

学位論文題名

Complex System Dynamics on Evolving Network

(進化するネットワークの複雑系ダイナミクス)

学位論文内容の要旨

本論文では、要素がそれぞれの属性や情報を持ちながらシステム内で相互に関係し合い全体として機能しているシステムをネットワークとしてとらえ、特に、トップダウン的な制御なしに自己組織化し、自律的機能を発現している大規模なネットワークを *Evolving Network* と呼ぶ。

システムの創発されるパターンや挙動を解明する複雑系科学の分野においては、規模が巨大なシステムにおける要素と要素間の関係性をノードとリンクからなるネットワークとしてモデル化することで、システムの大域的特性に関する多くの知見が得られてきた。一方、大規模データを対象に有用な情報を抽出するデータマイニングの分野では、情報間の関係性をネットワークとして扱うリンクマイニングと呼ばれる解析手法が提案されている。これらは、データが持つ属性情報に焦点を当てる方法論であり、新たな知識やパターンの発見に役立っている。

これらを背景として、本論文では *Evolving Network* に関し、複雑系の視点からシステムに生来備わる特徴を導出し、その大域的特性に応じた情報処理手法によって内部の要素の持つ有用な局所的属性情報を抽出することを目的としている。そこでまず、本論文では生態系の進化や成長に見られるダイナミクスの視点から、ネットワークの恒常性維持、適応度変化、進化過程に焦点を当て、*Evolving Network* の振舞いに関する特徴を把握する。次に、*Evolving Network* の特徴を持つ実システムのネットワークに対し、システム全体の大域的特性と内部要素が持つ局所的属性の両者を考慮した解析手法を提案し、その有効性を検証すると共に、特に WWW 上の情報システムに蓄積された大規模データベース向けウェブ・インテリジェンスへの応用へと展開している。

本論文は以下のように構成されている。

第一章では、*Evolving Network* における進化ダイナミクスを明確にするために、研究背景となるネットワークの従来研究について総括している。特に複雑系分野におけるシステムの大域的特性に関する研究と、データマイニング分野における WWW の局所的情報抽出のためのリンクマイニングについて焦点を絞っている。また、本論文の研究目的を明らかにしている。

第二章では、*Evolving Network* の進化ダイナミクスの中で、自己修復や機能維持をもたらす恒常性維持について、変動しながらもシステムの大域的特性が保たれるメカニズムを解明している。ここでは、システム内の要素の消滅と再生というダイナミクスに対し、ネットワークの成長過程における構造変化を調べることで、要素の優先的選択による成長特性が恒常性維持の必要条件であることを結論付けている。

第三章では、自己組織化臨界現象に焦点を当てる。これは要素間に相互作用が働く様々な大規模システムに広く観測される現象であり、大規模システムの時間的・空間的特徴量変化にはべき乗則が見られることが知られている。そこで本論文では、ネットワークの要素間の相互作用による成長モデルとして新たに要素のリンク獲得適応度の概念を導入している。その結果、ネットワークの進化ダイナミクスにおける時間的・空間的特徴量変化にべき乗則が見出され、Evolving Network は自律的に秩序化する性質を具備することが示されている。

第四章では、様々な構造特性を持つネットワークを生成可能なネットワーク進化モデルを提案している。このモデルは、生命進化プロセスにおける選択と突然変異的操作を適用したネットワークの進化ダイナミクスを実現している。更に、要素間の相互作用確率を決定するパラメータを導入し、ネットワークの構造変化をチャート化している。結果として、多様な構造特性を有するネットワークが、いかに Evolving Network として生成されるかを明らかにしている。

第五章では、第四章までに明らかになった Evolving Network の特徴を持つ実システムを解析するための方法について検討している。まず、解析対象とするネットワークが Evolving Network として具備すべき特徴を精査している。次に、Evolving Network であると判断されたネットワークの大域的特性と要素の局所的属性の両者を考慮した解析方法の条件を明確にしている。これらの検討から、ネットワークダイナミクスという共通項で、複雑系の視点からのシステム解析、およびデータマイニングの視点からの情報処理解析の融合が必要であるとの指摘がされている。

第六章では、ネットワークの大域的特性と要素の局所的属性情報のいずれをも評価した、Evolving Network 向け解析手法を提案する。この手法においては、システム内で着目する局所的属性情報をフォーカスパラメータによってネットワークの大域的特性に反映させ、複合的に評価することで各要素の特徴量が抽出されている。また、本提案手法を WWW 上の情報システムに蓄積された実大規模データに適用し、フォーカスパラメータ法による特徴抽出の有効性を検証している。

第七章では、システムに生来備わる大域的特性に応じた情報処理手法によって、有用な局所的属性情報を抽出可能であることをまとめている。また、本提案手法が Evolving Network に対する解析手法として工学的な応用が可能であると結論付けている。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 吉 井 伸 一 郎
副 査 教 授 栗 原 正 仁
副 査 教 授 古 川 正 志
副 査 教 授 大 内 東

学 位 論 文 題 名

Complex System Dynamics on Evolving Network

(進化するネットワークの複雑系ダイナミクス)

本論文では、要素がそれぞれの属性や情報を持ちながらシステム内で相互に関係し合い全体として機能しているシステムをネットワークとしてとらえ、特に、トップダウン的な制御なしに自己組織化し、自律的機能を発現している大規模なネットワークを Evolving Network と呼ぶ。

システムの創発されるパターンや挙動を解明する複雑系科学の分野においては、規模が巨大なシステムにおける要素と要素間の関係性をノードとリンクからなるネットワークとしてモデル化することで、システムの大域的特性に関する多くの知見が得られてきた。一方、大規模データを対象に有用な情報を抽出するデータマイニングの分野では、情報間の関係性をネットワークとして扱うリンクマイニングと呼ばれる解析手法が提案されている。これらは、データが持つ属性情報に焦点を当てる方法論であり、新たな知識やパターンの発見に役立っている。

これらを背景として、本論文では Evolving Network に関し、複雑系の視点からシステムに生来備わる特徴を導出し、その大域的特性に応じた情報処理手法によって内部の要素の持つ有用な局所的属性情報を抽出することを目的としている。そこでまず、本論文では生態系の進化や成長に見られるダイナミクスの視点から、ネットワークの恒常性維持、適応度変化、進化過程に焦点を当て、Evolving Network の振舞いに関する特徴を把握する。次に、Evolving Network の特徴を持つ実システムのネットワークに対し、システム全体の大域的特性と内部要素が持つ局所的属性の両者を考慮した解析手法を提案し、その有効性を検証すると共に、特に WWW 上の情報システムに蓄積された大規模データベース向けウェブ・インテリジェンスへの応用へと展開している。

本論文は以下のように構成されている。

第一章では、Evolving Network における進化ダイナミクスを明確にするために、研究背景となるネットワークの従来研究について総括している。特に複雑系分野におけるシステムの大域的特性に関する研究と、データマイニング分野における WWW の局所的情報抽出のためのリンクマイニングについて焦点を絞っている。また、本論文の研究目的を明らかにしている。

第二章では、Evolving Network の進化ダイナミクスの中で、自己修復や機能維持をもたらす恒常

性維持について、変動しながらもシステムの大域的特性が保たれるメカニズムを解明している。ここでは、システム内の要素の消滅と再生というダイナミクスに対し、ネットワークの成長過程における構造変化を調べることで、要素の優先的選択による成長特性が恒常性維持の必要条件であることを結論付けている。

第三章では、自己組織化臨界現象に焦点を当てる。これは要素間に相互作用が働く様々な大規模システムに広く観測される現象であり、大規模システムの時間的・空間的特徴量変化にはべき乗則が見られることが知られている。そこで本論文では、ネットワークの要素間の相互作用による成長モデルとして新たに要素のリンク獲得適応度の概念を導入している。その結果、ネットワークの進化ダイナミクスにおける時間的・空間的特徴量変化にべき乗則が見出され、Evolving Network は自律的に秩序化する性質を具備することが示されている。

第四章では、様々な構造特性を持つネットワークを生成可能なネットワーク進化モデルを提案している。このモデルは、生命進化プロセスにおける選択と突然変異的操作を適用したネットワークの進化ダイナミクスを実現している。更に、要素間の相互作用確率を決定するパラメータを導入し、ネットワークの構造変化をチャート化している。結果として、多様な構造特性を有するネットワークが、いかに Evolving Network として生成されるかを明らかにしている。

第五章では、第四章までに明らかになった Evolving Network の特徴を持つ実システムを解析するための方法について検討している。まず、解析対象とするネットワークが Evolving Network として具備すべき特徴を精査している。次に、Evolving Network であると判断されたネットワークの大域的特性と要素の局所的属性の両者を考慮した解析方法の条件を明確にしている。これらの検討から、ネットワークダイナミクスという共通項で、複雑系の視点からのシステム解析、およびデータマイニングの視点からの情報処理解析の融合が必要であるとの指摘がされている。

第六章では、ネットワークの大域的特性と要素の局所的属性情報のいずれをも評価した、Evolving Network 向け解析手法を提案する。この手法においては、システム内で着目する局所的属性情報をフォーカスパラメータによってネットワークの大域的特性に反映させ、複合的に評価することで各要素の特徴量が抽出されている。また、本提案手法を WWW 上の情報システムに蓄積された実大規模データに適用し、フォーカスパラメータ法による特徴抽出の有効性を検証している。

第七章では、システムに生来備わる大域的特性に応じた情報処理手法によって、有用な局所的属性情報を抽出可能であることをまとめている。また、本提案手法が Evolving Network に対する解析手法として工学的な応用が可能であると結論付けている。

これを要するに、著者は、Evolving Network として進化する複雑ネットワークの動作原理を導出し、その動特性を明らかにしている。また、Evolving Network の特徴を有するシステムに対して、全体の大域的特性と内部要素の局所属性両方を評価した解析手法を考案し、現実の大規模データに適用することで手法の有効性を検証しており、情報工学、複雑系工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。