

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330298

研究課題名(和文) 観測像の相関構造を自動抽出して個体別に連続アトラクタとして獲得する連想記憶モデル

研究課題名(英文) Associative memory model that extracts correlated structure of observed images and stores the individual images as continuous attractor

研究代表者

木本 智幸 (KIMOTO, Tomoyuki)

大分工業高等専門学校・電気電子工学科・教授

研究者番号：30259973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：同一人物の顔を様々な方向から観測すると、複数の画像が得られるが、これらを個別に記憶することは自然な情報表現ではない。本研究では、Hopfieldモデルを改良することで、複数の画像を連続アトラクタと呼ばれる記憶状態にして保存することに成功した。Hopfieldモデルは脳の記憶モデルの一つで、Isingスピンで構成される。我々は、Hopfieldモデルの構成素子をIsingスピンからXYスピンに変えたことで連続アトラクタが現れることを発見した。さらに、Isingスピンを位相振動子に拡張しても連続アトラクタと考えられる状態が発生することも分かった。

研究成果の概要(英文)：When we observe the faces of a person from different directions, a plurality of images are obtained, but storing these images separately is not a natural information representation. In this study, we were succeeded in storing a plurality of images as a continuous attractor, by improving the Hopfield model. The Hopfield model is one of the memory model of the brain, and is composed of the elements called the Ising spin. We found that continuous attractor occurs by extending the Ising spin to XY spin in the Hopfield model. Furthermore, even if we extend the Ising spin to the phase oscillator, it was found that the continuous attractor occurs.

研究分野：ニューラルネットワーク

キーワード：ホップフィールドモデル 点アトラクタ 連続アトラクタ XYスピン 位相振動子

1. 研究開始当初の背景

同一人物を観測する場合、観測方向によって異なる顔画像が得られる。こうした複数の顔画像を自然な情報表現で記憶させて物体認識を行おうとする研究が、連想記憶モデルや自己組織化マップの分野で数多くなされている。実世界には、こうした情報表現を持つ対象が多いため、我々も数多くのモデルの研究を行ってきた。

我々が注目したのは、Hopfield モデルと呼ばれる、2 値を要素とする多次元ベクトルを複数記憶することができる連想記憶モデルである。Hopfield モデルに複数の記憶パターンを学習させておけば、その後、ノイズが乗った任意のパターンをモデルに与えることで、そのノイズパターンに最も近い記憶パターンが想起される。ヒトがノイズの乗った画像や一部が隠れた画像からでもそれが何であるかを想像できることに似ている。脳の記憶モデルとしても多くの研究がされている重要なモデルである。

しかし、Hopfield モデルは、記憶パターンを独立な点アトラクタとして保存するため、同一人物の様々な方向から観測した各顔画像のように一組で取扱いたいものに対しても個別の点アトラクタとして扱うことになる。では、どのようなアトラクタ構造が望ましいのか？ 我々は、全ての観測像を連続アトラクタとして記憶されることが望ましいと考えた。これまでの多くの研究でも、連続アトラクタは重要な研究対象となっていたが、点アトラクタを持つモデルが殆どで、連続アトラクタを持つモデルは数が少なかった。我々は Hopfield モデルを改良して、連続アトラクタが現れないかと考え、様々な改良モデルの性質を解析し、連続アトラクタが発生する可能性を見出した。この結果を利用すれば、顔画像の自然な情報表現が獲得できる可能性があり、展開の重要性が高まった。

2. 研究の目的

例えば、同一人物を様々な方向から観測すると、複数の画像が得られるが、これらを個別に記憶すること自然な情報表現ではない。しかし、Hopfield モデルで複数の観測画像を記憶した場合、個別の点アトラクタとなって保存されてしまう。Hopfield モデルは Ising スピンと呼ばれる 2 状態のみを取る素子で構成されているが、我々は、これを XY スピンと呼ばれる $- \sim +$ の位相を状態変数に持つ素子に拡張することで連続アトラクタが現れる可能性があることを発見した。この知見を利用すれば、同一人物の顔画像を連続アトラクタとしてひとまとめに格納できると考えられるため、その性質を統計力学による解析で包括的に明らかにすることを本研究の目的とする。XY スピンは、脳の神経細胞のスパイク位相の情報を取り入れた神経細胞モデルと考えることができ、Ising スピンよりも生理学的によりリアリティーが高い。

本研究で連続アトラクタの生成が確認できれば、新たな物体認識モデルとしてだけでなく、脳メカニズム同定の知見にもなる。

3. 研究の方法

Hopfield モデルの構成素子を Ising スピンにした場合と XY スピンにした場合で、エネルギー構造にどのような変化があるのか調べる。Hopfield モデルはアトラクタモデルであるため、統計力学でエネルギーを計算した上で、ヘシアン行列の固有値を用いて、エネルギーの空間構造を解析し、連続アトラクタの存在を証明する。また、計算機シミュレーションを用いて、理論解析の妥当性も検証する。さらに、記憶パターンの数や相関構造も変化させて、連続アトラクタができる条件を系統立てて包括的に調べあげる。包括的解析では、大規模な数値計算と計算機シミュレーションが必要であるため、GPUによって高速な計算を行うためのプログラムを開発する。

4. 研究成果

Hopfield モデルの構成素子を XY スピン系に拡張し、2 つの記憶パターンを学習させると、記憶パターン間に記憶パターンと同じエネルギー状態を持つ道筋ができることが分かった。このため、例えば記憶パターン A を想起しているときに、記憶パターン B をわずかも外部入力してやると、連続アトラクタを通して記憶パターン B に想起状態が移ることが分かった。当然だが、B に遷移中に外部入力を切ると、連続アトラクタ上で停滞する。記憶パターン以外は外部から与えていないため、記憶パターンを除く連続アトラクタの道筋は、Hopfield モデルが自動的に生成していることになる。また、3 つ記憶パターンを学習した場合、相互に 2 つの記憶パターン間を結ぶ連続アトラクタが現れることが分かった。例えば、A, B, C の 3 つの記憶パターンを学習した場合、A B, B C, C A で連続アトラクタが現れた。この場合、A B の途中の状態から、C に行く連続アトラクタは存在しなかった。つまり、別の記憶パターンに行くには、一度記憶パターンを経由していく必要があることが分かった。これは、4 つ以上の記憶パターンを学習した場合でも同じであった。これらの性質は、エネルギーのヘシアン行列による固有値安定性解析で調べた。また、計算機シミュレーションでも理論の妥当性を確認した。計算機シミュレーションでは有限サイズ効果のため、温度を入れると、連続アトラクタ上をランダムに経巡ることが分かった。

記憶パターンに相関が入る場合、記憶パターンが 3 つまでは連続アトラクタが存在する。しかし、記憶パターンが 4 つ以上になると点アトラクタに変化することが分かった。ただし、完全に独立な点アトラクタではなく、記憶パターンを相互につなぐ道筋(連続アト

ラクタが存在していた道筋)においては、記憶パターンを想起している場合よりも少しだけエネルギーは高くなるものの、溝構造を維持していることが分かった。また、記憶パターンが無相関でも記憶パターンが大幅に増えると自己平均性の消滅により、連続アトラクタが失われ、点アトラクタとなることが分かった。これらのように連続アトラクタが失われた場合には、記憶パターンにフリップノイズを入れてやると、連続アトラクタが回復することもわかった。

XY スピンは、Ising スピンよりも、個々のスピンの位相を持たせられるためスパイクを出す神経細胞の性質に近い素子と言える。こうしたよりリアルな拡張によって、連続アトラクタが現れることはとても興味深い。そこで、更に、XY スピンを位相振動子へ拡張することとした。位相振動子には各素子に異なる固有振動数を持たせられ、よりリアルな神経細胞の性質を持たせられることになる。構成素子を位相振動子に拡張した場合の解の性質も調べた結果、やはり連続アトラクタと考えられる状態が現れることが分かった。

XY スピン系と位相振動子系における Hopfield モデル性質を比較したところ、相転移温度などが、ある係数倍違うのみであることが分かった。位相振動子系は、エネルギーを持たないので解析が非常に困難であるが、XY スピン系の解の性質から、位相振動子系の解の性質が推測できることが分かった。この関係の発表論文は、JPSJ 2016 年 2 月号の Most Downloaded Top 20 Articles に選ばれた。

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 3 件)

Tatsuya Uezu, Tomoyuki Kimoto, Shuji Kiyokawa, Masato Okada, Correspondence between Phase Oscillator Network and Classical XY Model with the Same Infinite-Range Interaction in Statics, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.84 No.3, pp.033001-1 ~ pp.033001-5 (2015)

Tomoyuki Kimoto, Tatsuya Uezu, Masato Okada, Continuous attractor that appears with auto-associative memory model extended to XY spin system, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.82 No.12, pp.124002-1 ~ pp.124002-8 (2013)

Tatsuya Uezu, Tomoyuki Kimoto, Masato Okada, Analysis of a solvable model of a phase oscillator network on a circle with

infinite-range Mexican-hat-type interaction, 査読有, Phys. Rev. E 88, 032918-1 ~ 032918-20 (2013)

〔学会発表〕(計 13 件)

吉田梨紗, 上江洌達也, 木本智幸, 連想記憶型相互作用を有する古典 XY モデルの連続解の存在と安定性, 日本物理学会講演概要集, 第 71 巻第 1 号, 第 71 回年次大会, 22aBT-12 (2016.3.22), 東北学院大学

木本智幸, 橋本知奈実, 上江洌達也, 反学習によるホップフィールドモデルの混合状態の不安定化-有限個の相関パターンと無限個の無相関パターンを学習した場合-, 日本物理学会講演概要集, 第 71 巻第 1 号, 第 71 回年次大会, 21pBS-2 (2016.3.21), 東北学院大学

竹本亮令, 木本智幸, 記憶パターン間相関と学習則に構造を持つ連想記憶モデル, 第 14 回電子情報系高専フォーラム論文集, p.101-104, (2015.11.14), 熊本高専

佐藤豊, 木本智幸, 高階 SOM を用いた 3 次元フレームワークの補間像の生成, 第 14 回電子情報系高専フォーラム論文集, p.97-100, (2015.11.14), 熊本高専

吉田梨紗, 木本智幸, 岡田真人, 上江洌達也, 連想記憶型相互作用を有する古典 XY モデルの連続解の安定性解析, 日本物理学会講演概要集, 第 70 巻第 1 号, 第 70 回年次大会, 22pPSB-34 (2015.3.22), 早稲田大学

木本智幸, 上江洌達也, 岡田真人, 相関を持つ記憶パターンを学習した連想記憶モデルの安定解に反学習が及ぼす影響, 日本物理学会講演概要集, 第 70 巻第 1 号, 第 70 回年次大会, 22aBL-3 (2015.3.22), 早稲田大学

上江洌達也, 清川修二, 木本智幸, 岡田真人, 同一の相互作用を有する位相振動子系と古典 XY モデルの解の対応, 日本物理学会講演概要集, 第 69 巻第 2 号第 2 分冊, 8aAY-7, p.131 (2014.9.8), 中部大学

田尻華奈, 清川修二, 木本智幸, 岡田真人, 上江洌達也, 連想記憶型相互作用を有する位相振動子系の周期解と対応する古典 XY モデルの連続解の関係, 日本物理学会講演概要集, 第 69 巻第 1 号第 2 分冊, 30aPS-39, p.368 (2014.3.30), 東海大学

吉田梨紗, 木本智幸, 岡田真人, 上江洌達也, 連想記憶型相互作用を有する古典 XY モデルの連続解の導出とその安定性解析, 日本物理学会講演概要集, 第 69 巻第 1 号第 2 分冊,

30aPS-38, p.368 (2014.3.30), 東海大学

上江洩達也、清川修二、木本智幸、岡田真人、同一の相互作用を有する位相振動子系と古典 XY モデルの解の対応、日本物理学会講演概要集, 第 6 9 巻第 1 号第 2 分冊, 28aAR-11, p.322 (2014.3.28), 東海大学

木本智幸、上江洩達也、岡田真人、学習則に構造を持つ XY スピンで構成された連想記憶モデルの安定解解析、日本物理学会講演概要集, 第 6 9 巻第 1 号第 2 分冊, 27aAJ-4, p.287 (2014.3.27), 東海大学

上江洩達也、木本智幸、岡田真人、位相振動子系と古典 XY モデルの対応関係について、日本物理学会講演概要集, 第 6 8 巻第 2 号第 2 分冊, 27aKG-11, p.388 (2013.9.27), 徳島大学

Tatsuya Uezu, Tomoyuki Kimoto, Masato Okada, Correspondence between Oscillator Network and Classical XY Model, Statphys25 : 25'th IUPAP International Conference on Statistical Physics, PP4-10-70, Seoul National University, Seoul, Korea, (2013.7.26), (ソウル, 韓国)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木本 智幸 (KIMOTO TOMOYUKI)
大分工業高等専門学校・電気電子工学科・教授
研究者番号：3 0 2 5 9 9 7 3

(2) 研究分担者

上江洩 達也 (UEZU TATSUYA)
奈良女子大学・大学院人間文化研究科・教授
研究者番号：1 0 1 6 0 1 6 0

(3) 連携研究者

なし
研究者番号：