

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 2 日現在

機関番号：12051

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560426

研究課題名（和文） 大規模ネットワークの成長モデル最適設計手法の開発

研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL DESIGN METHOD FOR GROWTH MODEL OF LARGE-SCALE NETWORK

研究代表者

平田 廣則 (HIRATA HIRONORI)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60111415

研究成果の概要（和文）：本研究では、動的な成長機構を有するネットワークを最適設計する手法を開発することを目的として研究を行った。その結果、基幹手法として、成長を伴う複雑ネットワーク設計手法を提案し、その汎用性や大規模ネットワーク設計への応用可能性を確認した。本研究で得られた成果は、今後、ネットワークとしてモデル化可能なシステムの設計における有用な手段となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we studied to develop an optimal design method for complex networks with a dynamic growth structure. In consequence, we proposed the growing complex network design method, which is key method of this study, and then, we confirmed its versatility and its possibility of application to large-scale networks. The proposed method is expected to be a useful tool in the design of systems that can be modeled as a network model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：システム情報（知識）処理，システム工学，複雑ネットワーク，マルチエージェント，自己組織化，多目的最適化，ソフトコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク構造の立場でモデル化することが可能なシステムは、情報（インターネット、WWW など）、社会（病気の伝搬など）、経済（生産・投資活動など）、工学（電力系統など）、生体（神経ネットワークなど）、生態（生態コミュニティ）などの分野に多数存在する。これらシステムをネットワークと

してとらえ、その特性と構造が、設計者にとって所望の状態となっているネットワークを構築する手法を開発することができれば、それは大規模システム設計における強力な手段となる。

ネットワークは、要素（ノード）とその間の相互作用（リンク）から構成され、その構造の本質は、要素間のつながりのトポロジー（リンクの有無）とその相互作用の大きさ

(リンクの太さ(重み))の2点にある。一般に、ネットワークの特性は、トポロジー(リンクの有無)の構造を特徴付ける「特徴量」を用いて議論される。たとえば、スケールフリーネットワークとよばれるネットワークにおいては、あるノードを消滅させる攻撃に対するロバスト性を、各ノードが持つ平均リンク数という特徴量を用いて議論することができる。

本研究課題で研究対象とする「所望ネットワーク」とは、設計者が望む構造と特性を定量的に表現する評価指標(上述の例でいえば、ロバスト性)を、ネットワークの特徴量を用いて定義したうえで、その評価指標が、設計者が望む値となっているネットワークのことを指す。

これまでの所望ネットワーク実現の研究では「ネットワークのノード数が一定の静的なネットワークのみ」を対象として、その内部リンク構造の組み替えによって、所望のネットワークを実現する研究が中心であり、ネットワークの成長に関しては考慮されていなかった。このような手法を用いて、成長を伴うネットワークを設計すると、ノードを追加する度にすべてのリンクの再生成が必要となる。既存のネットワークシステムを拡張する場合や、段階的に成長し、かつ各段階において所望のネットワークとなっている必要があるネットワークシステムを設計する場合など、現実のネットワークシステムの設計では、既存のネットワークの構造を変更できず、新規に追加するノードのリンク先しか選べないという状況は、十分に想定される。したがって、これまでの複雑ネットワーク設計手法は、このような現実のネットワークシステムへの応用に対して現実的な手法とはいえなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上述の研究背景を踏まえて、「3. 研究の方法」で述べる3点について研究を行い、その研究成果をまとめることで、動的な成長機構を有するネットワークを最適設計する手法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3点についての研究を、理論的解析とコンピュータを用いた数値実験を通して行った。

(1) 成長を伴う複雑ネットワーク設計手法

本研究課題の基幹手法として成長を伴う複雑ネットワーク設計手法を提案し、複雑ネットワーク研究において代表的な評価指標を所望の値とするネットワークを設計する場合について、その有効性を検証した。

(2) 成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の汎用性の検証

(1)で提案した手法について、(1)で検証した一般的なネットワーク特徴量以外の特徴量等を用いて設計者が望むネットワークを表現した場合での検証、ネットワークの成長の際に制約を伴う場合での検証を行い、成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の汎用性の検証を行った。

(3) 大規模ネットワークへの応用を志向した成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の改良

(1)で提案した手法を大規模ネットワーク設計に応用するために、本手法の改良を行った。具体的には、本手法における1ノード成長時のリンク先決定問題に対し、さまざまな最適化手法を応用したときの有効性の検証、内部リンク構造の変更を伴った改良手法の提案と有効性の検証、1ノード成長時のリンク先決定問題を解く最適化手法のパラメータを自動調整する手法の提案と有効性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 成長を伴う複雑ネットワーク設計手法

本研究では、成長を伴う複雑ネットワーク設計手法を提案した。本手法では、まず、ノード数が増加する成長を伴うネットワークを考える。つぎに、1ノード成長時リンク先決定問題を定式化する。この問題は、設計者が望む特性をネットワーク特徴量を用いて表現した評価関数の最適化問題として定式化される。そして、これを逐次解きながらネットワークを成長させることで、所望のネットワークを得る。

本研究では、複雑ネットワークの代表的な特徴量である平均経路長とクラスタリング係数を同時に最適にするネットワークを構築する場合について、提案手法の有効性を検証した。検証実験においては、1ノード成長時のリンク先決定問題が離散変数多目的最適化問題として定式化されるので、その解法として多目的遺伝的アルゴリズムを応用した。提案手法を用いて、500ノードまでネットワークを成長させたところ、設計者が望む特性をもつネットワークが得られ、提案手法の有効性が確認された。

本研究で得られた成果は、1ノード成長時のリンク先決定問題を繰り返し解くだけでも、所望のネットワークが十分得られることを示唆している。「1. 研究開始当初の背景」でも説明したが、現実のネットワークの成長を考えてみると、既存のネットワークが変更できず、新規に追加するノードのリンク先しか選べないという状況は十分に想定される。し

たがって、本研究で得られた成果は、そのような、いわばアドホックな成長しか行えない状況でも、十分に最適なネットワークが得られることを示唆している。

また、あるノード数を持ったネットワークの最適化という観点で考えると、単純な静的なネットワークの内部構造最適化問題を解く場合と比較して、本研究で提案した手法で解く1ノード成長ごとの部分問題は十分に簡潔な問題であり、これを繰り返し解きながら成長させることを考慮しても、全体で考慮する問題の複雑さは十分に小さい。この点から考えても、本研究で提案した手法は、所望のネットワークを得る手法として有用な手法であると考えられる。

この研究成果は、「5. 主な発表論文等」の[雑誌論文]①と[学会発表]の⑤で発表した。

(2) 成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の汎用性の検証

本研究では、(1)で提案した手法の汎用性の検証を目的として研究を行った。その結果、以下の成果が得られた。

① さまざまなネットワーク特徴量を用いた場合での有効性の検証

リッチクラブ係数、媒介中心性、ネットワークの連結性を用いて所望のネットワーク特性を表現する場合について、成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の有効性を確認した。この成果は、平均経路長やクラスタリング係数といったネットワーク全体の値として計算される特徴量のみでなく、リッチクラブなどのネットワークの一部から計算される特徴量や、媒介中心性のように1ノードについて計算される特徴量を用いた場合、さらには、ネットワーク連結性のようの特徴量として計算できないような特性についても、本手法を用いて、所望の特性を持つネットワークを設計できることを示している。

② ネットワークの成長の際に制約を伴う場合での有効性の検証

成長を伴う複雑ネットワーク設計手法における1ノード成長時のリンク先決定が、ノード間の物理的距離と1ノードが持ちうるリンク数によって制約を受ける場合について、本手法の有効性を検証した。具体的には、1ノード成長時のリンク先決定問題を制約条件付き最適化問題として定式化しなおし、制約条件として、ノード間の物理的距離に起因したリンク長制約と、1つのノードが持ちうるリンク数に起因したリンク数制約を用いた場合について、有効性を検証した。計算機実験の結果から、制約を伴う場合でも本手法が有用であることを確認した。

これらの成果は、(1)で提案した成長を伴う複雑ネットワーク設計手法が、さまざまな特

徴量を用いた場合や成長に対して制約がある場合でも有用であることを示しており、本手法が実システムに応用可能であることを示唆している。

これらの成果のうち、①は「5. 主な発表論文等」の[学会発表]④で、②は[学会発表]③で発表した。

(3) 大規模ネットワークへの応用を志向した成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の改良

本研究では、(1)で提案した手法を大規模ネットワーク設計に応用するために、本手法の改良を行った。その結果、以下の成果が得られた。

① さまざまな最適化手法を応用した場合の有効性の検証

成長を伴う複雑ネットワーク設計手法における1ノード成長時のリンク先決定問題の解法に、遺伝的アルゴリズム、Simulated Annealing法、Boolean Particle Swarm Optimization法を適用し、得られた結果の比較を行った。結果として、Boolean Particle Swarm Optimization法が、とくに計算時間の面で優れていることを確認した。

② 内部リンクのつなぎかえを導入した手法の提案

成長を伴う複雑ネットワーク設計手法では、既存のネットワーク構造には手を加えずにネットワークを成長させる。したがって、ある程度の規模のネットワークから成長させると、所望のネットワークを得ることができない場合がある。この問題点に対し、本研究では、内部リンクのつなぎ替え操作を導入した手法を提案した。具体的には、ネットワークを1ノード成長させた後、得られたネットワークが所望の状態になっていないときに、内部リンクのつなぎ替えを行う。このつなぎ替え操作では、既存のネットワークから1ノードを削除した上で、もう一度リンク先決定問題を解いて新たなノードを追加する。数値実験の結果から、本手法を用いることで、初期ネットワークの影響が大きい場合に、少ない追加ノード数でネットワークを意思決定者にとって満足な状態にすることができることを確認した。

③ 多目的遺伝的アルゴリズムの世代数の適応的調整を導入した手法の提案

成長を伴う複雑ネットワーク設計手法では、ネットワークの成長に伴って、内部で解かれる最適化問題の性質が変化することが予想される。しかし、これを解くために用いる多目的遺伝的アルゴリズムで用いるパラメータは固定であり、探索が非効率となっている可能性がある。この問題点に対し、本研

究では、ネットワークを成長させる過程で、繰り返し類似した最適化問題を解くことに着目し、過去の最適化の結果に基づき、多目的遺伝的アルゴリズムの世代数を自動調整する手法を提案した。数値実験の結果から、多目的GAの世代数の適応的な調整を行うことで、意思決定者にとって満足なネットワークを得ながらも、計算量を抑えることができることを確認した。また、本手法を用いることで、意思決定者にとって満足な状態を維持する段階では、従来手法よりも必要となる世代数は増加するが、所望の状態により近い状態でネットワークを維持することができ、結果として、ネットワークが意思決定者にとって満足な状態から逸脱することも減らすことができることも確認した。

本研究の改良により、成長を伴う複雑ネットワーク設計手法によって、800から1000ノード程度のネットワークを現実的な計算時間で設計できるようになった。本成果は、より大規模なネットワーク設計への応用が期待される。

これらの成果のうち、①は「5. 主な発表論文等」の〔学会発表〕①で、②は〔学会発表〕②で発表した。また、②の成果の一部と③はSICE Annual Conference 2012にて発表予定である。

(4) まとめと今後の展望

本研究では、動的な成長機構を有するネットワークを最適設計する手法を開発することを目的として研究を行った。その結果、基幹手法として、成長を伴う複雑ネットワーク設計手法を提案し、その汎用性や大規模ネットワーク設計への応用可能性を確認した。本研究で得られた成果は、今後、ネットワークとしてモデル化可能なシステムの設計における有用な手段となることが期待される。

今後の展望としては、本研究で得られた成果からネットワーク生成モデル自体を抽出する手法の開発、より大規模なネットワークへの応用、実システム（たとえば、電力ネットワークや交通ネットワーク）への応用などがあげられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 水野 晴規, 岡本 卓, 小坪 成一, 平田 廣則, 成長を伴う複雑ネットワーク設計手法, 電気学会論文誌(C), 査読有, Vol. 131, No. 5, 2011, pp. 966-975 (DOI: 10.1541/ieejieiss.131.966)

〔学会発表〕（計6件）

- ① 伊藤 理紗, 岡本 卓, 小坪 成一, 平田 廣則, Boolean particle swarm optimization を用いた複雑ネットワーク設計手法, 計測自動制御学会 第46回システム工学部会研究会, 2012年3月8日, 東京工業大学田町キャンパス（東京都港区）
- ② 水野 晴規, 岡本 卓, 小坪 成一, 平田 廣則, 内部リンクのつなぎかえを導入した成長を伴う複雑ネットワーク設計手法, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2011, 2011年11月22日, 国立オリンピック記念青少年総合センター（東京都渋谷区）
- ③ 中本 遼, 岡本 卓, 小坪 成一, 平田 廣則, 成長を伴う制約条件付き複雑ネットワーク設計手法, 平成23年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2011年9月8日, 富山大学五福キャンパス（富山県富山市）
- ④ 白須 友, 岡本 卓, 小坪 成一, 平田 廣則, 成長を伴う複雑ネットワーク設計手法の汎用性の一検証, 電気学会 産業計測制御研究会 「産業計測制御一般」, 2011年3月8日, 千葉工業大学 津田沼キャンパス（千葉県習志野市）
- ⑤ 水野 晴規, 岡本 卓, 小坪 成一, 平田 廣則, 成長を考慮した複雑ネットワーク設計手法, 計測自動制御学会 第43回システム工学部会研究会, 2010年3月11日, 東京工業大学 田町キャンパス（東京都港区）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 廣則 (HIRATA HIRONORI)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60111415

(2) 研究分担者

小坪 成一 (KOAKUTSU SEIICHI)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70241940

岡本 卓 (OKAMOTO TAKASHI)
千葉大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40451752