

橋梁診断エキスパートシステムにおける 知識獲得と学習手法の改良

Improvement of Knowledge Acquisition and Machine Learning for Bridge Rating Expert System

河村圭
Kei Kawamura
山口大学大学院
Yamaguchi Univ.

宮本文穂
Ayaho Miyamoto
山口大学
Yamaguchi Univ.

中村秀明
Hideaki Nakamura
山口大学
Yamaguchi Univ.

三宅秀明
Hideaki Miyake
山口大学大学院
Yamaguchi Univ.

Abstract The aim of this study is to add a support function of knowledge acquisition to the Concrete Bridge Rating Expert System which is currently under development. By applying the system to actual in-service bridges, it has been verified that this function is effective for the system.

1. はじめに

橋梁の維持管理の基本フローは、「調査・点検」→「診断」→「補修・補強」である。このうち「診断」は、経験豊富な専門技術者の知識あるいは直感にゆだねられる場合が多いが、実際に各種点検結果に基づいて橋梁診断を行える専門技術者の数は非常に少ないのが現状である。そこで本研究室では、専門技術者のかわりに橋梁の劣化診断を行うことができる「橋梁診断エキスパートシステム」（以下、診断システムと略記する）を開発してきた。本研究では、診断システムの実用化のために必要不可欠となる知識獲得支援機能を構築し、さらに学習方法を改良することにより、学習効果を向上させている。また、診断システムを実橋へ適用し、専門家によるアンケート調査結果をもとに、診断結果の妥当性を検証した。

2. 橋梁診断エキスパートシステムの開発

2.1 システムの概要

本研究室において開発されてきた診断システムは、橋梁の維持管理に長年携わってきた専門技術者（以下、専門家と略記する）の橋梁診断における経験的な知識をコンピュータ上に移植し、橋梁諸元、環境条件、交通量、各ひび割れの状態といった橋梁台帳や目視点検結果等から得られた定量的、定性的なデータを入力することにより、橋梁の総合的な耐用性診断を行うシステムである。

2.2 知識ベース¹⁾

著者らは、現在までに専門家の診断過程を診断

プロセス（図1参照）として階層構造化し、これに従った if-then 形式のプロダクションルールを式(1)のように作成している。

$$R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_m \text{ then } y \text{ is } B_i \quad (1)$$

ここで R^i は i 番目のルール、 x_1, \dots, x_m は入力（条件）すなわち点検項目または橋梁諸元項目、 y は出力（結論）すなわち診断項目になる。また A_1, \dots, A_m はファジィ変数、 B_i はクリस्प変数としている。なお、クリस्प変数の値 (0.0~100.0) は、図1に示される下位 GOAL および SUB GOAL の損傷または劣化状態を表しており、次式(2)によって各カテゴリーに分類される。

$$\begin{aligned} 0.0 \leq G' < 12.5 & : \text{danger} \\ 12.5 \leq G' < 37.5 & : \text{slightly danger} \\ 37.5 \leq G' \leq 62.5 & : \text{moderate} \\ 62.5 < G' \leq 87.5 & : \text{slightly safe} \\ 87.5 < G' \leq 100.0 & : \text{safe} \end{aligned} \quad (2)$$

例) if ([豆板の発生状況]=かなり発生) and ([コンクリート欠落部の配筋の状態]=かなり密) then ([鉄筋の間隔] = 0.0 (danger))

2.3 本システムの推論機構²⁾

本システムの推論機構の基本構成は、図2に示すように5層の階層構造ニューラルネットからなる。この5つの層はそれぞれ (A) 層の入力部、(B) 層および (C) 層の前件部、(D) 層のファジィ論理演算部、(E) 層の出力部から成る。入力部 (A) 層のニューロンは、入力された値を次層の (B) 層のニューロンに分配する役目を担っており、ニュー

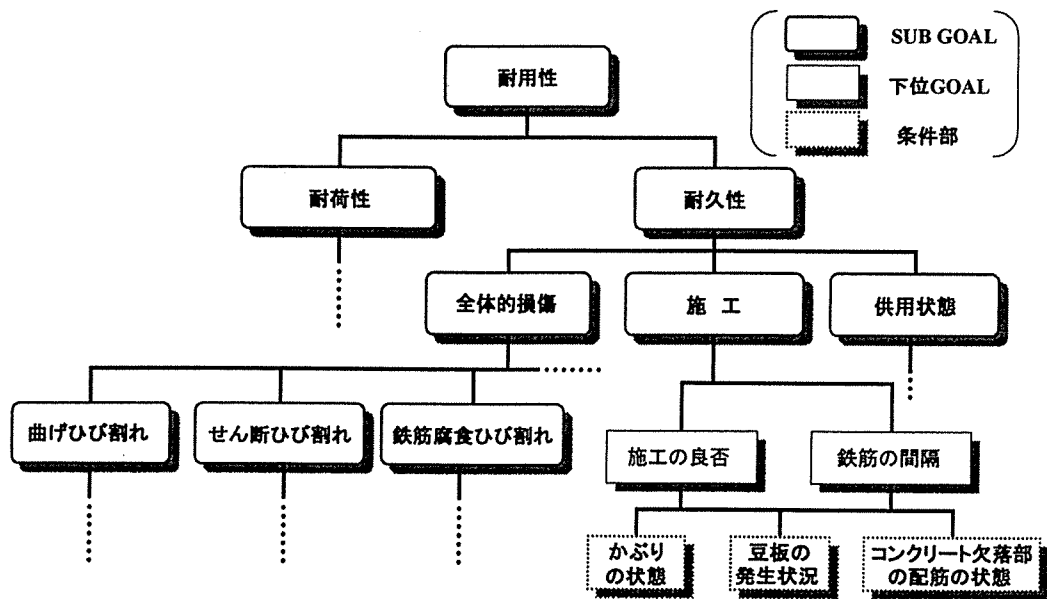


図1 診断プロセス(主桁)の例

ロンの数は、プロダクションルール前件部の入力変数の数に等しい。前件部 (B) 層および (C) 層により、前件部ファジイ命題におけるファジイ集合のメンバーシップ関数を同定する。このように、(A)-(B)-(C)層は、プロダクションルール前件部に存在するファジイ命題に対応している。なお、(C)層のニューロンの数は、前件部ファジイ変数が有するファジイ集合の数に等しい。図2の前件部のように(B)層において、(C)層のニューロンに対して1つのニューロンが結合しているものはメンバーシップ関数の中でも単調増加型あるいは単調減少型の関数を表し、2つのニューロンが結合しているものは疑似台形型のメンバーシップ関数を表す。ファジイ論理演算部(D)層のニューロンは、それぞれルールに対応しておりその数はルール数に等しい。このように、(D)層のニューロンは、対応するルールに記述されている前件部ファジイ命題を表現している(C)層のニューロンと結合する。ここでは、代数積によるファジイ演算処理を行った後、正規化することにより、入力データに対する各ルールの適合度を出力する。出力部(E)層は、(D)層より出力された各ルールに対する適合度とプロダクションルールの後件部クリップ変数の値である(D)層-(E)層間の結合重みを掛け合わせた値の和を診断結果として出力

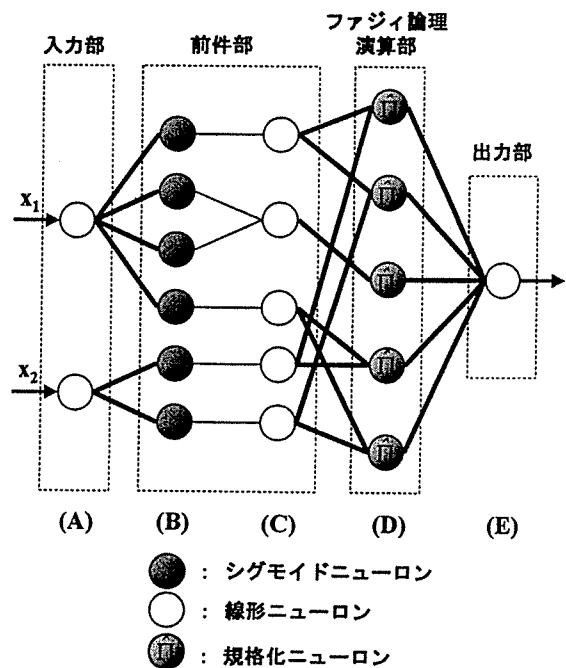


図2 推論機構の構成

する。以上のようにして推論機構を構築している。このように、推論機構が階層構造ニューラルネットより構成されていることから、誤差逆伝播法により容易に学習を行うことができる。また、本研究では専門家へのアンケートにより教師データを作成している。なお、推論機構の構築のために必要となる初期重みやしきい値などのプリワイヤ設定については、文献[1]もしくは文献[2]を参照されたい。

3. 橋梁診断エキスパートシステムの実用化

3. 1 知識獲得支援機能の開発

診断システムは、誤差逆伝播法により学習可能であることから、教師データによる学習後にどのようにルールが更新されているかを確認することが必要となる。そこで階層構造ニューラルネットのニューロン間の重み(w)、しきい値(θ)から知識を抽出することにより、前件部のファジィ変数におけるメンバーシップ関数の形状の変化や診断システムに蓄積されている知識(ルール)とその変更点を提示可能とする知識獲得支援機能の開発を行った。なお、学習を行う重みおよびしきい値はそれぞれ、(A)層-(B)層間の重み、(B)層のしきい値、(C)層-(D)層間の重み、(D)層-(E)層間の重みである。

以下に、学習後の重みおよびしきい値が持つ意味を記述する。(A)層-(B)層間の重みと(B)層のしきい値は、前件部ファジィ集合のメンバーシップ関数の形状を表現するのに用いられていることから、これらの値より学習後のメンバーシップ関数を読み取ることができる。図3に示されるように、学習後の重み(w_{ba})は、メンバーシップ関数の傾きを変化させ、学習後のしきい値(θ)は、左右への軸の移動を表すパラメータである。(C)層-(D)層間の重みの学習では、あるルールに記述されている前件部命題の重要度が変更される。例えば、図4の場合では x と y のどちらの命題を重要視するかがわかり、この場合は $x:y=4:3$ で x の命題が重要であることがわかる。(D)層-(E)層間の重みの学習では、後件部命題が更新される。例えば、学習前の後件部の重み(w_{ed})が80.0であり、学習後の重みが55.0の値になったとする。これを式(2)を用いて各カテゴリーと対応付けると、あるルールの後件部命題がslightly dangerからmoderateに変化したことが分かる。

3. 2 学習率の設定

階層構造ニューラルネットは、誤差逆伝播で学習を行う際、学習率を設定する必要がある。前システム¹⁾の学習率の設定は試行錯誤的に行ったも

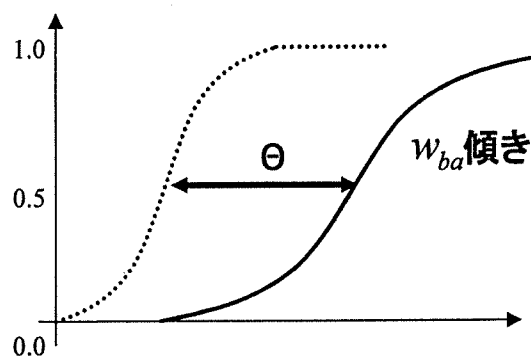


図3 メンバーシップ関数の更新

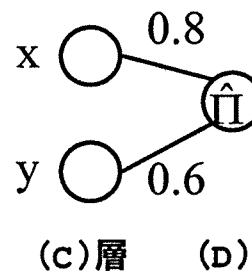


図4 (C)層-(D)層間の重み

のであった。学習によるシステムの信頼性を向上させるためには、最適な学習率を設定する必要がある。そこで本研究では、アニーリングの考えを取り入れた学習率の設定法を適用した。診断システムの階層構造ニューラルネットにおいて学習率は、(A)層-(B)層間の重み、(B)層のしきい値、(C)層-(D)層間の重み、(D)層-(E)層間の重みの4つを設定しなければならない。アニーリングの考えを取り入れた手法では、最初にそれら4つの学習率を大きく設定しておき、学習誤差が大きい場合は徐々に学習率を小さくさせていく。

4. 実橋への適用

4. 1 実橋点検およびアンケート調査

本システムから出力される診断結果の妥当性の検証および学習データ作成のために実橋点検およびアンケート調査を行った。対象橋梁は、山口県内の5橋9スパンである。また、それぞれのスパンに対して専門家には、図1に示される診断プロセスに従って診断して頂いた。表1には、専門家による診断結果の一例を示す。なお、橋梁のスパン番号は、丸囲みの数字で表す。

表1 専門家による診断結果の一例(教師データ)

診断項目	琴影橋②	三明橋①	畑橋①	豊栄橋①
主桁耐荷性	35	30	50	30
主桁耐久性	35	35	40	35
主桁耐用性	35	35	50	35

表2 プリワイヤによる診断結果の一例

診断項目	琴影橋	三明橋	畑橋	豊栄橋
主桁耐荷性	86.7	88.0	90.3	67.5
主桁耐久性	31.6	48.1	83.9	34.0
主桁耐用性	63.9	71.1	91.8	51.0

表3 学習後の診断結果の一例(全標本学習法)

診断項目	琴影橋	三明橋	畑橋	豊栄橋
主桁耐荷性	38.2	30.9	46.2	29.0
主桁耐久性	34.7	36.8	43.5	35.0
主桁耐用性	40.1	36.2	48.2	33.4

4. 2 実橋に対するシステムの適用

表2には、診断システムの学習前(プリワイヤ)における診断結果を示す。これを専門家の診断結果と比較した場合、かなりの誤差が見られる。1つの診断項目あたりを考えると平均35.5pもの誤差が見られた。続いて表3には、全標本学習法³⁾による診断結果を示す。各スパンの診断項目に対して誤差が大幅に減少しており、1つの診断項目当たりの誤差を考えると平均4.8pと小さく、診断結果の信頼性は向上したと言える。続いて、全標本学習法を行ったときに洗練された内部知識を知識獲得支援機能を用いて表示する。ここでは『主桁耐荷性』の診断項目についての例を示す。図3には学習前の前件部メンバーシップ関数、図4には学習後の前件部メンバーシップ関数の出力例を示す。ここで、横軸は0.0が最も悪い状態、1.0が最も良い状態を表している。図3と図4を比べると、学習後では、どの診断項目においてもdangerを表すメンバーシップ関数が右に移動している。このことは、学習によりある程度良い状態を診断するときも、dangerであると考慮する度合いが増えていることを意味している。さらに、学習によって変更された『主桁耐荷性』のプロダクションルールを表4に示す。『主桁耐荷性』において変更されたルールは4つであった。このように学習後のルールは学習前と比べて低く評価されるようになってきていることがわかる。

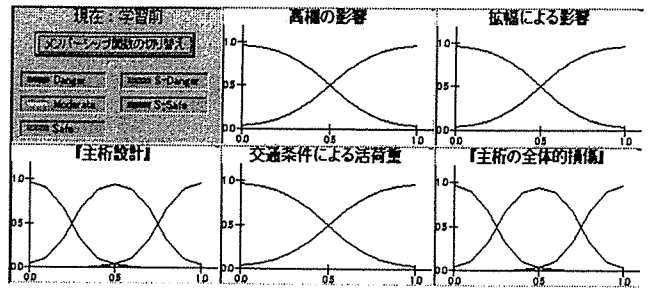


図3 学習前の前件部メンバーシップ関数

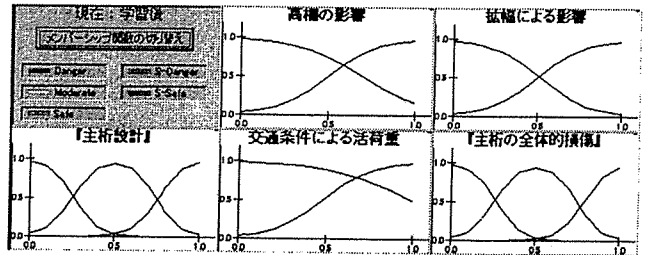


図4 学習後の前件部メンバーシップ関数

表4 学習により変化したプロダクションルール

前件部				後件部		後件部
高欄	主桁設計	交通条件	全体的損傷	学習前		学習後
safe	danger	safe	danger	s_safe	→	s_danger
safe	danger	safe	moderate	s_safe	→	moderate
safe	moderate	safe	danger	s_safe	→	s_danger
safe	moderate	safe	moderate	safe	→	s_safe

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ①学習後のシステムが持つ知識をニューロンの重み、しきい値から読み取り、洗練されたルールの確認が可能な知識獲得支援機能を構築した。
- ②システムを実橋梁に適用し、アンケート結果を基に学習を行い、その学習効果、診断結果の妥当性を検証した。
- ③アニーリングを用いた学習率の設定法を確立することにより、学習誤差を減らすことができた。

参考文献

- [1]三宅秀明, 山本秀夫, 中村秀明, 宮本文穂: 階層構造ニューラルネットを用いた橋梁診断エキスパートシステムの既存橋梁への適用, 第14回ファジィシンポジウム, FF2-2, pp819-822, 1998,6, Vol.4
 [2]堀川真一, 古橋武, 内川嘉樹: ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.5, pp906-928, 1992.
 [3]鳥脇純一郎: 認識工学, コロナ社, 1993.3.

問い合わせ先

〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557
 山口大学工学部知能情報システム工学科宮本研究室
 Tel 0836-35-9484
 Fax 0836-35-9484
 E-mail nakamura@design.csse.yamaguchi-u.ac.jp