

論文内容要旨 (和文)

平成21年度後期入学 博士後期課程

専攻名 システム情報工学

氏名 今井 哲郎



論文題目

Game Theory Based Modeling of the Complex Network Formation and Analysis of the Solution Space

(ゲーム理論を用いた複雑ネットワーク形成のモデリングとその解空間の解析に関する研究)

複雑ネットワーク(以下、複雑NW)研究は、1998年のWattsらのスモールワールドNWの提案と、1999年のバラバシらによるスケールフリーNWの提案を皮切りに、広範囲の学術分野において学際的な広がりを見せている。複雑NWは、ノード規模に対して短い平均ノード間距離を持つスモールワールド性や、次数分布がべき則に従うスケールフリー性など、ランダムグラフや規則格子などの「古典的な」NWモデルには見いだされない様々な性質を持つ。近年、インターネットのトポロジやWWWサイト間のつながり、SNSなどで観測される人間関係のネットワーク、役者間の映画共演ネットワーク、細胞内の代謝反応系や食物連鎖ネットワークなど、実世界の幅広い分野におけるNWが複雑NWの性質を持つことが観測されてきている。またこれまでに、複雑NWを生成する数理モデルが多数提案されている。

しかし、既存のNW生成モデルは、「どのように」そのようなトポロジを形成されるかを説明はできるが、多主体の設計者が「なぜ」そのようなトポロジを形成するかについては、考慮されていないものが多い。この問題に対するアプローチとして、ゲーム理論およびその一分野であるNW形成ゲームが有力である。ゲーム理論とは、複数の意思決定をする主体が、その意思決定に関して相互作用する状況を研究する理論である。ゲーム理論はvon NeumannとMorgens ternの研究を出発点とし、1990年代には経済学の中心的分析手法として盛んに用いられるようになった。現在では経済学以外にも応用範囲を広げ、経営学、社会学、政治学、法学、生物学、情報科学など、文系理系にかかわらずあらゆる分野に利用されるようになってきた。

NW形成ゲームは、JacksonとWolinskyにより提案されたもので、NWの形成を以下のように非協力ゲームの枠組みでモデル化したものである。

- ・有限の数のノードが、それぞれのノードペア間でリンクを張ることができる。
- ・各ノードは、他の全てのノードに対して、リンクを形成する意思があるかを示す。帰結として与えられるNWにおけるリンクは、リンクの両端のノードが互いにリンクを形成する意思を示したときのみ形成される。
- ・各ノードは、与えられた利得関数の下で、自身の利得を最大化するように、自身の戦略を決定する。

また彼らは、Nash均衡に代わってペアワイズ安定という安定性の概念を導入している。しかし既存のNW形成ゲームの研究は、ノード数が小規模なものか、リンクコストが均一な極めて単純な環境下におけるものにとどまっており、複雑NWの形成の説明モデルとして不十分である。NW形成ゲームの枠組みで複雑NWをモデル化するには、大規模で多様な環境下でどのようなトポロジが得られるかを知ることが必要であるが、以下の3つの問題がある。

1. ペアワイズ安定解の探索が困難である。
2. プレイヤーに完全合理性を仮定しており、大規模環境下ではこの仮定を満たすためにプレイヤーに求められる能力が極めて過大で、不自然である。
3. 解は一般には多数存在するが、それらの解の重要性を比較できない。

本論文では新たな複雑NW形成モデルとして、動学的NW形成ゲームモデルを提案する。これはNW形成ゲームをベースに、各時刻でたかだか1本のリンクが決定論的に変動するという状態遷移ルールを導入することで動学化したモデルである。本モデルでは、各時刻に変動するリンクは、両端のノードにとって受け入れ可能なリンクのうち、改善される利得の量が最大のもが選択される。このプロセスはある初期状態から開始され、ペアワイズ安定解あるいは周期解に収束するまで続けられる。ある解に引き込まれる状態の集合をベイスンと呼び、その状態の数をベイスンサイズと呼ぶ。本モデルは決定論的な状態遷移モデルであるため、状態空間全体が、各ペアワイズ安定解と周期解に対応するベイスン(引き込み範囲)に厳密に分割される。ベイスンサイズは、初期状態として全ての状態が等しい確率で起きるときに、定常状態での存在確率に比例する。

本モデルは、NW形成ゲームの枠組みで複雑NWの生成を表現する際の3つの問題に対して、以下の意味で有効である。まず1つ目の問題に対して、本モデルはある初期状態に対応する1つのペアワイズ安定解を比較的容易に求めることができる。2つ目の問題に対しては、各プレイヤーが合理的に戦略を決定するために必要な観測能力・最適化能力を大幅に縮小されるため、より自然である。また3つ目の問題に対しては、解の重要性をその解に対応するベイスンサイズで評価することができるという特長を持つ。

本論文ではまず、本モデルを利用して、インターネットにおけるAS間トポロジのモデリングを行った。その際には、AS間トポロジの形成に見られる、リンクの形成に関した財の授受(トランスファー)を許容するモデルを導入した。計算機シミュレーションの結果、トランスファーを許容する場合、次数分布がべき則に従うトポロジを生成することがあること、また特に、距離による減衰を表すパラメータ δ が大きく、リンクコストをあらわすパラメータ c が大きいときに、その傾向は顕著となることが判明した。

本論文ではさらに、本モデルが成す解空間の解析を行った。まず解空間がベイスンに分割される様子を、小さいノード数で計算機シミュレーションによって調査した。その結果、コストパラメータ c の値によって、解の多様性に関する相転移が起きること、またパラメータによっては多様なサイズを持つベイスンに分割されることが確認できた。次に、ベイスンサイズによる解の重み付けを利用した、本モデルで得られる解の強効率解に対する非効率性の評価を行った。非効率性に関する既存の2つの尺度、price of anarchyとprice of stabilityは、それぞれ最悪・最良ケースの解析を基礎としているために、特に非常に多様なベイスンサイズを持つ多数の解が存在するようなケースでは、非効率性の評価尺度として有効ではない場合がある。そのため、本論文では本モデルの特性を利用した重み付きprice of anarchyを提案した。これは、ベイスンサイズを利用した平均的な解析となる。いくつかの数値例において、既存の指標では見落とされていた平均的な挙動を表現することができることを示した。

以下、本論文の構成について説明する。第1章では、本論文の背景について述べる。第2章と第3章では、複雑NWとゲーム理論のそれぞれの分野における研究動向と既存の研究成果について紹介する。第4章では、NW形成ゲームの枠組みを紹介し、本論文において提案した動学的ネットワーク形成ゲームモデルについて述べる。第5章では、本モデルを用いたAS間トポロジの形成のモデリングについて述べる。また、第6章で本モデルが構成する解空間の解析について、その内容と結果を述べる。最後の第7章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

(注) ① タイプ、ワープロ等を用いてください。10pt 2,000字程度(2頁以内)とします。

② 論文題目が英文の場合は、題目の下に和訳を()を付して併記してください。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 24 年 8 月 10 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 神谷 淳

副査 田中 敦

副査 山内 泰樹



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

専攻名 システム情報工学専攻

氏名 今井 哲郎

2. 論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記する。)

Game Theory Based Modeling of the Complex Network Formation and Analysis
of the Solution Space

(ゲーム理論を用いた複雑ネットワーク形成のモデリングとその解空間の解析に関する研究)

3. 審査年月日

論文審査 平成 24 年 7 月 24 日 ~ 平成 24 年 8 月 10 日

論文公聴会 平成 24 年 8 月 10 日

場所 工学部 4 号館 112

最終試験 平成 24 年 8 月 10 日

4. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入する。)

(1) 学位論文審査 合格

(2) 最終試験 合格

5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200 字程度)

別紙のとおり

6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

別紙

専攻名	システム情報工学専攻	氏名	今井 哲郎
学位論文の審査結果の要旨			
<p>本学位論文の主要なテーマは、複雑ネットワークシステムの形成の仕組みをゲーム理論の立場から解明することである。</p> <p>本論文の第1章では、論文全体の背景と、問題意識について述べている。第2章と第3章では、複雑ネットワークとゲーム理論のそれぞれの分野において、その研究動向と既存の研究成果についてのサーベイを行っている。第4章の前半部分において、ゲーム理論の分野で知られる静学的ネットワーク形成ゲームの枠組みが述べられている。後半部分では、既存のモデルの問題点が述べられ、さらに彼と共同研究者によって提案された動学的ネットワーク形成ゲームモデルについて、モデルの説明、その特徴、既存の問題点などについての対比が述べられている。第5章では、動学的ネットワーク形成ゲームモデルによって、インターネットのAS (Autonomous System) 間ネットワークの形成のモデル化を行っている。計算機シミュレーションによるネットワークの生成とその特徴量の解析結果から、このネットワーク形成モデルが、複雑ネットワークの一つとして知られるAS間ネットワークの形成を表現しうることが明らかにされている。第6章では、この動学的ネットワーク形成ゲームモデルが構成する解空間の解析を、力学系における解空間の解析の考え方をを用いて行っている。本モデルが持つ多数の安定解を、そのベイスンサイズを利用して重要度を比較することができるという特性があることを述べ、その特性を用いて、最も効率的な解と比較したときの、安定解の平均的な非効率性を評価する新たな指標を提案し、その有効性について述べている。最後の第7章では、本学位論文のまとめと、今後の研究の展望について述べられている。</p> <p>本論文の内容については既に、以下の2本の学術論文</p> <p>(1) Tetsuo IMAI and Atsushi TANAKA, "Expected Price of Anarchy for the Dynamic Network Formation Game Model," Journal of Information Processing. (掲載決定)</p> <p>(2) Tetsuo IMAI and Atsushi TANAKA, "A Game Theoretic Model for AS Topology Formation with the Scale-Free Property," IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E93-D, No.11, pp.3051-3058, (Nov. 2010).</p> <p>および以下の1本の国際会議</p> <p>(1) Tetsuo IMAI and Atsushi TANAKA, "Weighted Price of Anarchy for the Multi-Agent based Dynamic Network Formation Game," Second International Joint Agent Workshop & Symposium (iJAWS2011), 2011-18, Atami, (Oct. 2011).</p> <p>において発表済みである。</p> <p>以上のように、本学位論文は研究成果、論文内容ともに十分なものであると認められるため、合格と判定した。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>最終試験は、学位論文の内容と、研究に関する口頭発表の審査によって行われた。</p> <p>本研究は、既に公表済みの1本と掲載決定済みの1本の計2本の学術論文、また1本の国際会議の実績がある。また学位論文と口頭発表により、その研究内容の独創性と有効性が十分に高く評価できると判断された。以上のことから、最終試験に合格と判定した。</p>			