

道路ネットワーク構造とナビゲーションシステムの有効性の関係について

和泉 潔, 山下 倫央, 車谷 浩一

本稿では, そのようなナビゲーションアルゴリズムの有効性の違いをもたらしたネットワーク構造の違いを, うまく表すことのできる指標を探るためにさまざまな試論を示していく. まだアイデア段階ではあるが, リンク数分布とは異なった観点からの特徴を表せるような指標を求めていきたいと考えている.

Essays on Relation between Network Structure and Navigation Systems

Kiyoshi IZUMI, Tomohisa YAMASHITA, and Koichi KURUMATANI

In this paper, we propose a new index of network structure relating to effectiveness of navigation algorithms and discuss directions for use and development of the index. Although the test and improvement of the index has still been going on, we would like to seek an index that presents network characteristics from a viewpoint that are different from the distribution of link numbers.

1 はじめに

今流行りのスケールフリーネットワークの話では, 道路ネットワークと航空路ネットワークは全く対照的なネットワーク構造を持つとされている [1].

「ランダム・ネットワークの度数分布は釣り鐘型になるので, 大半のノードはほぼ同数のリンクをもち, 非常に多くのリンクをもつノードは存在しないことがわかる. ランダム・ネットワークは, 都市をノード, 主要な高速道路をリンクとみたときの高速道路網に似ている. 実際, 大半の都市はほぼ同数の高速道路につながっている. これに対して, ベキ法則に従うスケールフリー・ネットワークの度数分布からは, 大半のノードはごく少数のリンクしかもたず, ごく少数のハブが莫大なリンクをもつことがわかる. このようなネットワークがひとつにまとまっているのは, ハブのおかげである. この状況は, 多数の小さな空港が少数のハブ空港によってつながれている航空便のルート

マップに似ている。」(訳書 [1] p.103)

それで, スケールフリーネットワークである航空路の構造的安定性や, ダイナミックな振るまい, 頑健性, 故障や攻撃に対する耐性についての話が多い.

それでは, ランダムネットワークに近いとされた道路ネットワークの中にも差はないのだろうか. 先行研究 [8,9] ではいくつかのナビゲーションアルゴリズムを提唱し, 2種類の道路ネットワーク構造でシミュレーションを行い, 各アルゴリズムの有効性をテストした. その結果, たとえリンク数の分布だとほぼ同じ形状の道路ネットワークでも, 構造の違いにより有効性の差が現れたのである.

本稿では, そのようなナビゲーションアルゴリズムの有効性の違いをもたらしたネットワーク構造の違いを, うまく表すことのできる指標を探るためにさまざまな試論を示していく. まだアイデア段階ではあるが, リンク数分布とは異なった観点からの特徴を表せるような指標を求めていきたいと考えている.

2 ナビゲーションによる混雑緩和

それでは最初に、今回の研究をはじめのきっかけとなった、ナビゲーションによる混雑緩和の研究の内容を紹介しよう [8, 9].

2.1 道路網

まずナビゲーションの検証を行った道路網として、図 1a の格子状と図 1b の放射環状の 2 種類の形状を用意した。この 2 つのネットワークは、ほぼ同じノ

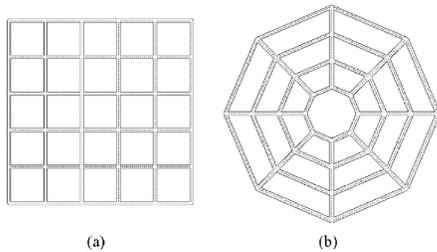


図 1: 道路網

ド数とリンク数を持ち、リンク数の分布に関しても両方とも 3 から 4 に集中した分布である。

2.2 ナビゲーションアルゴリズム

次に、各車両に対する出発地点から目的地までの経路選択のナビゲーションアルゴリズムとして、次の 3 種類の経路選択戦略を用意する。

最短距離経路戦略 (SD) 最短距離経路戦略 SD(shortest distance route) を用いるドライバーは目的地から出発地点までの経路長を最短にする経路を選択する。この戦略を用いるドライバーは現在の混雑情報を使用していないので、地図しか持っていないドライバーに相当する。

最短時間経路戦略 (ST) 最短時間経路戦略 ST(shortest time route) を用いるドライバーは現在の混雑状況に基づいて経路を選択する。ST 戦略を用いるドライバーは、地図情報だけでなく車載機を通じて道路交通情報センター (e.g. VICS センター) か

ら受け取った道路網全体の混雑情報に基づいて経路を決定するドライバーに相当する。戦略 ST を用いるドライバーは、道路網の全ブロックの車両密度を車載機を通じて知ることができる。ST 戦略を用いるドライバーは、交差点を通過する度に現在地点から目的地までの期待通過時間を最小化する経路を再探索し、経路を変更する。

経路情報共有戦略 (RIS) 情報共有戦略 RIS (shortest time route with route information sharing) を用いるドライバーは、地図情報と現在の混雑情報に加えて、RIS 戦略を用いる他のドライバーの選択した経路の集積的な情報に基づいて経路を選択する。RIS 戦略を用いるドライバーも ST 戦略を用いるドライバーと同様に、交差点を通過する度に最新の交通情報に基づき経路を探索し、経路を再決定する。ST 戦略と RIS 戦略の違いは、RIS 戦略が経路情報サーバを通じて出発地点から目的地までの経路を共有することである。

RIS 戦略を用いるドライバーは出発地点 (現在地点) から目的地までの最短時間経路を各リンクの期待通過時間に基づいて探索し、その経路を経路情報サーバに通知する。経路情報サーバは RIS 戦略を用いる全てのドライバーから、これから通過する経路を集めて各リンクの通過確信度を算出する。通過確信度はドライバーがこれからその経路を通過する度合いを表しており、高ければ高いほど、その経路を確実に通過することを意味する。通過確信度は現在値に近いほど大きく、遠いほど小さくなる。さらに、各リンクの総通過確信度を、RIS 戦略を用いる全ドライバーのそのリンクの通過確信度の総和として定義する。

経路情報サーバは全リンクの総通過確信度を RIS 戦略を用いるドライバーに配信する。総通過確信度を受け取った RIS 戦略を用いるドライバーは、各リンクの期待混雑度を算出して、現在地点から目的地までの期待混雑度が最小となる経路を探索し、それを選択する。

2.3 道路網とアルゴリズムの有効性

前節の3種類のナビゲーションアルゴリズムを比較評価するために、全車両中の各アルゴリズムを利用する割合を変化させて、シミュレーションを行った [8]. SD を使用するドライバーの割合を 20% に固定し、残りの 80% の車両を、ST と RIS を使用するドライバーの割合を、ST:RIS=80:0 から ST:RIS=0:80 まで 10 ポイントずつ変更して、9 通りの設定を用意した。また、道路網の構造として、格子状および放射環状の2種類の道路網を使用した。ドライバーの出発地および目的地は、道路網上の任意の点から一様な確率でランダムに選ばれた。各アルゴリズムの有効性の指標としては、そのアルゴリズムを用いたドライバーが出発地から目的地までの平均移動時間を、全く混雑がなかった場合の理想的な移動時間で標準化したものを用いた。

シミュレーションの結果、道路網の構造とアルゴリズムの有効性の関係について、次のような結果が得られた。

- 両方の道路網において、RIS の割合が増えるに従って、全てのドライバーの平均移動時間は単調に減少していき、最大約 50% 移動時間が短縮された。
- しかし、各アルゴリズムごとの平均移動時間の差は、道路網の構造に依存していた。格子状では、全てのアルゴリズムで移動時間に大きな差は見られなかったが、放射環状では RIS を用いるドライバーの平均移動時間が最も短かった。

このように、どのようなナビゲーションアルゴリズムが有効であるかは、道路網の構造にかなり依存しているといえるので、リンク数の分布では表しきれない要素を示せるような指標を新たに提案したいというのが、本研究の主旨である。

3 VEBC 指標

上記のような道路網の構造の特徴を捕らえるためには、リンク数の分布ではなく、道路網全体でのボトルネックの様子を表さなければならない。そのヒントとなる概念が、人間同士の社会関係ネットワーク研究で用いられてきた、辺間隔度 (edge-betweenness) である [7]. もともと Freeman が提唱し [2], その後社会ネットワーク分析の分野で用いられてきた [10].

ある辺の間隔度とは、有向グラフ上のある 2 つの頂点の組み合わせにおいて、片方を始点としもう片方を終点とした最短経路でその辺が使われた回数^{*1}である [4, 7]. 辺中心間隔度 (edge-betweenness centrality) とは、ある辺について、さきほどの間隔度を有向グラフ上の全ての 2 つの頂点の組み合わせについて足し合わせたものである。

社会ネットワーク分析の分野では、この指標によってコミュニティ全体で人間同士のつながりをよく媒介しているキーパーソンを探すのに使っている。しかし、ネットワーク上での流れということに着目すれば、辺中心間隔度は一種のボトルネックを表していると言える。そこで、グラフ上の全ての辺について辺中心間隔度を計算して頻度分布を求め、その分布がどのような形状を持っているかによって、そのグラフが潜在的にどれくらいのボトルネックを持っているか表せないだろうか。以上のアイデアより、我々は辺中心間隔度分散 (VEBC, variance of edge-betweenness centrality) 指標というものを考えている。

VEBC 指標の計算の仕方は次の通りである。D = (N; A) を有向グラフとする。ただし、N は頂点集合、A は有向辺の集合である。

1. N から一つの頂点 v_i を選び始点とする。
2. N から一つの頂点 $v_j (\neq v_i)$ を選び終点とする。
3. v_i から v_j までの全ての最短経路を求め、最短経路で使われた辺の回数をカウントする。
4. 1-3 を全ての N の全ての 2 点の組み合わせに関

^{*1} 論文によって使われる割合だったりして微妙に定義が異なっているみたいである。

して行う

5. 最短経路に何回使われた辺が何個あったかの頻度分布を描き、その分布の分散を求める。これが有効グラフ D に関する VEBC 指標である。

例) 3×3 格子状ネットワークの場合 図 2 のような 3×3 格子状ネットワークの VEBC 指標の計算の例を示す。ただし、各辺は両方向とも全て 1 としている。

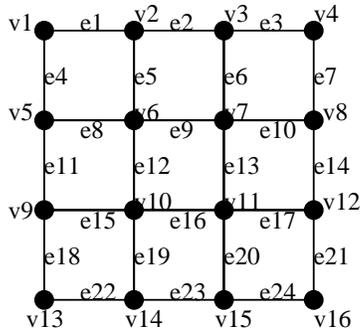


図 2: 3×3 格子状ネットワークの場合

まず、頂点 v_1 から v_2 への最短経路では辺 e_1 を使う経路しかないので、表 1 にあるように、 e_1 のカウントが 1 増える。このようにして全ての頂点の組合わせについてカウントしていき、各辺 e_i に関して使用回数の合計 n_i を求める。

次に、最短経路に使われた数 n の頻度分布を描く。格子状ネットワークの場合は、平均の回数だけ使われ

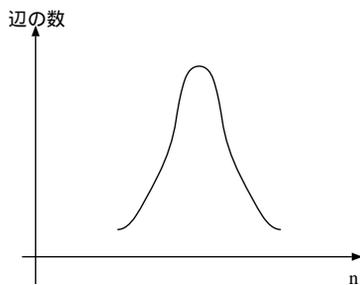


図 3: 使用回数の頻度分布

た辺が多く、図 3 のような釣鐘型のようなになる。この分布の形状が、ネットワークの潜在的なボトルネックに関する特徴を表している。とりあえず、分散を VEBC 指標としてみた。VEBC 指標が大きいほど、道

路の媒介性の偏りが大きいのでボトルネックとなる辺がでやすく、小さいほどでにくいと考えている。

3.1 VEBC 指標の発展

ネットワークが大きくなるにつれて VEBC 指標がどのように変化するのが、図 4 の 3 種類のネットワークについて調べてみた。格子状のネットワークは辺

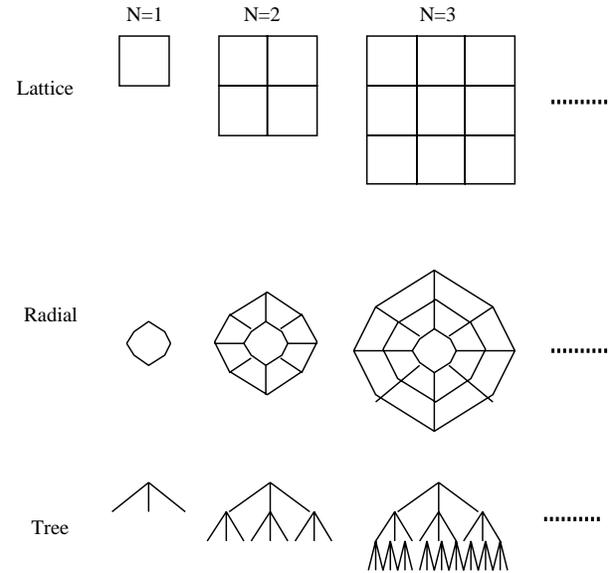


図 4: 3 種類のネットワーク

の長さが全て 1 であり、ネットワークの大きさ N は一辺の格子の数である。放射環状のネットワークは一番内側が一辺の長さが 1 の正八角形であり、そこから放射状に長さ 1 の辺でより大きな正八角形につながっている。ネットワークの大きさ N は八角形が何重になっているかを示す。最後に樹状のネットワークは、分岐数が 3 で辺の長さが 1 である。ネットワークの大きさ N は分岐の深さを示す。

ネットワークの大きさを $N=1-5$ まで変化させたときの、VEBC 指標の変化を図 5 から図 7 に示す。ただし、各頻度分布のグラフの横軸は、平均の使用回数で割って正規化しており、縦軸の頻度は%で表されている。まず、格子状ネットワークの場合(図 5)は、ネットワークが大きくなっても、横軸が平均の 1.0 から近い 0.7 から 1.7 の範囲におさまっていることがわかる。次に放射環状の場合(図 6)は、一番使用回数が

	e_1	e_2	\dots	e_{24}
$v_1 \rightarrow v_2$ への最短経路 No. 1		—	\dots	—
$v_1 \rightarrow v_3$ への最短経路 No. 1			\dots	—
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
$v_i \rightarrow v_j$ への最短経路 No. k	\dots	\dots	\dots	\dots
合計	n_1 回	n_2 回	\dots	n_{24} 回

表 1: 最短経路の使用回数のカウント

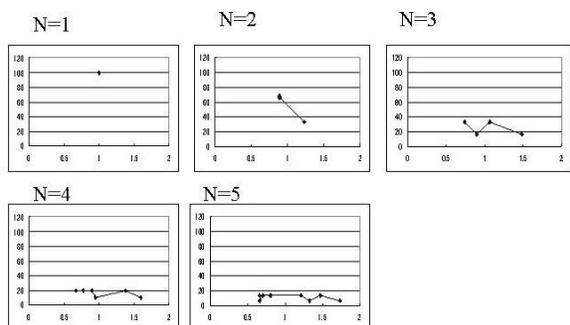


図 5: 格子状の場合

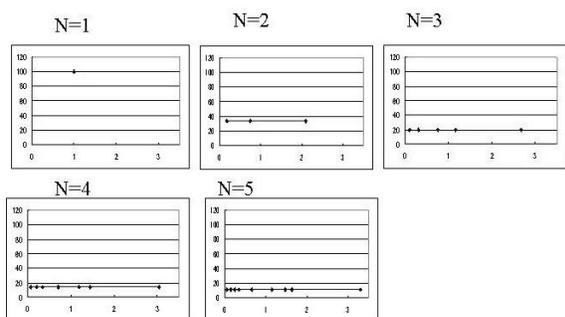


図 6: 放射環状の場合

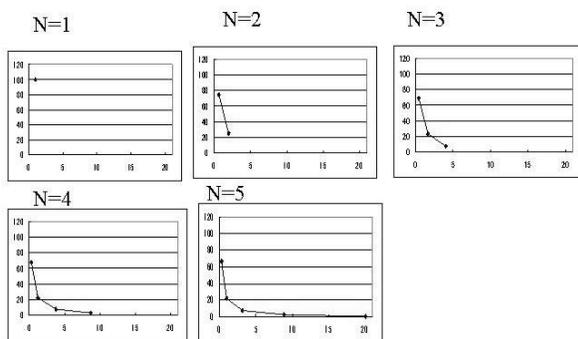


図 7: 樹状の場合

多い辺は、平均の 3 倍以上になり、しかもネットワークが大きくなるにつれて、分布の範囲が広がり、使用回数が多いものと少ないものの差が広がっていった。最後に、樹状の場合 (図 7) は指数分布のような形になっており、使用回数の偏りが非常に大きいことがわかる。ネットワークが大きくなるにつれて、分布の範囲も広がっていった。

以上の結果は、先ほどの分布の分散 (VEBC 指標) の変化を示したグラフ (図 8) にも良くあらわれている。特に格子状と放射環状の違いに着目すれば、前節

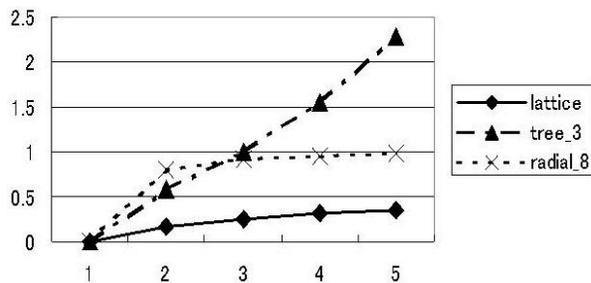


図 8: VEBC 指標の発展

でのナビゲーションアルゴリズムの有効性の違いも、VEBC 指標の差に現れているのではないだろうか。

4 次の一步

まだまだ本研究の内容はアイデア段階のものである。これからまず一番にやるべきことは、VEBC 指標で本当にナビゲーションアルゴリズムの有効性と関連するネットワーク構造の特徴を表していけるのか、いろいろ検証することである。もしダメだったら改良した他の指標を提案していきたい。

そういった指標の改良の他に、研究の発展のアイデ

アを書き出してみたい。

- ナビゲーションアルゴリズム間の比較
- デマンドバス
- スタートとゴールの分布
- 実データ
- スケールフリーネット、スモールワールドとの関係
- 2nd best, 3rd best の経路

4.1 ナビゲーションアルゴリズム間の比較

VEBC 指標では最短経路のみを計算にいった。つまり、さきほどの車両のナビゲーションの話で言えば、全てのドライバーが最短距離経路戦略 (SD) で経路を選んだ場合の混雑状況といっても良いだろう。そういった潜在的な混雑状況がナビゲーションアルゴリズムによって、どのように各辺の利用状況が変わるのかを同様に指標化できれば、ナビゲーションアルゴリズム間の比較ができるのではないだろうか。先行研究ではシミュレーションにより稠密な道路網での車両通過密度を計算している [3, 6]。

4.2 デマンドバス

野田らの研究では、シミュレーションによりデマンドバスと従来の固定路線バスの利便性と採算性の関係を解析した [5]。その結果、次のようなことが示された。(1) デマンドバスはデマンドの増加に従い急速に利便性が悪化する。(2) デマンド数とバスの運用台数を一定に比率に保つ場合、規模の拡大に従いデマンドバスの利便性は固定路線バスより早く改善する。(3) 十分な利用者がいる場合、同じ採算性でも固定路線バスよりデマンドバスの利便性をよくすることができる。これらの結果は、格子状の道路網でのシミュレーションより得られた。VEBC 指標で表されるような道路網の構造に結果がどれほど依存しているのか調べてみたい。

4.3 スタートとゴールの分布

VEBC 指標を求める手順で経路の開始点と終点は全ての 2 点の組合わせとした。しかし、実際の道路網の問題で考えると、開始点や終点となるのは駅や住宅地などある特定の地点が選択されることが多い。開始点や終点に選ばれる確率がグラフ上で一様ではなく、場所によって選択される確率が異なるような分布を持つ場合には、VEBC 指標の値も変わってくるだろう。開始点や終点の選択に関する確率分布が与えられたときに、モンテカルロシミュレーションによりインデックス計算をするようなことも考えてみたい。そして、確率分布と有効なナビゲーションシステムの関係も調べてみたい。

4.4 実データ

それと、当然やってみたいのは、実際の道路地図でインデックスを計算することである。実際の場所から、ここではこのタイプの混雑緩和のためのナビゲーションアルゴリズムが有効性であるとか、デマンドバスを導入すると効率性がどう変化するのかを調べてみることに興味がある。

4.5 スケールフリーネット、スモールワールドとの関係

より理論的な興味としては、リンク数分布と VEBC 指標の関係はどうなっているのか調べてみたい。例えば、スケールフリー、スモールワールドネットワークの指標はどうなっているのだろうか。予想としては、両グラフでは指標が大きくなるのではないだろうか。なぜなら、スケールフリーネットワークでは、リンクの多いノードが最短経路に使われやすく、スモールワールドネットワークでは、クリーク間のエッジが最短経路に使われやすいので、最短経路に使われる回数の分布に偏りが大きそうである。

4.6 2nd best, 3rd best の経路

最短距離経路戦略 (SD) 以外のナビゲーションは最短経路からもう少し遠回りになる経路をユーザに推奨することになる。従って、実は最短経路での使用頻度だけでなく、2nd best, 3rd best の経路の使用頻度もカウントしたような指標の方が、ナビゲーションの有効性との関連という意味では、ふさわしいのかもしれない。

例えば、最短経路から何%距離が長くなる経路も含めて使用頻度をカウントするのか、というのを示す数字を、許容率 δ としてみよう。この δ が大きくなる時に、VEBC 指標が変化する様子の方が、あるナビゲーションアルゴリズムがこのネットワークで有効になりそうかどうかを表す指標になるかもしれない。

5 おわりに

今まで、いろいろアイデア段階のことを書いてきたが、たくさん試しながら指標の改良や、指標が表すネットワーク構造についてさらに調べていきたいと思っている。まともな論文レベルの研究になるかどうかは、まだ未知数ですが...

謝辞

産業技術総合研究所の野田五木樹氏には、本研究の内容についてさまざまな議論をしてもらった。感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。研究がさらに進んで、まともな論文になるとときにはぜひ共著になっていただきたいと思っています。

参考文献

- [1] A. Barabasi. *LINKED: The New Science of Networks*. Perseus Books Group, 2002. (青木 薫訳, 「新ネットワーク思考—世界の仕組みを読み解く」, NHK 出版, 2002).
- [2] L. C. Freeman. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, Vol. 40, No. 1, pp. 35–41, 1977.
- [3] 三浦英俊. 経路選択を考慮した放射環状道路網モデル. 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, pp. 110–111, 2002.

- [4] M. Newman. Scientific collaboration networks: Ii. shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical Review E*, Vol. 64, pp. 016132–1–016132–7, 2001.
- [5] 野田五十樹, 太田正幸, 篠田孝祐, 熊田陽一郎, 中島秀之. デマンドバスはベイするか? 情報処理学会研究報告 2003-ICS-131, pp. 31–36, 2003.
- [6] 田中健一, 栗田治. Recti-linear 移動経路に基づく交通量の時空間的分布. 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, pp. 112–113, 2002.
- [7] 堤秀忠, 正代隆義. 密な部分グラフ構造を発見するための指標とそれを計算する効率の良い並列アルゴリズム. 情報処理学会九州支部 火の国情報シンポジウム 2004, 2004.
- [8] T. Yamashita, K. Izumi, and K. Kurumatani. Effective information sharing based on mass user support for reduction of traffic congestion. In *Proceedings of International Conference on Complex Systems (ICCS2004)*, 2004.
- [9] 山下倫央, 和泉潔, 車谷浩一. 交通流における経路情報の共有に基づいた経路選択の効果の検証. 情報処理学会研究報告 2004-ICS-135, pp. 71–76, 2004.
- [10] 安田雪. 実践ネットワーク分析. 新曜社, 2001.