

	ごうこ	まなぶ	
氏名	郷古	学	
授与学位	博士	(工学)	
学位授与年月日	平成18年	9月	13日
学位授与の根拠法規	学位規則	第4条	第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科	(博士課程)	電気・通信工学専攻
学位論文題目	記憶と予測を用いた学習型知識情報処理システムに関する研究		
指導教員	東北大学教授	阿曾 弘具	
論文審査委員	主査 東北大学教授	阿曾 弘具	東北大学教授 吉澤 誠
		東北大学教授	中尾 光之 東北大学助教授 大町 真一郎

論文内容要旨

第1章 序論

知識情報処理システムとは、人間の知的機能を形式化して計算機上に実現することにより、部分的、もしくは総合的に人間の知的機能を模擬するシステムの総称である。システムが動作する上で必要となる知識の多くを設計者が予め定義する、固定的な知識組み込み型のシステムでは、システムが動作する環境が複雑になるにつれて、設計者の負担は増大する。また、環境の変化への追従も困難である。そこで近年、環境への適応を目指したシステムとして、周囲の環境に応じて、自律的に学習し知識を獲得する、学習型の知識情報処理システムの研究が盛んに行われている。しかし、知識をどのように表現するか、環境の変化をどのように検出し、利用するかというところに多くの考え方があり、解決すべき課題がある。本論文では、学習により知識を自律的に獲得する知識情報処理システムの構築を目指し、これらの原理的課題を解決することを目的とする。

人間の知的動作は、訓練により形成された記憶を次々と呼び起こし、実際の状況がどのように変化するかを予測して行動することで実現していると考えられている。このような、物事の実行手順のように、状態遷移に関する知識は、人間の持つ知識の中でも、手続き的知識と呼ばれている。本研究では、手続き的知識を環境における観測パターン時系列とみなし、パターンの認識とそれらの予測を学習により実現するモデルを考案すると共に、それを用いた知識情報処理システムとして、モジュール構造システムを提案し、有効性の検証する。

第 2 章 記憶容量の制限を考慮した逐次学習型時系列予測モデル

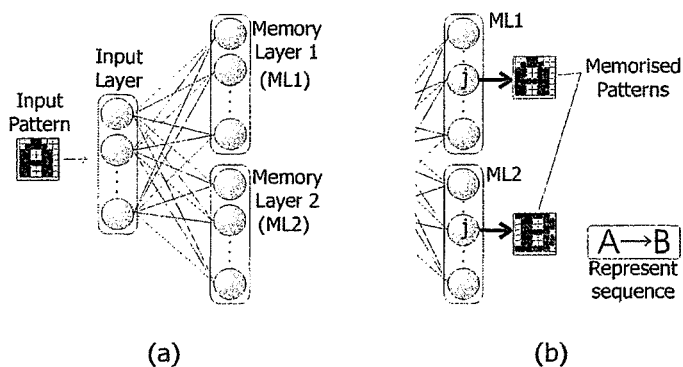


図 1:提案モデルの構造(a)と, 各層の記憶パターン(b)

逐次学習型の記憶モデルは, 入力されるパターンを常に学習し続けるが, 実際にはモデルが記憶可能なパターンの数(記憶容量)は有限であるため, 事前に決められた記憶容量の数を上回るパターンが入力された場合には, それらのパターンを学習することができない. 本章では, 従来の自己連想記憶モデルを逐次学習を行うものに拡張し, さらに予測機能を加えて, 逐次学習型時系列予測モデルを考案した. モデルは忘却機構などを導入することで, 環境の変化に対応し, 記憶容量を超えるパターンが入力される場合には, 角度しきい値, 信頼度の機構により, 入力頻度の高いパターンから優先的に記憶を形成させることで, 記憶容量の制限の問題を解決している. 本提案モデルは複数のパターンを要素とする決定的単純マルコフで表現される時系列が学習可能である.

本章で提案するモデル(図 1(a))は自己連想記憶モデルを構成要素とし, 教師なし学習により入力パターンを記憶及び想起することが可能である. モデルは 2 つの記憶層を持ち, 記憶層 1 では入力パターンに対応するパターンを, 記憶層 2 では, 入力パターンの次に入力されるパターンの記憶が形成される. 図 1(b)は, A, B という 2 つのパターンを交互に入力し学習した場合のモデルに対して, パターン A を入力した場合の出力である. 記憶層 1 では A を出力(認識)し記憶層 2 では次に入力されるパターン B が出力(予測)されている.

計算機実験として, 左に示す全 8 パターンからなる 3 種類の時系列データを用い, これらを記憶容量 3~5(<8:全入力パターン数)のモデルに対してランダムに入力し, 学習の様子を確認した. 学習の結果, モデルは入力頻度の高い A, D, E の 3 つのパターン(図中網掛)と, それらの遷移 A→D→E を記憶可能であることを確認した.

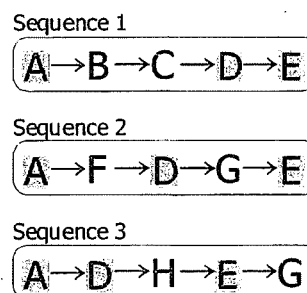


図 2:実験に用いた時系列データ

第3章 適応的逐次学習ネットワーク

2章で提案したモデルは逐次学習の問題点である、記憶容量制限下における学習を実現している。しかし、予測機能としては、決定的単純マルコフで表現される時系列の予測しか実現することができない。

本章ではこの問題を解決するため、時系列の履歴情報を状態ベクトルという形で表現し、3層パーセプトロンにより学習する方法を提案した(文脈ネットワーク)。図3は文脈ネットワークが、決定的 N 重マルコフ系列(学習課題)を学習するのに要した学習回数と、状態ベクトルを形作る減衰定数(α)の関係を示したもので、 N の値に応じて、最適な α の値があることが分かった。

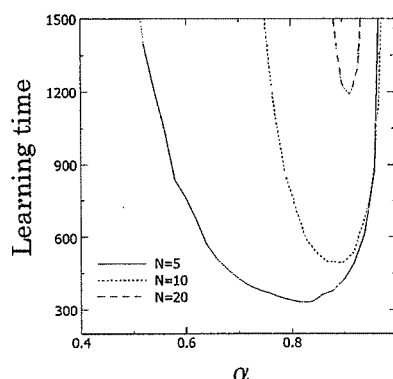


図3:文脈ネットワークの学習曲線

同様の課題を従来法の一つであるリカレントニューラルネットワーク(RNN)との比較実験を行ったところ、文脈ネットワークの方が速やかに学習が進むことを確認した。

次に、文脈ネットワークと自己連想記憶モデルを統合し、文脈情報(過去の入力系列の情報)に依存した予測を実現するモデルとして、決定的 N 重マルコフで表現される時系列の予測が可能な、適応的逐次学習ネットワーク(Adaptive and Sequential Learning Network, 以下 ASLN)を提案した(図4)。

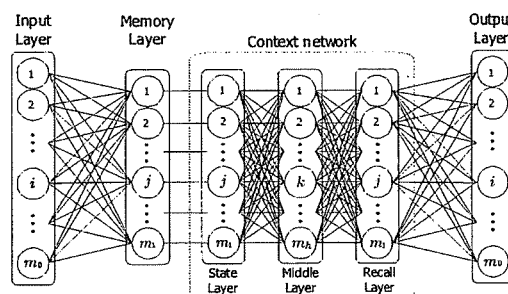


図4: Adaptive and Sequential Learning Network

ASLN を用いた計算機実験を行い、同一のネットワーク構造で異なる文脈長(N)を持つ時系列データの学習が可能であることを示した。また手書きの数字列の学習課題により、ばらつきのある入力パターンを用いて複数の時系列の学習実験を行った。図5は2つの数字列(13071425621と13003624537)を学習させたときの想起結果である。各数字列の最初の3桁は共通である。想起時に、3桁目の0が想起されたときに、7もしくは0を外部から入力することで、それぞれの系列を想起できることを確認した。

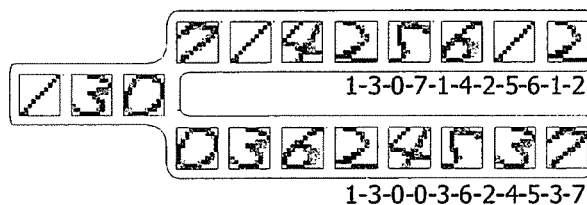


図5:ASLN を用いた手書き数字列の想起結果

第4章 適応的逐次学習ネットワークを用いたモジュール構造システム

本章では、知識情報処理システムとして、モジュール構造を有する学習型システムを提案した。提案システムは、基本構成要素に第3章で提案した適応的逐次学習ネットワーク(ASLN)を用い、入力空間の分節化のための機能を付加し、各分節化領域毎に制御を担うモジュールを獲得する。学習後のシステムは、入力情報及び予測情報を基にモジュールを切り替えることで制御を行う。提案システムは、入力情報のみで適切なモジュール選択が困難な場合に、予測の情報を使用することで適切に対応できるように構成した。

提案システムをロボットナビゲーションに適用して、計算機実験を行い学習能力の検証を行った。

図6は、軌道上で観測される入力パターンを学習後のモデルに対して入

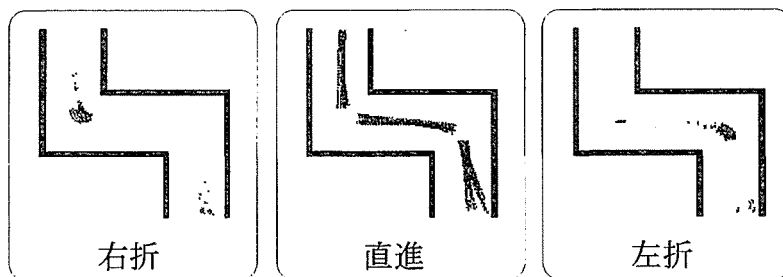


図6:分節化

力し、選択されたモジュール毎にクラス分けしてプロットしたものである。ロボットのセンサからの入力情報を、直進、右折、左折の状況へと分節化していることが分かる。

また、実際にナビゲーションを行った際の達成率(Achievement Rate)を図7に示す。横軸の d はモジュール選択の際に文脈情報を考慮する割合(Prediction Ratio)を決定するパラメータであり、1に近いほど文脈より入力情報を優先したモジュール選択を行う。 $d = 0.93$ 付近で、予測結果を活用する文脈依存的なモジュール選択が有効に働き、タスクをよく達成することを確認した(最大達成率 81%)。比較のため、これまでに提案された学習型ファジィ制御器のタスク達成率を求めたが、最大で 44%であり、予測情報を用いる提案システムの方が高い達成率を得られることを確認した。

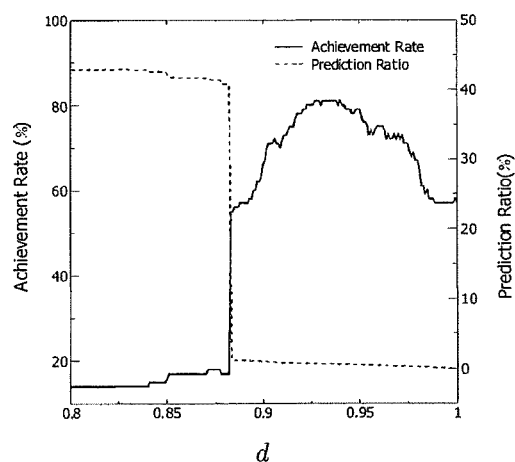


図7:タスク達成率と予測割合

第5章 結論

本章では、各章で得られた成果と今後の課題を述べている。

論文審査結果の要旨

知識情報処理システムは、固定的な知識を組み込む知識利用型システムから自律的に学習し知識を獲得していく学習型システムに発展してきている。自律学習型の知識情報処理システムは、ロボットの知的動作を実現するための基礎となるものであり、環境の中に存在し、その環境の変化に応じて自らの知識を修正していく能力をもつものである。知識には手続き的知識と宣言的知識があるが、ロボットなどでは手続き的知識の獲得と獲得した知識に応じた適切な行動の決定が要請される。著者は、手続き的知識を環境における観測パターン時系列が形作る規則性とみなし、各観測パターンの記憶とそれらの遷移情報を記憶することで、認識と予測を実現する逐次学習型ネットワークモデルを考案すると共に、それを用いたモジュール構造システムを提案し、その有効性を検証して、環境に適應する学習型システムの基本原理の重要な一端を明らかにした。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、記憶容量制限下で逐次学習により認識と予測を実現するネットワーク機構を考案し、それに基づく逐次学習型時系列予測モデルを提案している。記憶容量以上の入力パターンがある場合は高頻度のものを優先的に記憶させ、また忘却の機構で低頻度パターンが記憶から削除されていくという形で環境の変化に適應させている。現入力パターンとその次に来るはずのパターンとの関係が直前入力パターンと現入力パターンとの関係に一致することに着目し、記憶パラメータを導入して将来予測パターンを学習させている。すなわち、提案モデルが決定的単純マルコフの時系列を記憶し予測する能力をもつことを実証している。

第3章では、長さ1以上の履歴を状態表現する方法を考案し、決定的多重マルコフの時系列を記憶し予測できる適應的逐次学習ネットワーク(ASLN)モデルを提案している。自己連想記憶モデルと文脈ネットワークからなり、時系列の履歴を状態ベクトルとして表現することにより、長期履歴に基づく予測を実現する逐次学習を文脈ネットワークで実現している。ASLNモデルを計算機上に構築し、状態ベクトルを形作る減衰定数の最適性を評価し、手書き数字列などのデータを用いて実験することで、その性能を実証している。これは、優れた成果である。

第4章では、知識情報処理システムとして出力モジュールを有する学習型システムを提案している。ASLNを用いて入力の分節化とその時点で想定される入力の予測とを実現して、それらを統合するモジュール選択機構を構築し、分節化領域に応じた出力モジュールを学習により獲得させるものである。このシステムを、少ないセンサ入力をもとに折れ曲がった経路を通過するロボットのナビゲーションに応用して、経路状況に応じて適切に舵をきっていくことを検証し、提案システムの有効性を実証した。これは重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、時系列の認識と予測を実現するネットワークモデルを提案し、記憶容量制限下で任意の環境に対応できかつ長期履歴に基づく予測能力を持つことを示すと共に、それをモジュール構造学習型システムに適用してロボットナビゲーションシステムに応用し、その有効性を実証したもので、知識処理工学及び情報通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。