

氏名	黒田 佳織
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 944 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Estimation of network structures from multivariate point processes (多変量点過程時系列データを用いたネットワーク構造推定)
論文審査委員	委員長 教授 池口 徹 委員 教授 大澤 裕 委員 教授 重原 孝臣 委員 准教授 内田 淳史 委員 准教授 小室 孝

## 論文の内容の要旨

私たちの周りには、複数の要素が互いに影響を及ぼし合うことにより、非常に複雑な振る舞いを示すシステムが存在する。このような複数の構成要素からなるシステムを理解するためには、要素間の結合形態、すなわちネットワーク構造を知ることが重要である。それらのシステムからネットワーク構造を直接調べることは容易ではないが、システムの各構成要素から観測される多変量時系列からネットワーク構造が推定できると考えられる。しかし、ニューラルシステム、経済システム、自然システムなど様々な分野で観測される時系列は離散的なイベント系列であることが多い。例として、神経細胞から観測されるスパイク列、為替や株の取引データ、地震の系列などがあげられる。このような時系列は点過程時系列と呼ばれる。結合形態を推定するための従来の手法は滑らかな連続時系列を対象とするため、点過程時系列に直接適用することは困難である。そこで本論文では、システムから観測される多変量時系列が点過程時系列であるような場合に対して、点過程時系列データのみから元のシステムのネットワーク構造を推定する手法を開発することを研究目的としている。

第一章では、本研究の背景、目的および位置づけを示した。

第二章では、要素間の結合形態を推定するにあたって問題となる擬似相関について述べ、さらに、疑似相関の影響を取り除く偏解析の代表的な 3 つの統計指標について述べた。

第三章では、点過程時系列を連続時系列に変換することにより点過程時系列データからネットワーク構造を推定する手法を提案した。点過程時系列から連続時系列への変換手法として、カーネル密度推定の手法を用いた。カーネル密度推定では、変換時系列はカーネル関数のバンド幅に依存するため、最適なバンド幅を設定する必要がある。そこで、カーネルバンド幅選択法を二つ提案した。一つは、スパイク列の発火率推定のために用いられるカーネルバンド幅最適化法を応用した手法で、もう一方は、カオス時系列解析における

基本技法であるアトラクタ再構成での相互情報量を用いた時間遅れ座標系の設定法を応用した手法である。この提案手法を用いることで、まず、観測スパイク列からニューロンにどのような入力情報が与えられているのか読み取ることができるか調べた。数値実験により入力時系列と提案手法によって得られた時系列に対して、アトラクタを再構成した結果、提案法は入力時系列情報を精度良く再構成できていることを確認した。さらに、変換された連続時系列から、偏解析の指標を用いることでネットワーク構造が推定できることを確認した。また、カーネル密度推定の手法をマーク付き点過程データに適応できるように拡張した。マーク付き点過程データとは、イベント時刻だけでなく、イベントに付加情報を持つデータのことである。数値実験により、イベント時刻のみから推定した場合よりも、マーク付き点過程データを用いた方がより高精度に結合形態を推定できることを示した。

第三章で述べた手法は連続時系列に変換する際に、元の点過程時系列の情報が失われる可能性があるという問題があった。そこで第四章では、点過程時系列間の距離を用いて点過程時系列を直接扱い、結合形態を推定する手法を提案した。ここでは、スパイク列間の距離を正規化した指標で、相関係数に類似した指標であるスパイク列間相関係数を提案し、さらに偏相関解析を適用したスパイク列間偏相関係数を提案した。これらの提案指標を用いることで、ニューラルネットワークモデルを用いた数値実験により、要素間の結合強度が小さい場合や、データ数が少ないような推定が困難になる状況において、連続時系列に変換する手法よりも高精度にネットワーク構造が推定できることを確認した。さらに、マーク付き点過程へ適用できるように提案手法を拡張するために、マーク付き点過程間の距離を求める指標を提案した。数値実験により、提案指標を用いることで、イベント時刻のみのデータでは推定できなかった場合でも、マーク付き点過程を用いることでネットワーク構造が推定可能なことを確認した。

第五章では点過程時系列間の距離と多次元尺度法を用いることにより、点過程時系列からネットワーク構造を推定する手法を提案した。多次元尺度法を用いることで、点過程時系列間の距離からユークリッド空間にその距離関係を保持した座標ベクトルが得られる。得られた座標ベクトルを用いると、重回帰モデルに帰着できるため、重回帰モデルが元となる偏相関解析が適用可能となる手法である。数値実験により、スパイク列からネットワーク構造を推定した結果、高精度にネットワーク構造が推定できることが確認できた。さらに、提案手法の応用として、ニューラルシステムにおける学習によってネットワーク構造が時間経過と共にどのように変化して行くかを同定し、学習を検出する解析手法を構築した。数値実験では、スパイクタイミングに依存した学習則を導入した。その結果、学習によって変化するネットワーク構造が推定可能なことを確認した。

## 論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 26 年 2 月 10 日（月）に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて、詳細な質疑と論文内容の審査を行った。以下は、審査結果の要約である。

私たちの身の周りには、複数の要素が相互に影響を及ぼし合うことにより、複雑な振る舞いを示すシステムが多数存在する。このような複数の構成要素からなるシステムの数理構造を理解するためには、各要素のダイナミクスだけでなく、要素間の結合形態、すなわちネットワーク構造を知ることが必要不可欠である。通常、システム内のネットワーク構造を直接調査することは容易ではない。しかし、近年の計測技術の発展に伴って、システム内の各構成要素の振る舞いを多変量時系列として観測することが可能となっている。これにより、これらの観測された多変量時系列からネットワーク構造が推定できるようになっている。

しかし、神経細胞から観測されるスパイク列、為替や株の取引データ、地震の発生間隔系列など、様々な分野で観測される時系列は、離散的なイベント系列（点過程）により情報表現されている。結合形態を推定するために提案されてきた種々の従来手法は、連続的に変化する滑らかな時系列を対象としているため、これらの手法を点過程時系列に直接適用することは困難となっている。

本論文では、システムから観測される多変量時系列が点過程時系列である場合に対して、元のシステムのネットワーク構造を推定する手法を提案している。具体的には、要素が直接的には結合していないにも関わらず、共通入力を持つことによって生じる疑似相関を取り除くために偏解析を導入し、これを点過程時系列解析と融合させた手法である。また、提案手法を用いて、観測された点過程時系列データのみからネットワーク構造を推定するアルゴリズムも提示し、数理モデルを用いた数値実験を通じた検証により性能評価している。また、点過程時系列のイベント発生時刻に付加情報を併せたマーク付き点過程データへも適用範囲を拡大し、提案手法を用いることで高精度なネットワーク構造推定が可能となることを定量的に示している。

第一章では、本研究に関連する非線形時系列解析とその周辺についての現在までの研究背景が述べられている。また、本研究の位置づけと目的について述べられている。

次に、第二章では、まず始めに、要素間の結合形態を推定するにあたって解決すべき課題となる疑似相関について述べている。さらに、本論文において用いた疑似相関の影響を取り除く偏解析に関する三種類の統計指標（partial correlation coefficient, partial mutual information, partial directed coherence）について、その定義が導出過程と共に述べられている。また、これらの統計指標の特徴についても述べられている。

第三章、第四章、第五章が本論文で得た成果をまとめた部分である。

第三章では、点過程時系列を連続時系列に変換することにより点過程時系列データからネットワーク構造を推定する手法を提案している。点過程時系列から連続時系列への変換手法として、ニューロサイエンスで発火率推定のための手法として提案されているカーネル密度推定法を応用している。カーネル密度推定法を適用するには、カーネル関数のバンド幅を適切に設定する必要がある。そこで本論文では、最適なカーネルバンド幅決定法を二種類提案している。第一は、スパイク列の発火率推定のために用いられるカーネルバンド幅最適化法を応用した手法であるが、本章で用いる点過程時系列から連続時系列への変換に適する形に修正される

と共に、最適バンド幅の値が解析的に導出されている。第二は、カオス時系列解析における基本技法であるアトラクタ再構成における時間遅れ値の最適設定に相互情報量を用いる手法の応用である。これらの提案手法をニューロンの数理モデルより作成した観測スパイク列に対して適用することで、その性能を定量的に評価し、提案法は点過程時系列を精度良く連続時系列に再構成できていることを確認した。さらに、変換された連続時系列から、偏解析の指標を用いることでネットワーク構造が推定できることも示している。また、提案手法をマーク付き点過程データに適応できるように拡張し、イベント時刻のみから推定した場合よりも、マーク付き点過程データを用いた方がより高精度に結合形態を推定できることを定量的に示している。

第四章では、点過程時系列間の距離を用いて点過程時系列を直接取扱うことでネットワーク構造を推定する手法を提案している。具体的には、spike time metric と呼ばれる点過程間の距離尺度を正規化することで、相関係数と同じ特徴を有するスパイク列間相関係数とスパイク列間相関係数に対して偏解析を適用したスパイク列間偏相関係数を提案した。これらの提案指標を用いることで、要素間の結合強度が小さい場合や、データ数が少ない場合など、推定が困難となる状況においても、高精度にネットワーク構造が推定できることを確認している。さらに第四章の後半では、マーク付き点過程を対象とした場合と結合が一方向性の場合について、ネットワーク構造推定が可能となるように、spike time metric を拡張した点過程間の距離尺度を新たに提案している。また、提案した距離尺度を用いることで、点過程情報のみでは推定が困難な場合でも、マーク情報を用いることでネットワーク構造がより高精度に推定可能となること、結合方向の同定が可能となることを確認した。

第五章では、点過程時系列間の距離尺度と多次元尺度法を用いることにより、点過程時系列からネットワーク構造を推定する手法を提案した。多次元尺度法を用いることで、点過程時系列間の距離からユークリッド空間にその距離関係を保持した座標ベクトルが得られる。得られた座標ベクトルを用いると、重回帰モデルに帰着できるため、これにより偏解析が適用可能となることを解析的に示している。提案法に対する数値実験により、スパイク列からネットワーク構造を推定した結果、高精度にネットワーク構造が推定できることを確認している。さらに、提案手法を神経回路網における学習の検出問題へ応用している。近年脳神経系においてその存在が確認されているスパイクタイミングに依存した学習則を導入した神経回路網を対象とし、その構造が時間と共にどのように変化するかを同定する手法である。この結果、時間的に変化するネットワーク構造が推定可能なことが示されている。

最後に第六章では、本論文で得られた成果を纏めている。また、得られた成果と今後の研究課題との関係についても述べられている。

なお、本論文の主な内容は、レフリー制のある学術雑誌に三編の学術論文として、また、査読付き国際会議録に七編の論文として、既に公表されている。

以上要するに、本論文は、観測対象が点過程時系列である場合に、それを生み出したネットワーク構造を推定する手法を提案したものである。具体的には疑似相関による影響を取り除くための偏解析を点過程時系列解析にも拡張できることを示している。その際、非線形力学系やニューロンモデルを結合した数理モデルに基づく大量の数値実験により、提案手法が有効であることも定量的に示している。本論文は、従来では困難であった観測データが点過程時系列のみである場合のネットワーク構造推定という、点過程時系列解析の新しい枠組みを提案すると共に、具体的な推定アルゴリズムを明確に提示している。これらの研究成果は、数理工学、数理情報学、非線形時系列解析、生体情報工学分野への貢献が大である。従って、当学位論文審査委員会は、本論文が、博士（工学）の学位を授与するに十分に値するものと認め、「合格」と判定した。