階層的概念関係に基づく学習方式 HCL と操作手順作成知識の獲得

正員 吉澤 純一 (東京電力)

正員 荻 宏美 (東京電力)

正員 高野 富裕 (三菱電機)

正員 松本 啓之亮 (三菱電機)

HCL (Hierarchical Concept based Learning) and its Application to Automatic Acquisition of Switching Operational Knowledge

Junichi Yoshizawa, Member, Hiromi Ogi, Member (Tokyo Electric Power Co.), Tomihiro Takano, Member, Keinosuke Matsumoto, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Knowledge acquisition and extension of expert systems for electric power systems are becoming difficult, and this paper proposes a solution by symbolic machine learning. The authors have developed a learning method HCL (Hierarchical Concept based Learning), which enables us to acquire knowledge to make switching sequences of power system operation.

HCL builds up knowledge base of an expert system from operational experiences in the past. The learning process of HCL is divided into organization phase and generalization phase. In the organization phase, HCL analyzes each experience and structures it by recognizing several aims of switching operations, and individual knowledge is produced. In the generalization phase, HCL integrates similar experiences into common operational rules by translating their individual names to variables.

HCL features the use of some conceptual hierarchies for organization, for instance the hierarchy of domain model which expresses the structural relationships between devices or equipment, such as 'a_part_of' or 'connected_to' relations. Based on the conceptual hierarchy, HCL enrolls all the operations in a tree structure, of which the nodes express their several aims.

As application examples of HCL, knowledge acquisition of operational sequences for bus-bar switching is shown.

キーワード：学習，系統操作手順作成，知識獲得，知識システム

1. ま え が き

電力分野において，事故時の診断・復旧支援，平常時の操作手順作成など，多くのエキスパートシステムが開発されてきた⁽¹⁾。これらのエキスパートシステムは，現在では徐々に実用化の段階へ移行しつつある。

しかし知識ベース構築の段階において，熟練者の非体系的な知識を，効率的に計算機上に移植する知識獲

得手法が問題となっている。また知識ベースの巨大化に伴い，個々の知識についての相互関連の把握が困難となる。そのため知識編集作業が複雑となり，システム構築後の知識ベースは拡張性に欠けている。

そこで知識獲得と拡張の簡易化を図るため，機械学習による，問題解決知識の獲得を考える。すなわち，知識を直接熟練者から抽出するのではなく，過去の問題解決事例を通して間接的に知識を獲得する。計算機

は問題解決事例を整理することによって知識を生成し、知識ベースを自ら拡張していく。従って本論文という学習とは、単に事例を汎化するのみならず、事例を体系的に整理することをも含めている。

これを可能にする新たな学習方式として、本論文では“階層的概念関係に基づく学習方式 HCL(Hierarchical Concept based Learning)”を提案する。HCLでは、学習を行うための予備知識として、系統を構成する設備機器間の全体-部分関係・接続関係などの階層的概念関係を利用することを特徴とする。学習プロセスは、階層的概念関係に基づく一事例の体系化と、複数の類似事例からの汎化からなる。

具体的な問題領域としては、系統操作手順作成知識の学習を考える⁽²⁾⁽³⁾。学習内容は、平常時の操作手順表など、熟練者が過去に作成した操作手順からの、汎用的手順作成知識の獲得である。

2. 学習方式 HCL の位置づけ

〈2・1〉 知識獲得の関連研究 知識獲得を円滑・容易に行うために、様々なアプローチが見られる。グループウェアによるシステムティックな知識獲得⁽⁴⁾、事例ベース推論による経験の利用⁽⁵⁾、ヒューリスティクスを除去したモデルベース推論⁽⁶⁾などがあげられる。

学習による知識獲得も、その代表的アプローチの一つである。学習には、ニューラルネットワークのニューメリックな学習と、EBLなどのシンボリックな学習とに大別されるが、HCLによる学習は後者に当てはまる。

シンボリックな学習の代表である EBL(Explanation Based Learning) は 1985 年ごろから提唱され始めた学習方式である^{(7)~(10)}。EBL の明確な定義はないが、基本的な枠組みとしては、外界で生じるエピソード(事例)を、領域理論と呼ばれる予備知識で説明づけることによって、エピソードを汎化した知識を獲得する手法である。EBL は、従来の複数の類似事例だけからの学習方式 SBL(Similarity Based Learning)で問題となっていた、学習の方向づけと獲得知識の正当性とを保証できるものとして注目を集めている。しかし EBL では、事例を説明するために、あまりに多くの領域理論が必要であるという問題点が指摘されている。

〈2・2〉 HCL と従来学習方式との比較 本研究では、EBL における学習の正当性保証と、SBL における領域理論の不要性という両長所を取入れた学習方式を考える⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

すなわち HCL では、最初はある程度領域理論によ

る学習の方向づけを行い、その後は類似知識のみから汎化した知識を生成する。具体的には、過去の事例に対し、最初を対象の構造関係などの階層的概念関係に基づいた説明づけを行い、木構造に整理した知識を生成する。更にその後、SBL 的に複数の類似事例からの汎化を行う。これにより HCL では、従来の EBL に比べ、わずかな領域理論での学習が可能となる。

3. HCL の枠組み

〈3・1〉 学習の入出力 図 1 に階層的概念関係に基づく学習方式 HCL の枠組みを示す。ここで、学習の入力は過去の実操作事例である。具体的には、以下の二つの情報が入力される。

- (i) 過去に作成された機器の操作手順
- (ii) 操作手順を実行することによって生じる系統の状態変化

ただし個々の系統状態変化の相互関係、あるいは操作との関連情報は、この時点では不明であり、入力されない。単に操作の結果生じた現象を入力するのみである。

例えば簡単な例として、図 2 の母線切替操作について考える。この場合、HCL への入力は図 3 のようになる。ただし、本来の学習入力に変電所を含めた系統全体の状態変化であるが、ここでは簡略化し、変電所内の状態変化のみを考えることにする

HCL によって得られる出力(学習知識)は、系統操作における様々なレベルの目的指令を達成するための、機器の操作手順知識である。例えば、図 3 の入力

図 1 階層的概念関係に基づく学習方式 HCL の枠組み

Fig. 1. Basic framework of the hierarchical concept based learning.

図 2 モデル変電所の操作例

Fig. 2. A switching example of model substation.

図 4 設備機器間の構造上の階層的概念関係

Fig. 4. Conceptual hierarchy of model structure.

に対しては、最も上位の知識として母線切替え操作手順、中間的知識として母連開閉操作手順、接続子開閉操作手順などが獲得される。

〈3・2〉 学習プロセス HCL では、学習の方向づけを行い、効率的に学習するための領域知識として、図 4 の系統設備機器間の構造に関する階層的概念関係（以下、構造関係と略記）、図 5 の状態変化内容に関する階層的概念関係（以下、状態変化関係と略記）を用いる。各々の詳細な意味については後述する。

提案する学習方式 HCL は、大別して以下の二段階

機器操作手順

田方110. 状態
開→閉田方210. 状態
開→閉田方010. 状態
開→閉田方210. 状態
開→閉田方010. 状態
開→閉田方210. 状態
閉→開田方110. 状態
閉→開

系統の状態変化

田方154kV母連. 状態 開→閉

田方154kV甲母線. 接続設備
[...] → [[田方154kV. 乙母線], ...]田方154kV乙母線. 接続設備
[...] → [[田方154kV. 甲母線], ...]田方154kV母線群. 使用設備
[[田方154kV. 甲母線],
→ [[田方154kV. 甲母線], [田方154kV. 乙母線]]田方154kV母線群. 使用設備
[[田方154kV. 甲母線],
→ [[田方154kV. 甲母線], [田方線. 1L]]

田方154kV母連. 状態 閉→開

田方154kV甲母線. 接続設備
[[田方154kV. 乙母線]] → [...]田方154kV乙母線. 接続設備
[[田方154kV. 甲母線], ...] → [...]田方154kV母線群. 使用設備
[[田方154kV. 甲母線], [田方154kV. 乙母線]]
→ [[田方154kV. 乙母線]]図 3 図 2 の操作事例
Fig. 3. Experience example of switching operation in Fig. 2.

注) ギリシア文字は任意の属性値の要素を表す
例えば, $\text{add } \phi(a)$ は、属性値が最初空 (ϕ) であった属性に、要素 a が加わったことを示す

図 5 状態変化内容に関する階層的概念関係
Fig. 5. Conceptual hierarchy of state transition.

によって行う。

(1) 操作事例の体系化 HCLの第一段階として、系統機器の一連の操作列にすぎない操作事例を、構造関係・状態変化関係に基づき体系化し、各機器操作の意味づけを行う。

(2) 体系化知識の汎化 HCLの第二段階として、個別対象に関する知識である体系化知識を、後述する一般化・縮約によって他の類似問題にも適用可能な汎用的知識とする。

〈3・3〉 学習の前提条件 HCLによる学習は、対象となる系統のデータ表現として、以下のことを前提とする。

(1) 系統を構成する設備機器データは、フレームオブジェクトなどのように、設備機器名と属性で表現されており、属性は属性名と属性値からなる。

(2) 属性値は、一つの値もしくは複数の値の集合リストとして表現される。

例えば、開閉器については属性“開閉状態”の値は“閉”または“開”の一つの値によって表現される。母線・送電線などの設備については属性“接続設備”の値は“{[A線, 1L], [B線, 2L]}”など複数の値のリストとして表現される。

(3) 属性値は連続的に変化しない。

系統の状態変化は、ある状態から別の状態へと、離散的に変化することを前提とする。そのため電圧などのアナログデータも、非連続的に変化するものとして取扱う。

4. 操作事例の体系化

〈4・1〉 体系化の枠組み 体系化では、各操作の意味を考える。すなわち、各操作はそれぞれの操作目的を達成するために行われたかを識別し、それぞれの操作目的の下で包括する。これによって、操作事例を木構造に整理する。

HCLでは以下の二段階によって体系化を行う。

(1) 構造関係に基づく体系化

(2) 状態変化関係に基づく体系化

〈4・2〉 構造関係に基づく体系化 図4の構造関係を基に、図3の学習入力に対して、各操作と系統状態変化との因果関係を明確にし、構造化する。

ここで図4の構造関係は、図2の系統を構成する設備機器間の構造上の概念関係を表している。例えば、図2の“田方154kV母連”は断路器“田方110”、“田方210”および遮断器“田方O10”から構成され、それらと全体-部分関係(a_part_of関係)をもつ。この構造関係を基に、“田方154kV母連”の開閉が

認識されたとき、それにかかわる操作とは、その下位概念である“田方110”、“田方210”、“田方O10”の開閉操作であると判断する。

構造関係に基づく体系化は、以下の二段階によって行われる。

(1) 下位概念操作の抽出 各設備機器の状態変化について、その設備機器の構造関係の下位概念機器の操作(以下、下位概念操作と呼ぶ)を抽出する。これによって、ある上位概念設備の状態変化(以下、上位概念操作と呼ぶ)の原因となった操作すべてを抽出する。

ここで、図3の田方154kV母連の開閉状態変化、甲・乙母線の接続設備の状態変化のように、一操作事例内に同じ設備機器の操作が複数存在する場合は、操作の連线性・時間的前後性を考慮し、以下に示す基準で、いずれの上位概念操作に包括されるかを判断する。

(i) 基本的には、下位概念操作を行った(あるいは生じた)時刻以後、最初に生じた状態変化が、その上位概念操作となる。

(ii) 上記の基準で、上位概念操作が決定されない操作のなかで、母連開操作における遮断器開操作後の断路器開操作のように、構造関係で同じ上位概念をもつ機器の連続した操作である場合は、前操作の上位概念操作を自身の上位概念操作とする。

(iii) それでも上位概念操作決定されない操作については学習の対象から除外する。

(2) 上位概念操作の設定 更に個々の設備について、一連の状態変化($\phi \rightarrow X, X \rightarrow \psi, \dots, \rightarrow \Omega$; ϕ, X などは任意の設備のある操作時点での状態を示す)をまとめた操作($\phi \rightarrow \Omega$)を、それらの上位概念操作として設定する。

例えば、“田方154kV母線群”の“使用設備”は“{[田方154kV甲母線]}”→“{[田方154kV甲母線], [田方154kV乙母線]}”と変化し、次に“{[田方154kV甲母線], [田方154kV乙母線]}”→“{[田方154kV乙母線]}”へと変化する。これらをまとめた状態変化“{[田方154kV甲母線]}”→“{[田方154kV乙母線]}”を二操作の上位概念操作として設定する。

〈4・3〉 状態変化関係に基づく体系化 図5の状態変化関係を基に、前節によって構造化された操作事例に対し、各状態変化の中身を明確化し、操作の目的を認識する。

ここで図5の状態変化関係は、それぞれの下位層にある属性値の変化(状態変化)を、その変化内容とい

う観点から中間層あるいは上位層にクラス化したものである。例えば、ある系統設備の属性“接続設備”が“ $\{ \dots \} \rightarrow \{ \text{〔田方線 1L〕}, \dots \}$ ”に変化したとき、この操作の本質は“ $\text{add } \neg \phi \text{ (〔田方線 1L〕)}$ ”であると考えられる。

また、図中の“modify”・“add”・“remove”は“ ϕ ”と“ $\neg \phi$ ”に分類される。“ $\neg \phi$ ”は属性値の中に、状態変化した要素(“ $\text{add } \neg \phi(a)$ ”の“ a ”)以外の要素が存在した場合である。逆に“ ϕ ”は状態変化した要素以外に、他の要素が存在しなかった場合である。

従って、もしある系統設備の“接続設備”が“ $\{ \} \rightarrow \{ \text{〔田方線 1L〕} \}$ ”に変化したときは、“ $\text{add } \phi \text{ (〔田方線 1L〕)}$ ”となり、この場合では、設備の復旧・使用などの意味をもつことになる。

これらの状態変化関係に基づき、各設備レベルの状態変化が「操作前-後状態」形式から「操作内容」形式に変換されることになる。その結果、操作の目的が明確化され、目的指令対応の手順作成知識の獲得が可能となる。また後述する汎化での、同内容の操作の認識が可能となる。

〈4・4〉 体系化例 図6は、図3の操作事例を構造関係・状態変化関係に基づき体系化した結果である。図の左方向がより上位概念の操作である。ただし、

〈4・2〉節(2)項を行った結果得られる上位概念操作は複数存在するが、図中では簡潔に表現するため、“*”マークの操作以外は省略してある。

同図において、例えば最上位概念操作は、母線切替え操作を意味し、次のループ切替え手順知識が得られたことを表している。

田方 154 kV 母線群使用：

modify ϕ (〔田方 154 kV 甲母線〕)

→(〔田方 154 kV 乙母線〕)の操作手順

(1) 田方 154 kV 母線群使用：

add $\neg \phi$ (〔田方 154 kV 乙母線〕)

…乙母線使用

(2) 田方 154 kV 母線群使用：

remove $\neg \phi$ (〔田方 154 kV 甲母線〕)

…甲母線停止

また、もし図5中間層の“ ϕ ”の操作手順と“ $\neg \phi$ ”の操作手順が同じである場合、それらをまとめて上位層の形式に置き換える。例えば、上述の

modify ϕ (〔田方 154 kV 甲母線〕)

→(〔田方 154 kV 乙母線〕)

と、他の事例から得られる。

modify 3 (〔田方 154 kV 甲母線〕)

→(〔田方 154 kV 乙母線〕)

図6 図3の操作事例の体系化結果
Fig. 6. Organized experience of Fig. 3.

→(〔田方 154 kV 乙母線〕)

このように操作内容を抽象化することによって、より汎用的な知識が獲得される。例えば四重母線など、母線が甲乙以外にも存在する変電所において、

〔甲母線，…母線〕→〔乙母線，…母線〕

などの切替え操作を行う場合も、上述の知識は適用可能となる。

〈5・3〉 一般化知識の縮約 一般化によって、他の“同一構造”の対象にも適用可能な知識が得られる。しかし図2のような、2回線が接続する母線の切替え知識を、3回線・4回線が接続する母線の切替えに適用するといった、“類似構造”の対象へ適用することは不可能である。そこで、構造上の数に依存した知識を、数に依存しない知識に変換することを行う。

し、次に甲母線を停止 (remove— ϕ) する手順である。

操作手順を作成する場合、問題として操作指令に対応するレベルの上位概念操作を与えることによって、これらの知識を利用し、下位概念操作へと徐々に展開することによって解が得られる。

6. HCL の評価と今後

現在、実際の系統操作事例を与えながら、HCL の評価を実施中である。図 8 に現時点までに入力した事例数と得られた知識数の相関グラフを示す。与えた操作事例は、母線・送電線・変圧器それぞれの停止あるいは使用など、目的指令レベルの主回路操作を一事例として与えている。

同図においては、約 20 事例までの初期段階では、知識数は飛躍的に増加し、その後は比較的緩やかに増加を続けている。これは、得られる知識の内容が、初期段階では接続子の開閉操作手順など、機器レベルの手順展開知識が主であり、その後はより上位の設備レベルの手順展開知識獲得が主となるためである。

また、100 事例入力時点での知識の内訳は、全く汎化されていない知識が、機器レベル 11%、設備レベル 45%、部分的に汎化された知識が、機器レベル 29%、設備レベル 17%、完全に汎化された知識が機器レベル 59%、設備レベル 36% であった。また、標準的な構成の送電用変電所では、〈5・3〉節で述べた縮約が完全に行われていた。

100 事例入力時点での学習知識に対し、入力した事例と同一対象で、対照的操作など、操作内容が類似の問題、あるいは操作内容が同一で、操作対象が類似の問題を与えてみた。

その結果、同一対象・類似操作の問題は、ほぼ満足できる手順解が得られた。しかし同一操作内容・類似対象の場合、構造的な特徴が異なる場合は、一応の解はできるが、若干の修正が必要であったり、解を得ることが不可能なものもあった。

これは現在の学習アルゴリズムでは、それぞれの知識がいかなる状況で使われることが望ましいかといった、知識適用条件の学習が行われなためである。そのため、実際に手順作成を行う推論エンジンの能力によっては、不適当な知識の適用が行われる場合もある。

そこで今後は HCL の拡張の一つとして、不完全な操作事例からの知識適用条件の学習を検討していく⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。すなわち図 9 に示すような、操作手順の検証機能と修正機能をもった手順作成機構、および学習

図 8 HCL に与えた操作事例数と学習知識数の相関グラフ

Fig. 8. A relation graph of experience number and acquired knowledge number.

図 9 学習機構を組込んだ手順作成システム
Fig. 9. Switching sequence generation system including learning mechanism.

機構の枠組みを考える。もし、検証により手順に誤りが認められた場合、不完全な操作事例として取扱われる。このときシステムは、知識選択が不適切であったと判断し、知識が選択されたときの状況から、適用の条件を学習する。また誤りが認められなかった場合は、新たな操作事例として学習する。

7. むすび

本論文では、二種類の階層的概念構造関係を利用した、系統操作事例からの手順作成知識の獲得法について報告した。

本学習方式 HCL は以下の特徴をもつ。

- (1) 体系化によって各操作の上位概念操作を認識し、操作事例の意味づけを行っている。
- (2) 学習知識の一般化・縮約によって、汎用性の高い知識を獲得している。
- (3) 操作事例が階層化され、操作目的ごとに包括・整理される。従って操作手順は、複数の操作目的知識の組合せとして作成できる。

また、エキスパートシステムへ HCL を導入することによって知識ベースの容易な構築と拡張が可能となる。専門家の操作事例を与えるだけで、知識ベースの

構築が行われる。またシステム開発後も、問題解決を経験するごとに知識の拡張が行われ、システム全体としての機能向上が図られる。

今後、HCLの評価と改良を加えながら、HCLによって得られる学習知識を利用した、系統操作手順作成ドメインシエルの構築を行っていく予定である。

(平成4年3月18日受付, 同4年7月17日再受付)

文 献

- (1) 「電力系統のエキスパートシステム」, 電気学会技報, (II部) No. 339 (平2)
- (2) T. Abe, et al.: "An Expert System for Generating Switching Sequence at Substations", Proceedings of the International Workshop on AI for Industrial Applications, p. 326 (1988)
- (3) 永田・奥寺・北口・武田: 「平常時操作指令手順の論理生成方式」, 電学論B, 108, 97 (平元-3)
- (4) 上田・國藤: 「知識獲得支援のためのグループウェア GRAPEにおける仮説構造化」, 第11回知識・知能システムシンポジウム (平2)
- (5) 奥田・渡辺・王・山崎・馬場: 「二次系統における事故時復旧操作への知識工学の応用」, 電学論B, 107, 509 (昭63-10)
- (6) 駒井・松本・坂口: 「モデルに基づく診断手法と電力系統事故診断への応用」, 同上, 110, 258 (平2-4)
- (7) G. DeJong: "An Introduction to Explanation-based Learning", Exploring Artificial Intelligence, p. 45 (1988) Morgan Kaufmann Publishers
- (8) M. Pazzani: "Integrated Learning with Incorrect and Incomplete Theories", Proceedings of 5th International Conference on Machine Learning, p. 291 (1988)
- (9) S. Matwin & J. Morin: "Explanation-Based Learning of Procedural Constraints in Planning", Technical Report 89-40, Univ. of Ottawa (1989)
- (10) T. Mitchell, R. Keller & S. Kedar-Cabelli: "Explanation-Based-Generalization: A Unifying View", *Machine Learning*, 1, No. 1 (1986)
- (11) 吉澤・荻・高野・松本: 「階層的な概念構造に基づく学習(HCL: Hierarchical Concept-based Learning)と系統操作手順作成への応用」, 平3電気学会全大, 1160, p. 9: 200 (平3)
- (12) 吉澤・荻・高野・松本: 「階層的な概念関係に基づく学習方式HCLと系統操作手順作成知識の獲得」, 電気学会電力技術研究会, PE-91-34 (平3)
- (13) J. L. Siqueira & J. F. Puget: "Explanation-Based Generalization of Failures", Proceedings of the ECAI-88, p. 339 (1988)
- (14) P. Urbano: "Learning by Explanation of Failures", *Lecture Notes of Computer Science*, 482, 327 (1991)

吉澤 純一 (正員)

昭和35年3月23日生。57年新潟大学工学部電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。現在, 同社システム研究所AI研究室に勤務。主として, 人工知能技術, メディア技術応用システムの研究開発に従事。平成2年電気学会論文賞受賞。

荻 宏美 (正員)

昭和31年12月4日生。54年新潟大学工学部電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。現在, 同社システム研究所AI研究室に勤務。主として, 電力設備に関するエキスパートシステム開発に従事。

高野 富裕 (正員)

昭和39年8月26日生。平成元年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社, 産業システム研究所に勤務し, 現在に至る。主として, 電力系統分野への知識工学の適用に関する研究に従事。情報処理学会会員。

松本 啓之亮 (正員)

昭和27年7月15日生。53年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社, 現在に至る。工学博士。主として, 電力系統分野への知識工学の適用に関する研究に従事。59年電気学会論文賞受賞。IEEE, 情報処理学会会員。