を $\mathbf{x}(0)$ として、相互作用の順序をランダムに並び替えたときの時刻 τ における期待値は次式で与えられる。

$$\langle \mathbf{x}(\tau) \rangle = \hat{T}\mathbf{x}(0) \quad (8)$$

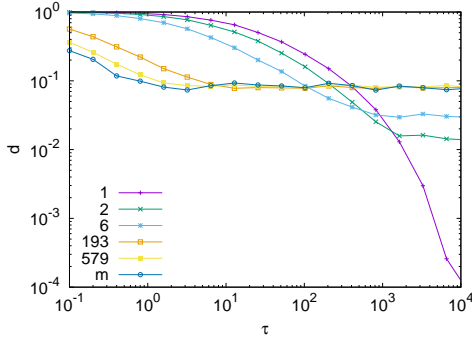


図 2: 会話人数による d 値の比較. 凡例は分割数.

ここで時間発展演算子は全ての相互作用にわたって平均されたものである.

$$\hat{T}(\tau) = |\mathcal{M}|^{-1} \sum_{M \in \mathcal{M}} \exp(\tau M) \quad (9)$$

しかし本研究では, 式 (9) の代わりに集合行列

$$M^* \equiv |\mathcal{M}|^{-1} \sum_{M \in \mathcal{M}} M \quad (10)$$

による時間発展演算子

$$T^* = \exp(\tau M^*) \quad (11)$$

を用いる. 各状態ベクトルに式 (11) をかけることにより, 各状態ベクトルが会話後の状態に更新される. 式 (11) は分割数 1, つまり分割しない場合に使用する. 分割する場合は,

$$T_r^* = \exp(\tau M^{(r-1)*}) \exp(\tau M^{(r-2)*}) \dots \exp(\tau M^{(0)*}) \quad (12)$$

を使用する. ここで, r は分割数, $M^{(i)*}$ は全リンク数を r 分割したうちの i 番目のまとまりの集合行列である. これを状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ にかけることで時間発展させていく.

3.2 結果と考察

SocioPatterns (<http://sociopatterns.org>) からダウンロードしたネットワークデータ workplace[5] について, 式 (5) の d の計算を行い比較した. workplace はあるオフィスビルで測定された個人間コンタクトのデータで, リンクにはその時の時刻情報が記録されている. 使用するノード数は $N=72$, リンク数は $M=1158$ で, 5 つの部署に分かれている. 今回一度に会話する人数は, 時系列順に並べられたリンクをいくつかに等分し設定した. それぞれ d を計算した結果が図 2 である. 図 2 を見ると, 会話時間 τ が小さい時は分割数が大きいほど d 値が小さくなっているが, τ が大きくなるとそれが逆転している. 一度の会話人数が多いほど合意形成に時間はかかるが, 時間をかけると合意の程度は大きくなるということが読み取れる.

3.3 指数積分分解の式の利用

図 2 では全員で会話をした方が最終的には最も深い合意が得られる結果となったが, 分割しても同様の結果が得られる分割の方法を指数積分分解 [6]

$$e^{A\tau} \simeq e^{\frac{A_1}{2}\tau} e^{\frac{A_2}{2}\tau} \dots e^{A_m\tau} \dots e^{\frac{A_2}{2}\tau} e^{\frac{A_1}{2}\tau} \quad (13)$$

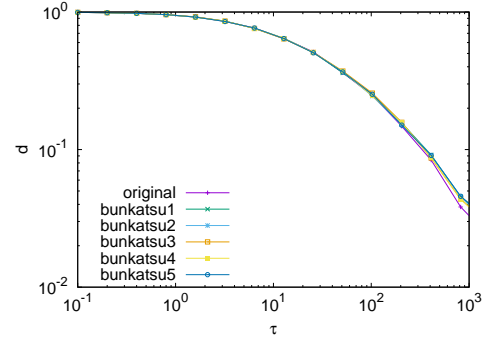


図 3: 指数積分分解を利用した分割の d 値.

を利用して検討する. ここで, 行列 A は $A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_m$ とする.

会社の会議を想定し, ネットワークの分割 (= 会議のグループ分け) を実際の部署を加味した bunkatsu1 ~ bunkatsu5 の 5 つのパターンで行った.

これらの分割を式 (13) の A の分割として考え d を計算し. 分割数 1 (original) の場合と比較したものが図 3 である. 概ね分割した場合も分割しない場合と同じ d が得られることが確認できた.

4 まとめ

本研究では, 会話による合意形成においてリンクオーダーと会話人数が与える影響を数値計算により検証した. まず 1 対 1 の会話でリンクオーダーによって合意の程度が変わってくることを確認した. そして集団をグループ分けして会話を行う場合, グループ数が少ないほど合意に時間はかかるが合意の程度は大きくなることがわかった. また指数積分分解を利用して, 全員で会話を行う場合と同様の合意度が得られる方法を検討した. 会議にかかる時間・回数は大きくなるものの全員で集まらなくても同様の合意形成ができることを確認できた.

参考文献

- [1] 増田直紀, “テンポラルネットワーク — Temporal Networks: A Short Introductory Survey”, 人工知能学会誌, **27** (4), 432–436 (2012).
- [2] 増田直紀, 今野紀雄「複雑ネットワーク 基礎から応用まで」近代科学社 (2010).
- [3] Naoki Masuda, “Accelerating coordination in temporal networks by engineering the link order”, Scientific Reports **6**, 22105 (2016).
- [4] Naoki Masuda, Konstantin Klemm, and Victor M. Eguiluz, “Temporal Networks: Slowing Down Diffusion by LongLasting Interactions”, Phys. Rev. Lett., **111**, 188701 (2013).
- [5] Mathieu Génois et al., “Data on face-to-face contacts in an office building suggest a low-cost vaccination strategy based on community linkers”, Network Science **3**, 326 (2015).
- [6] 鈴木増雄「フラクタル経路積分法とその応用」数理科学, **328**, 24–29 (1990).