拡張化されたファジー認知マップ

非会員 萩原 将文 (慶應義塾大)

Extended Fuzzy Cognitive Maps

Masafumi Hagiwara, Non-member (Keio University)

Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) have been proposed to represent causal reasoning by numeric processing. FCMs have the following features:

- (1) They store domain knowledge in nodes and directional connections.
- (2) They graphically represent uncertain causal reasoning.
- (3) Their matrix representations allow causal inferences to be made as feedback associative memory recollections.

Many researchers have studied FCMs and applied them to various fields. However, there are some shortcomings concerned with knowledge representation in the conventional FCMs. In this paper, we propose Extended Fuzzy Cognitive Maps (E-FCMs) to represent causal relationships more naturally. The features of the E-FCMs are the following:

- (1) They can deal with nonlinear causal relationships.
- (2) They have time delay weights.
- (3) They have conditional weights.

Computer simulation results indicate the effectiveness of the E-FCMs.

キーワード：ニューラルネットワーク，ファジー認知マップ，認知マップ，意思決定

1. ま え が き

知識表現や推論，意思決定などは，人工知能 (Artificial Intelligence; AI) の分野などにおいて大変重要かつ困難な問題である⁽¹⁾。エキスパートシステムに代表される従来の AI システムでは，知識は信号の形で扱われている。このような従来の AI システムでは，構造化された知識を表現することは，例えばルールやセマンティックネットなどを用いれば比較的容易であった。しかし，記号処理は工学や物理学など伝統的に行われている数学的な解析との整合性に欠けていた。

ニューラルネットワークは，人間の脳構造を模擬して柔らかな情報処理を行おうとするものである。その特徴として，理論とアルゴリズムに基づいた数値処理であることがあげられよう⁽²⁾。ニューラルネットワークは，一時誇大に扱われた時期はあったものの，着実にその可能性を発揮している。McClelland による過去時制学習のモデル⁽³⁾，Gorman と Sejnowski によるソナー音の識別⁽⁴⁾，そして Waibel らによる音韻認識のための TDNN (Time Delay Neural Network) の提案⁽⁵⁾など枚挙にいとまがない。しかしながらニューラルネットワークにも欠点がないわけ

はない。一般的に学習に長い時間がかかること以外にも，構造化された知識を直接ネットワークに表現する効果的な方法がなかった。

一方，有向グラフを用いて政治・社会現象を動的に解析しようとする研究が，1976 年に Axelrod が提案した認知マップ (Cognitive Maps; CM) から始まった⁽⁶⁾。その後 CM は，京都大学の樫木，岩井らにより意思決定問題への適用⁽⁷⁾⁽⁸⁾，社会深層構造把握への適用⁽⁹⁾などが行われた。

海外では，Kosko が認知マップでの有向線分の値にアナログ値を用い，これをファジー認知マップ (Fuzzy Cognitive Maps; FCM) と名付けて提案した⁽¹⁰⁾。その後，Taber らは FCM を用いてエキスパートの信頼性を推定する方法を⁽¹¹⁾，Zhang らは，FCM を用いた POOL 2⁽¹²⁾，D-POOL⁽¹³⁾ という意思決定システムを提案している。後藤，山口は汚水処理施設の水位上昇予測に用いている⁽¹⁴⁾。基本的な FCM は以下のような特徴を有している。

(1) FCM は，ノードと有向線分によって知識を表現する。従って，FCM は一種のニューラルネットワークとも考えられる。

(2) 各ノードには概念が，ノード間の有向線分には因

果関係が割り当てられる。

(3) 因果関係に基づくあいまいな推論は、各ノードの活性度やその状態遷移によってグラフィカルに表現できる。

(4) 各ノード間の関係は行列によって簡潔に表現できる。

(5) 複数の専門家による FCM を統合することが可能である。つまり、知識の統合が容易である。

(6) システムが非常にシンプルであること。

FCM は動的システムであり、そのリミットサイクルや各ノードの発火パターンが FCM による推論を表す。更に、FCM は従来のセマンティックネットワーク⁽¹⁾のような木構造による知識表現を越え、双方向結合をもつネットワークによる知識表現が可能となっている。このように FCM は従来の AI システムにない多くの特色、利点を有している。しかし一方、以下のような問題点もあった。

(1) 線形な因果関係しか扱えない：FCM の有向線分は単純な数値であった。従って、対応する因果関係は線形でなければならない。

(2) 因果関係における時間概念の欠如：様々な因果関係には大きな時間遅延を有するものもあり、これらの違いが陽に考慮されていない。

(3) 独立した因果関係しか扱えない：従属関係にある因果関係を扱えない。例えば、エキスパートシステムで通常用いられる If-then 型のルールにおける “and” を用いた表現⁽¹⁵⁾などは扱えない。

本論文では、以上の三つの問題点を改善した拡張型ファジー認知マップ (Extended Fuzzy Cognitive Maps; E-FCM)⁽¹⁶⁾ を提案する。E-FCM の特長として、非線形な

因果関係表現、時間経過の考慮、条件付き因果関係表現の三つがあげられる。このようにして表現力の高められたファジー認知マップは、より現実に近くなったモデルといえよう。まず、第 2 章で従来型ファジー認知マップを簡単に説明する。第 3 章では、拡張型ファジー認知マップ (Extended Fuzzy Cognitive Maps; E-FCM) を提案する。そして、第 4 章で計算機シミュレーションによってその有効性を示す。

2. 従来型ファジー認知マップ

本章では、従来型ファジー認知マップ (Fuzzy Cognitive Maps; FCM) の構成法とその動作を簡単に説明する。FCM は、フィードバックをもつファジー符号付き有向グラフである。各エキスパートは、ノードに概念を割り当て、そして因果関係に基づき自由に有向線分を設定することができる。複数の専門家による FCM は容易に行列を用いて統合することができ、信頼性のより高い知識システムを構築することができる⁽²⁾。

図 1 に公衆衛生の管理者のための FCM の例を示す⁽¹²⁾。この場合、 C_1 から C_7 まで七つの概念 (ノード) がある。例えば、ある都市の人口 (C_1) が増えれば、近代化 (C_3) が進み、また同時に地域内のゴミ (C_4) も増えるというものである。それらの程度はそれぞれ、 $+0.6 (C_1 \rightarrow C_3)$ 、 $+0.9 (C_1 \rightarrow C_4)$ である。このような因果関係がここでは全部で 10 あり、対応するノード間を有向線分で結んでいる。FCM におけるノードは、 C_1 ノード (人口) のような数量的なものから、 C_3 (近代化) のようにシンボリックなものまで広く考えている。このようなファジー因果関係は行列を用いて次式のように表現することができる。

図 1 ファジー認知マップ (FCM) の例
Fig. 1. An example of a Fuzzy Cognitive Map (FCM).

$$E = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.9 & -0.9 \\ -0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

なお、本論文では各ノードの関数は簡単のため、[0, 1] 間が線形なソフトリミット関数を用いている。

FCM は行列で表現できるので、各エキスパートが異なったサイズの FCM を描いても、それらを統合することができる。具体的に説明すると以下になる。まず各エキスパートの FCM 行列をそれぞれ $E_1, E_2, \dots, E_k$ とする。次に、異なった概念（ノード）の数を求める。この数を n とすると、各 FCM 行列を $n \times n$ のサイズに統一する。これらを $F_1, F_2, \dots, F_k$ とすると、求める統合された FCM 行列 F は次のように表される。

$$F = \sum_{i=1}^k w_i F_i \quad (2)$$

ここで、 k : エキスパート数、 w_i : エキスパート i の信頼度

3. 拡張型ファジー認知マップ

本章では、拡張型ファジー認知マップ(Extended Fuzzy Cognitive Maps; E-FCM) の提案動機と、その動作を説明する。

第 1 章でも述べたように、従来型 FCM には以下のような三つの問題点があった。

(1) 線形のみ因果関係 FCM の有向線分は単純な数値であった。従って各因果関係は、ある都市への人口移動量とその都市の人口増加量のような線形関係でなければならぬ[図 2 (a) 参照]。

(2) 因果関係における時間概念の欠如 様々な因果関係には、相対的に大きな時間遅延を有するものもあり、これらの影響が陽に考慮されていない。

(3) 独立した因果関係のみの扱い 従属関係にある因果関係を扱えない。例えば、エキスパートシステムで通常よく用いられる次のような複合 If~then ルール、

if X_{1i} and X_{2i} and ... and X_{ni} then Y_{1i}

などは扱えない。

まず、(1) 項に関して、前章での例を再び取り上げてみる。

If (the number of people in a city increases)
then (modernization of the city advances) in proportion to 0.6

これは、ある都市の人口 (C_1) が増えれば近代化 (C_3) が進む (比例定数 0.6)、という因果関係である。しかしよく考えてみると、人口が増えたからといって必ずしもその人口に比例して近代化が進むものではない。異常な人口集中はかえって社会的なひずみをもたらすことは周知の事実であろう。従って、このような場合には、あまり増えすぎるとかえって近代化の妨げとなるということを考慮して、図 2 (b) に示す非線形なカーブで因果関係を表現したほうがより適切であろう。

次に、(2) 項の因果関係における時間概念の欠如の改善策を述べる。図 1 の例で、衛生設備の改善 (C_5) がなされれば、1,000 人当たりの病気の数 (C_6) が減少する、

if (sanitation facilities are improved)
then (the number of diseases per 1,000 residents decreases)

という因果関係があった。ここでもよく考えてみると、衛生設備を改善したからといって、即座に病人の数が減少するものではない。他の因果関係、例えば前例 ($C_2 \rightarrow C_1$) に比べると、そこには大きな時間遅延 delay_{ss}が存在すると考えるのが自然である。

最後に、(3) 項の独立した因果関係のみの扱いに関しての改善策を述べる。さきほどからの図 1 の例で、近代化 (C_3) が進んでも、もし政府が何らかの方法でその都市への人口流入を統制したとすると、その都市への人口流入量 (C_2) は低くなるであろう。このような場合は、次のような “and” を用いたルール形式で記述できる。

図 2 線形な因果関係と非線形な因果関係の例
Fig. 2. Examples of linear and nonlinear causal relationships.

図 3 拡張型ファジー認知マップ(E-FCM)の例(図 1 の改善例)
Fig. 3. An example of a simple Extended Fuzzy Cognitive Map (E-FCM).

if (modernization of a city advances)
and (the government restricts migration)
then (migration into the country increases)
in proportion to x

従ってこのような場合、因果関係の関数を他の条件によって変わるものになければ実際の現象とは違ったものになってしまうであろう。一例を図 3 の (C_3 , $C_8 \rightarrow C_2$) の部分に示す。

以上の三つの改善点を考慮すると、時刻 t におけるノード j への入力値は時間遅延を考慮して、

$$\text{net}_j(t) = \sum_{i=1}^n w_{ji} \{ C_i(t - \text{delay}_{ji}) \} C_i(t - \text{delay}_{ji}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように表される。ここで、 $w_{ji}(t)$ は時刻 t におけるノード i からノード j への重み関数、 $C_i(t)$ は時刻 t におけるノード i の活性度、 delay_{ji} はノード i からノード j への時間遅延である。

なお、各ノードの出力関数は、従来型 FCM と同様に、各ノードへの入力値を $[0, 1]$ に変換する単調増加の非線形関数 (シグモイド関数や逆正接関数など) である。

図 3 は、以上の三つの改善点を考慮して図 1 の FCM を改良した拡張型 FCM の一例を示している。

4. コンピュータシミュレーション

本章では、拡張型ファジー認知マップ(Extend Fuzzy Cognitive Maps; E-FCM)の有効性を示すため、コンピュータシミュレーションにより従来型 FCM との特性比較を行う。

例題としては、CM (Cognitive Maps) や FCM の例題

としてよく用いられている図 1 に示した公衆衛生の管理者のために FCM の例⁽¹²⁾を用いる。

従来型 FCM としては図 1 に示したものを、拡張型 E-FCM としては図 3 に示したものをを用いた。図 3 中で、破線で囲まれている 4 箇所が変更箇所である。それらは以下のとおりである。

- (1) 非線形な因果関係表現: $C_1 \rightarrow C_3$ と $C_1 \rightarrow C_4$
- (2) 時間経過: $C_5 \rightarrow C_6$ の間に、1 サンプルの時間遅延の挿入
- (3) 条件付因果関係表現: $C_3, C_8 \rightarrow C_2$ (次のように、 C_8 からの入力があった場合は、 $C_3 \rightarrow C_2$ の重みが、 $0.7 \rightarrow 0.7/5$ に減少する

If (the government controls migration C_8)
then (if (modernization of the city advances C_3)
then (migration into the city increases C_2)
in proportion to $0.7/5$ (not 0.7)
else (if (modernization of the city advances C_3)
then (migration into the city increases C_2)
in proportion to 0.7)

図 1 において、修正すべき、あるいは修正できる部分は以上の 4 箇所より多い。しかしここでは、簡単のためと、修正による影響を明らかにするためにできるだけ修正箇所を少なくした。

図 3 ~ 図 5 に、それぞれ C_1 (ある都市の人口)、 C_3 (近代化)、 C_4 (一定地域内のごみ) ノードの活性度変化のようすを示す。図中、“Nonlinear weights”、“Time delay in weight”、“Conditional weight” は、それぞれ一つの効果のみを考慮した場合、“All” は三つすべてを考慮した場合

図 4 C_1 (ある都市の人口) ノードの活性度の変化
Fig. 4. C_1 (# of people in a city) node activation.

図 5 C_3 (近代化) ノードの活性度の変化
Fig. 5. C_3 (modernization) node activation.

図 6 C_4 (一定地域内のごみ) ノードの活性度の変化
Fig. 6. C_4 (garbage per area) node activation.

の結果を示している。これらについての配慮が全くない従来型 FCM と比べて、いずれの場合もかなり異なった活性度変化を示していることがわかる。例えば、 C_3 (近代化) のノードでは、三つの改善点の内、一つを考慮しただけで

活性度の飽和が 3 から 4 単位時間遅れ、すべて考慮した場合はその遅れは 6 単位時間にも及ぶことがわかる。

5. む す び

本論文では、知識表現や推論、意思決定などに用いることができ、従来の AI にない数々の特長を有するファジー認知マップ (Fuzzy Cognitive Maps; FCM) を扱った。まず FCM の大きな問題点、すなわち、線形な因果関係しか扱えないこと、因果関係における時間概念の欠如、独立した因果関係しか扱えないことを明らかにした。そして、それらを改善した拡張型ファジー認知マップ (Extended Fuzzy Cognitive Maps; E-FCM) を提案した。E-FCM の特長として、非線形な因果関係表現、時間経過の考慮、条件付き因果関係表現の三つがあげられる。このようにして FCM の表現力が高められ、より現実に近いモデルとなった。計算機シミュレーションによりその有効性を示した。

FCM は、知識の表現が比較的容易であり、更に従来の知識処理システムでは非常に困難であった複数のエキスパートによる知識の統合が可能であるため、今後の知識処理技術として大きな可能性を有している。その応用範囲として、いわゆる AI 的な知識表現や推論、意思決定、コンピュータビジョン、文章理解以外にも、認知心理学、経済学や政治学などの社会科学など非常に広い分野がある。今後の課題として、図 2 のような因果関係を表す関数の学習方法の確立、および大規模なアプリケーションへの適用があげられる。

本研究は、著者がアメリカ Stanford 大学の Rumelhart 教授の研究室に訪問研究員として滞在していたときに行われたものである。貴重なアドバイスを下さった同教授、ならびに日ごろお世話になる慶應義塾大学 中川正雄教授に感謝する。

(平成 5 年 7 月 26 日受付, 同 5 年 12 月 24 日再受付)

文 献

- (1) P. H. Winston: Artificial Intelligence (3rd Ed.) (1992) Addison-Wesley
- (2) B. Kosko: Neural networks and fuzzy system (1991) Prentice Hall
- (3) D. E. Rumelhart, J. L. McClelland & the PDP Research Group: Parallel Distributed Processing (1986) MIT Press
- (4) R. P. Gorman & T. J. Sejnowski: "Analysis of hidden units in a layered network trained to classify sonar targets", *Neural Networks*, 1, 75 (1988)
- (5) A. Waibel, T. Hanazawa, G. Hinton, K. Shikano & K. Lang: "Phoneme recognition using time-delay neural networks", *IEEE Trans. Acoustics, Speech, & Signal Processing*, 37, 328 (1989)
- (6) R. Axelrod: Structure of Decision (1976) Princeton Univ. Press
- (7) 榎木・岩井・片井: 「因果関係知識に基づく意思決定支援と波及効果の定量化および決定者の主観的判断基準の導入」, 計測自動制御学論, 22, 629 (昭 61-6)
- (8) K. Nakamura, S. Iwai & T. Sawaragi: "Decision Support using Causation Knowledge Base", *IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics*, SMC-12, No. 6 (1982)

-
- (9) 榎木・岩井・片井：「社会現象の深層構造把握のため因果連鎖知識の多重構造化」，計測自動制御学論，23，977（昭62-9）
 - (10) B. Kosko："Adaptive inference in fuzzy knowledge networks"，*Proc. First International Conference Neural Networks*, 2, 261 (1987)
 - (11) W. R. Taber & M. A. Siegel："Estimation of expert weights using fuzzy cognitive maps"，*Proc. First International Conference Neural Networks*, 2, 319 (1987)
 - (12) W. R. Zhang, S. S. Chen & J. C. Bezdek："Pool2： A Generic System for Cognitive Map Development and Decision Analysis"，*IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics*, SMC-19, 1 (1989)
 - (13) W. R. Zhang, S. S. Chen, W. Wang & R. S. King："A Cognitive-Map-Based Approach to the Coordination of Distributed Cooperative Agents"，*ibid.*, SMC-22, 1 (1992)
 - (14) 後藤・山口：「プラント制御からみたファジィ認知モデルの能力」，計測自動制御学会，第12回知識システムシンポジウム，p. 51（平2）
 - (15) 菅野道夫：ファジィ制御（昭63）日刊工業新聞社
 - (16) M. Hagiwara："Extended Fuzzy Cognitive Maps"，*IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, p. 795 (1992-3)

萩原 将文（非会員） 1959年10月29日生。1987年慶應義塾大学大学院博士課程修了。現在，同大学講師。1991年より2年間，アメリカStanford大学訪問研究員。ニューラルネットワーク，ファジーシステムの研究に従事。工学博士。1986年丹羽記念賞，1987年電子情報通信学会学術奨励賞，1990年IEEE論文賞受賞。