

社会的ネットワーク上の情報伝播を考慮した 動的交通量配分問題

高安 杏奈¹・原 祐輔²・桑原 雅夫³・井料 隆雅⁴

¹非会員 東北大学大学院情報科学研究科 博士課程前期 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)

E-mail: takayasu@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東京大学大学院助教 工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 1 号館 324 号室)

E-mail: hara@bin.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東北大学大学院教授 情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09)

E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

⁴正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

本研究は、社会的ネットワーク (SN) 上における個人発情報の伝播が交通状態に与える影響を分析するために、個人の持つ道路リンクの主観的旅行時間情報の伝播モデルを提案したものである。モデル化においては、道路リンクの観測・未観測による情報量の伝播の違いを表現する既往研究を基に、主観的旅行時間の伝播モデルを考案し、それを確率的に拡張することで主観的旅行時間分布の更新を考える必要性について議論した。

Key Words : *information transmission, social network, subjective travel time*

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレットの普及により、ニュースのようなオーソライズされた情報が誰でも簡単に迅速に入手できるようになった。交通に関しても、通常時は、それらのオーソライズされた情報を基に経験的に知っている主観的な交通状態を補完し、経路選択を行うことが考えられる。しかし、災害時のように道路状況が通常と異なりオーソライズされた情報が入手が困難な場合は、SNS 上や知り合いから直接メールなどで届く個人発の情報から主観的な交通状態を補完することが考えられる。

このように個人発情報によって、マスメディアの掴んでいない交通状態情報を拡散することが可能である。一方、ニュースとは違い、情報を発信した個人と何らかのつながりを持つ人のみがその情報を得て行動することによる混乱や混雑が発生してしまう可能性も考えられる。

そこで、我々は主観的な交通状態として各個人ごとに各道路リンクに対して持つ主観的旅行時間情報の伝播が道路ネットワーク (RN; Road Network) 上の交通状態に与える影響を明らかにし、それらに基づいた動的交通量配分を行うことを目的とする。そのためのアプローチとして大きく次の4つが挙げられる: i) 各個人の体験やマスメディア、知人からの情報取得のモデル化、ii) 情報の伝播と、その情報を受け取った各個人の自分

の持っていた情報に対する更新のモデル化、iii) 更新された情報を基にした各個人の行動の意思決定方法のモデル化、iv) 意思決定された行動に従って個人が RN 上を移動した際の交通状況の表現と動的交通量配分のモデル化。

本研究ではこのアプローチのうち ii) の個人発情報の伝播について扱う。この際、各個人間の知り合い関係は社会学やネットワーク科学などで用いられる社会的ネットワーク (SN; Social Network) の形状によって表現することができる。よって、本研究における目的は、SN 形状の違いが主観的旅行時間情報伝播に与える影響を解析的・数値実験的に明らかにすることとする。RN 上の道路リンクの観測・未観測による情報量の SN 上の伝播の違いを表現する既往モデルを、主観的旅行時間の伝播モデルへと応用し、更に確率的に拡張することによって、未観測道路リンクに対する主観的旅行時間の不確かさ、他者から受け取った情報に対する不確かさを表現するモデルを提案する。更にそのモデルを用いて、SN 形状の違いが主観的旅行時間の伝播に与える影響を考察する。

2. 既往研究

個人発の情報に限らず、情報伝播モデルは制御工学や物理など様々な分野で発展しており、数多くのモデルや解析結果を残している。今回は災害時の個人間の

情報伝播モデルとして二つの既往研究を説明する。

まず、古田ら¹⁾は、安全・危険という状態に対する主観的な確率情報をランダムに選んだ住民に流す SIR 型モデルを提案した。このモデルは地域レベルの安全情報を地域内の住人全てを対象に流すことを考えたモデルであり、人間関係を表わす SN 形状については考慮していない。

一方、高安ら²⁾による提案モデルは、Olfati-Saber and Murray³⁾の提案した合意形成モデルを拡張したものである。合意形成モデルとは、ネットワーク上の反応拡散方程式に基づいて SN 上の情報伝播による各個人の情報量の変化を表わしたモデルである。この拡張によって、道路リンクの観測・未観測によって情報の更新の仕方を分けて考えることが可能になった。また、高安らの研究では、Spielman⁴⁾、Horn and Johnson⁵⁾、Fiedler⁶⁾⁷⁾によって紹介されているラプラシアンや代数的連結度を指標とする SN 形状と全員が道路リンク情報を完全に得る際の更新ステップ数を指標とする情報伝播速度の相関関係を解析的に求めたのち、数値実験によりその関係が成り立つことを確かめている。

本研究における目的は、伝播された道路リンクの主観的旅行時間情報をもとに各個人が最短経路を選びながら行動していくことを踏まえ、SN 形状の違いが情報伝播挙動や速度に与える影響を解析的・数値実験的に議論することである。そこで、本研究では、高安らの研究を拡張し、未観測道路リンクの主観的旅行時間情報に対する不確かさを主観的旅行時間分布で表現し、SN で接続する他者からの旅行時間情報を受け取った際の各個人の主観的旅行時間分布の更新を表現できるモデルを提案する。

ネットワーク上の確率分布の伝播の解法の既往研究としては、Winkler⁸⁾や Olfati-Saber et. al.⁹⁾が挙げられる。

Winkler⁸⁾は、専門家の意見を聞いて、それらの意見を確率分布として合意形成を行うことで自分の行動を決定する際の考え方を、加重平均を用いたモデルとベイズ更新を用いたモデルの二通りで考え、それらを比較し、最終的な結果の分布形の違いについて議論している。加重平均を用いたモデルは Olfati-Saber and Murray の合意形成モデルと同様の式で表現しているが、確率分布を離散化して考え、シミュレーションによって数値実験的に求めている。また、ベイズ更新を用いたモデルではベルヌーイ過程に従った確率分布のみ取り扱っており、旅行時間のように連続した値については議論されていない。さらに、これらのモデルは情報送信者と情報受信者が完全に分かれている場合を想定しており、本研究で求めたい全員が他者の意見をフィードバックを踏まえた意見更新による合意形成についてはモデルが提案されていない。

Olfati-Saber et. al.⁹⁾は、センサネットワークにおける multi-target tracking の枠組みにおいて、Olfati-Saber and Murray³⁾の提案した合意形成モデルをベイズ更新を用いて確率的に拡張した Belief Consensus Model を提案した。

よって、本研究では、高安らの研究の基本モデルである合意形成モデルの確率的拡張である Belief Consensus Model を参考にし、観測・未観測道路リンクに対する主観的旅行時間分布の更新モデルを提案する。また、そのモデルを用いて SN 形状と主観的旅行時間分布の伝播速度についての関係を解析的に明らかにする。

3. 本研究で使う主な表記

表-1 に本研究で扱う変数やパラメータの表記を示す。

4. 既往の道路の観測・未観測による情報量更新モデル

本章では、高安ら²⁾のモデルを説明する。高安らのモデルでは各個人が自分の持っている交通状態情報を社会的ネットワーク (SN; Social Network) で繋がっている他者と交換し合うことで道路ネットワーク (RN; Road Network) 全体の情報を更新し、真値を得ることを考えている。以下では具体的な問題設定や更新モデルについて説明する。

(1) SN と RN の設定

この研究では図-1 のような SN と RN という二つのネットワークを考える。

SN は各ノード $i \in \mathbf{N}$ が各個人、各リンクが個人間の知人関係を表わす。本研究で対象とする SN は無向連結

表-1 本研究で扱う変数やパラメータ

記号	定義
i, j	SN 上の各個人. $i, j \in \mathbf{N}$
\mathbf{N}_i	SN 上で個人 i と接続する他者の集合ベクトル
l	RN 上の各道路リンク. $l \in \mathbf{E}$
k	更新ステップ数
θ	他者の情報採用度パラメータ. $\theta \in (0, 1/ \mathbf{N}_i)$
a_{ij}	各個人 i と j の隣接関係を表わす隣接行列の要素
x_i^l	個人 i の道路リンク l に対する情報量
t_i^l	個人 i の道路リンク l に対する主観的旅行時間
t_*^l	道路リンク l の真の旅行時間

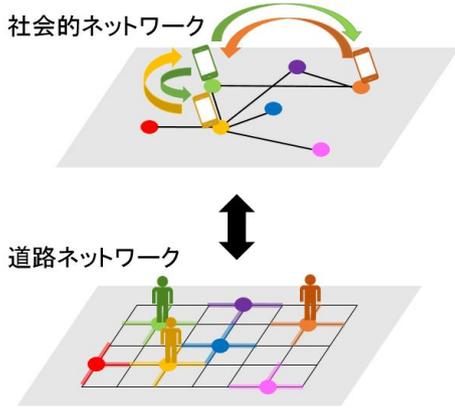


図-1 本研究における SN と RN の関係

グラフとし、人間関係の変化に伴う SN 形状の変化は考慮しないものとする。

RN は各リンク $l \in E$ が道路リンクを表わす。

SN 上の各個人 i は RN 上の全てのリンクに対して情報量 $x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^l) \in [0, 1]$ を持ち、SN で接続した他者から得た情報から、この情報量を更新する。

(2) 情報量の初期値

情報量の初期値は、交通状態を観測した道路リンクに関しては真値を知っているものとし、未観測道路リンクに関しては、全く正しい情報を持っていないものとする。このとき、観測・未観測道路リンクに対する情報量初期値 $x_i^l(0)$ は (1) 式のように表わせる。

$$x_i^l(0) = \begin{cases} 1 & \text{if } l \text{ is observed} \\ 0 & \text{if } l \text{ is unobserved} \end{cases} \quad (1)$$

(3) 情報伝播の仮定

この研究では情報量を以下の三つの仮定に基づいて伝播させていく。

- 各個人は SN で接続している人とのみ情報交換を行う。
- 情報交換の量は二人の個人間の情報量の差に比例する。
- 観測道路リンクに対しては、情報更新を行わない。

(4) 情報量更新モデル

前節の仮定を踏まえて、観測道路リンクに対しては図-2(a)のように情報量が常に 1 であるとする。一方未観測リンクに対しては図-2(b)のように自分の持っている情報量と SN で接続した他者の持っている情報量を $(1 - |N_i|\theta) : \theta$ の割合で受け取るとし、それらの線形結合したものを新しい情報量として更新すると仮定する。このとき、 $N_i \in N$ は個人 i と SN 上で接続する他者の

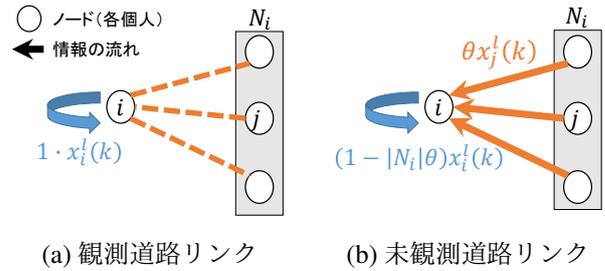


図-2 既往研究による情報量更新方法

集合を表わし、 $\theta \in (0, 1/|N_i|)$ は大きいほど他者の持つ情報をより取り込み、小さいほど自分の持つ情報に固執することを表わす情報採用度パラメータである。

また、更新ステップ数を k とおき、 a_{ji} を各個人 i と j が接続しているときは 1、接続していないときは 0 とする SN の隣接関係を表わす要素であるとする、情報量更新モデルは (2) 式のように書ける。

$$x_i^l(k+1) = \begin{cases} x_i^l(k) = 1 & \text{if } l \text{ is observed} \\ (1 - |N_i|\theta) \cdot x_i^l(k) + \theta \cdot \sum_{j \in N} a_{ji} \cdot x_j^l(k) & \text{if } l \text{ is unobserved} \end{cases} \quad (2)$$

5. 本研究における主観的旅行時間分布更新モデル

本研究における最終的な目的は、SN 上の情報伝播を基に各個人が経路選択をしていくことによる交通状態の変化を議論することである。よって、情報量 x_i^l の更新ではなく、各個人の各道路リンクに対する主観的旅行時間 t_i^l を更新することを考える。さらに、同時に主観的旅行時間の情報量を考慮するためには、主観的旅行時間の確率分布の更新を考える必要がある。

よって、本章では、まず本研究における問題設定とモデルの仮定について説明し、確定的な主観的旅行時間更新モデルを考えた上で、それを確率的に拡張する。

(1) SN と RN の設定

本研究における、SN と RN の設定は前章で説明した高安らのモデルと同じである。ただし、今回は RN の各リンク l はそれぞれ、真の旅行時間 t_l^* をもつ。それに対して、SN 上の各個人 i は RN 上の全てのリンクに対して主観的旅行時間 $\mathbf{t}_i = (t_i^1, t_i^2, \dots, t_i^l)$ を持ち、SN で接続した他者から得た情報から、この主観的旅行時間を更新する。

この際、主観的旅行時間と前章における情報量の関係は、真の旅行時間と主観的旅行時間のずれの少な

を情報量だとし, (3) 式で表わされる通りである.

$$x_i^l(k) = \exp(-|t_i^l - t_i^l(k)|) \quad (3)$$

(2) 主観的旅行時間の初期値

主観的旅行時間の初期値は, 観測道路リンクに関しては, その道路リンクの真の旅行時間を知っているものとし, 未観測道路リンクに関しては, 経験に基づいた任意の主観的な旅行時間をもつとする. このとき, 観測・未観測道路リンクに対する情報量初期値は (4) 式のように表わせる.

$$t_i^l(0) = \begin{cases} t_i^l & \text{if } l \text{ is observed} \\ t_i^l(0) & \text{if } l \text{ is unobserved} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 情報伝播の仮定

本研究で考える他者に伝播させる情報は自分の主観的旅行時間である.

情報伝播における仮定は高安らのモデルと同様である.

(4) 主観的旅行時間更新モデル

本研究の主観的旅行時間更新モデルは, 情報伝播の仮定を踏まえて, 高安らのモデルにおける情報量 x_i^l を主観的旅行時間 t_i^l に置き換えることで (5) 式のように表わすことができる.

$$t_i^l(k+1) = \begin{cases} t_i^l(k) = t_i^l & \text{if } l \text{ is observed} \\ (1 - |N_i| \theta) \cdot t_i^l(k) + \theta \cdot \sum_{j \in N} a_{ji} \cdot t_j^l(k) & \text{if } l \text{ is unobserved} \end{cases} \quad (5)$$

(5) 主観的旅行時間分布への確率的拡張

前節までのモデルでは, 未観測道路リンクに対する主観的旅行時間を確定値として扱ってきたが, 実際は経験値に基づく主観的旅行時間に対して不確かさがあり, 主観的旅行時間分布として持っているはずである.

また, 本研究の大枠である個人発の情報伝播による交通状態推定や動的交通量配分にあたって, 主観的旅行時間分布の伝播が RN の混雑に与える影響を解析するモデルは井料ら¹⁰⁾によって提案されている.

そこで, 前節における確定的な主観的旅行時間更新モデルを確率的に拡張し, 各個人のもつ未観測道路リンクの主観的旅行時間への不確かさを表現できるモデルを構築する.

モデルの設定や定式化などの詳細については口頭発表にて行う.

6. おわりに

本研究では, 個人発情報の伝播による交通状態推定や動的交通量配分といった枠組みの中で, SN 形状の違いが個人発情報の伝播に与える影響について, まず道路リンクの未観測・観測を分けた情報量更新方法を示す高安らのモデルの紹介をし, それを主観的旅行時間の更新モデルへと拡張した. また, 主観的旅行時間を確率分布として考える必要性を議論した. 主観的旅行時間分布の更新については口頭発表で行う.

本研究の展望としては, 本研究のモデルによる情報伝播に基づいた交通状態推定や動的交通量配分が挙げられる. また, ページランク¹¹⁾のようなランク手法に基づいた他者の情報に対する重みづけも考えられる.

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 JP26220906 の助成を受けたものである

参考文献

- 1) 古田昌弥, 井料隆雅, 原祐輔, 桑原雅夫: 個々人の情報伝達行動を考慮した避難タイミング決定動学モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, CD-ROM, 2015.
- 2) 高安杏奈, 原祐輔, 桑原雅夫: 社会的ネットワークの形状が情報伝播速度に与える影響に関する研究 (投稿中)
- 3) Olfati-Saber, R. and Murray, R. M.: Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays, *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, 2004.
- 4) Spielman, D.: Spectral graph theory, Combinatorial Scientific Computing, Chapman and Hall, CRC, CH.18, pp.495-524, 2012.
- 5) Horn, R. A., Johnson, C. A.: Matrix Analysis, *Cambridge University Press*.
- 6) Fiedler, M.: Algebraic connectivity of graphs, *Czechoslovak Mathematical Journal*, vol.23, no.98, pp.298-305, 1973.
- 7) Fiedler, M.: Laplacian of graphs and algebraic connectivity, *Banach Center Publications*, Vol. 25, 1989
- 8) Winkler, R. L.: The consensus of subjective probability distributions, *Management Science*, Vol.15(2), pp.B61-B75, 1968
- 9) Olfati-Saber, R., Franco, E., Frazzoli, E. and Shamma, J. S.: Belief consensus and distributed hypothesis testing in sensor network, *Networked Embedded Sensing and Control*, Vol.331, pp.169-182, 2006
- 10) 井料隆雅, 古田昌弥, 口井雅之, 桑原雅夫: 情報伝播の遅延が交通混雑に与える影響 (投稿中)
- 11) Brin, S. and Page, L.: The anatomy of a large-scale hyper-textual Web search engine, *Proc. of 7th International World Wide Web Conference*

(2017.??)

DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT CONSIDERING INFORMATION PROPAGATION ON SOCIAL NETWORK

Anna TAKAYASU, Yusuke HARA, Masao KUWAHARA, Takamasa IRYO