

知識獲得支援のためのグループウェア GRAPEにおける属性構造化

國藤 進、上田晴康（富士通国際情報社会科学研究所）

須永知之、井深克憲、岩内雅直（富士通ソーシャルサイエンスラボラトリ）

1. はじめに

本論文では、知識システム構築最大のボトルネックである知識獲得ボトルネック [Lenat 86] を解消するために構築中のグループウェアGRAPE (Group knowledge Acquiring & Processing Environment) の属性構造化の方法について報告する。GRAPE は前報 [Kunifujii 89a, 89b] で述べたように、初期知識ベース獲得機能と計画問題支援機能とからなる。前者は現在インプリメンテーション中で、後者は基本概念を検討中である。GRAPE の初期知識ベース獲得機能は、図1に示されるように、基本的に三つのモジュール（仮説構造化、属性構造化、および評価構造決定）からなる。本シンポジウムでは、このうち仮説構造化を前報 [Ueda 90] で、属性構造化を本報で詳述する。

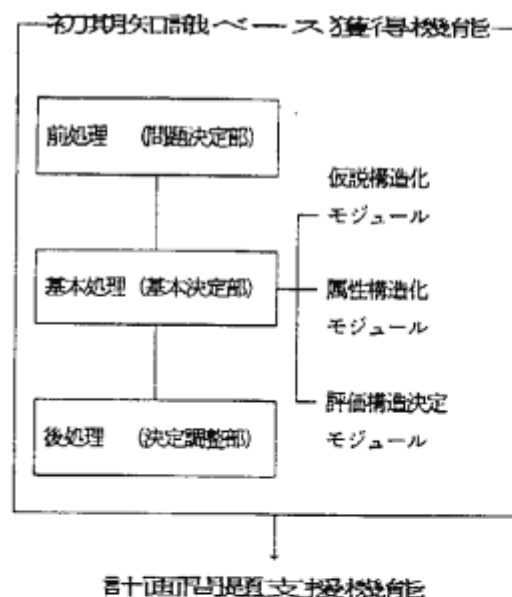


図1 GRAPEの初期知識ベース獲得機能

GRAPE では、評価構造決定部にSaaty 教授によって提案された階層構造に基づく分析法AHP [Saaty 80] を用いる。AHP を利用する理由は、評価構造全体の整合性をとるメジャーが与えられていることである。AHP の欠点は、階層構造決定の方法論やツールを提供していないこと [Kunifujii 90]、特に評価項目に相当する属性の数が多くなった

場合の方法論を明示していないことである。そこで、GRAPE の初期知識ベース獲得機能第二モジュールとして、属性を抽出し、構造化するプロセスの支援をすることにした。

初期知識ベースの階層的知識構造を意図すれば、各階層は複数の属性構造で記述される。属性抽出・構造化支援のポイントは、属性間の独立性—従属性分析 [Tone 86] を行い、互いに独立な属性からなる（縮退した）階層的属性構造を抽出することである。この分析手法には、多くの方法が考えられるが、初期知識ベースの階層的知識構造への変換の容易さとAHP の従属性分析との相性の良さから、著者らによって提案された拡張ISM (Extended Interpretive Structural Modelling) [Kunifujii 78, 79, 81; Takeshima 78a, b] を用いることにする。

2. 本研究の位置づけ

最初に、本研究の位置づけを明らかにする。知識獲得の上流の過程を支援するツール研究開発の切っ掛けとなったのは、ボーイング社のBoose によって開発された専門家から初期知識ベースの知識を抽出することを支援するツールETS [Boose 84] である。ETS は知識抽出の過程を支援するツールの代表例であるが、心理学者Kelly のPCT (Personal Construct Theory) [Kelly 55] に基づき、専門家にインタビューを行う。人間の心理概念を構成する属性間の関係性に注目したグリッド手法 [Fransela 77] を用いたインタビューを行い、重み付きプロダクションルールを生成する。ETS は600 事例程度の実例を経て、AQUINAS [Boose 87] というツールに改良されていった。AQUINAS は知識抽出、知識変換、知識ベース管理を支援するツールである。すなわち、ETS の欠点を改良し、機能拡張したものであるが、残念ながら部分機能しか実現されていない。1986年、著者の一人がETS を日本に紹介したので、日本にはETS 型のツールが数多く存在する。

上述のような研究開発の刺激を受けて、優AI [Sawai 89, Hashimoto 89] が生まれた。優AIは分類型エキスパートシステムの初期知識ベースを自動作成する知識獲得ツールで、ETS のグリッドの整合性を取る部分をAHP で行っている。優AIでは、拡張ISM を特殊化したシステム分析手法・ISM (Interpretive Structural Modelling) [Warfield 76] を用いるべきであると主張されている。しかしながら、ISM を用いることの根拠が貧弱で、残念ながらISM 部分の

を用いて、拡張ISMによる属性構造化プログラムを作成した。ここでは紙面の関係で、入出力結果のみ述べる。

〔例1〕 図2のような従属関係があるとき、以下のよう呼び出して、拡張ISMによる属性構造化プログラムを呼び出す。

```
?-:create(#cyclic,C, [(b:-a), (c:-b), (a:-c), (e:-a),
(d:-b)] ), :go(C).
?-:show(C, Clist).
```

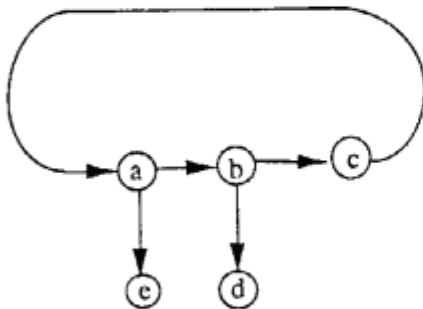


図2 ループをもつ属性間従属関係

ここに#cyclicが拡張ISMのループ検出を行うデータ構造で、これに対してメソッド:goを適用すると、全てのループを検出して、等価な頂点を濃縮した上で、到達可能な最も遠い(始祖)複合頂点を探し出す。メソッド:showは、探し出した複合頂点集合をとりだすものである。この出力結果をそのまま表示すると分かり難いので、グラフ表示したものを図3に示す。

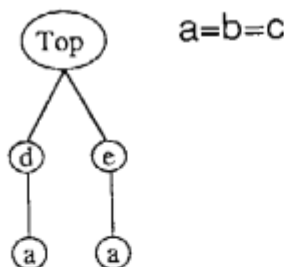


図3 濃縮された属性間従属関係の木構造表示

〔例2〕 図4のような従属関係があるとき、以下のよう呼び出して、属性構造化プログラムを実行する。

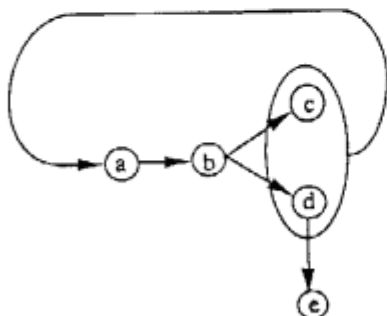


図4 複雑なループをもつ属性間従属関係

```
?-:create(#cyclic,C, [(a:-c, d), (c:-b), (d:-b), (b:-a),
(e:-d)] ), :go(C).
?-:show(C, Clist).
```

この出力結果をグラフ表示すると、図5のようになる。最初の濃縮プロセスで、aとbが等価なことが示され、再度の濃縮プロセスで、c,dとa=bが等価なことが示される。結果的に、射影則d:-c,dを用いけば、独立な属性はeのみになる。

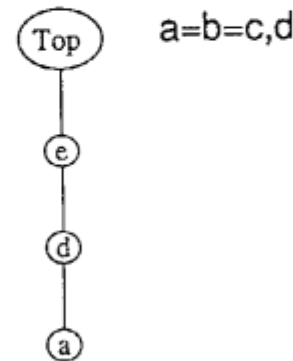


図5 図4の縮約属性間従属関係の木構造表示

6. おわりに

本稿では、知識獲得支援のためのグループウェアGRAPEの初期知識ベース獲得機能の第二モジュールである属性構造化モジュールについて、そこで採用した拡張ISMの基礎理論の概要と論理プログラミング言語ESP上にインプリメントしたモジュールの試作実行結果を述べた。著者らは実用的計算量のアルゴリズムを作ることに関心がある。本論文での眼目は、互いに併存到達可能な単純属性間の濃縮および複合属性と単純属性間の濃縮は行わぬことである。このアルゴリズムを経て、射影的・擬似推移的閉包の非冗長最小被覆に相当する骨格構造を得る。この骨格構造をもとに、上述の例1、例2に示されるある仮説クラスを特徴付ける属性の階層構造を展開することができる。この展開された属性構造を階層的な仮説構造に埋め込み、階層的属性構造のそれぞれに対して、AHPの一对比較を行うのは容易である。実際、ワークステーションPSI-II上で、そのようなシステムをインプリメント中である。

今後の研究課題として、次のようなものがある。AHPの従属性は独立性の相対概念として議論されている。拡張ISMの場合、初期知識ベースのもつ知識構造への変換の関係から、独立性という概念は存在しない。関連する概念として、非従属性という概念〔Takeshima 78a, b, Kunifuji 81〕が存在するか、この概念と類似の概念がPCT〔Kelly 55〕にも存在することは注目に値する。従属性および非従属性という両概念を含むスラック変数付きのブール方程式への変換理論〔Takeshima 78a, b, Kunifuji 81〕も確立している。しかしながら、もし従属性のみならず非従属性を

〔補題 3〕 任意の $X, Y, Z (\in 2^V)$ に対して、次の 2 式が等価である。

(6) $X \rightarrow Y$.

(7) $\forall Z (Z \rightarrow X \supset Z \rightarrow Y)$. ■

補題 1、2、3 を用いれば、次の定理 1、2 が証明される。

〔定理 1〕 所与の $I (\subseteq 2^V \times 2^V)$ に対して、次の 2 命題が等価となる。

(8) $\bigwedge_{(X, Y) \in I} (X \rightarrow Y)$.

(9) $\forall Z \bigwedge_{(X, Y) \in I} (\bigwedge_{x \in X} P_x(Z) \supset \bigwedge_{y \in Y} P_y(Z))$.

ここに $u \in V$ に対して、 $P_u(Z) = (Z \rightarrow \{u\})$ ■

〔定理 2〕 指標集合 $p_u = \{Z \mid P_u(Z)\}$ を導入すれば、前述の命題 (9) は次のブール方程式 (10) と等価である。

(10) $\sum_{(X, Y) \in I} \{(\prod_{x \in X} p_x) \cdot (\prod_{y \in Y} p_y)'\} = 0$. ■

ブール方程式 (10) は、 n 個の指標集合 $p_{x_1}, \dots, p_{x_n}$ のみからなる。そこで、次の定理を得る。

〔定理 3〕 ブール方程式 (10) の左辺を $\phi: (p_{x_1}, \dots, p_{x_n}) (V = \{X_1, \dots, X_n\})$ とすれば、命題 (8) は式 (10) と等価である。

(11) $\phi: (p_{x_1}, \dots, p_{x_n}) = 0$. ■

本定理より、併存到達可能性に関する推論は、ブール方程式 (11) からの推論に帰着される。

4. 拡張 ISM アルゴリズム

属性間の従属性分析で用いる拡張 ISM の数学的構造はブール方程式で表現できることが、前章で示された。ISM の骨格グラフ [Warfield 76] に相等する概念である拡張 ISM の擬似推移的縮約グラフを定義する。

〔定義 5〕 有向グラフ G の擬似推移的縮約グラフとは、その射影的有向グラフ G^* と共通の閉包グラフ G^* をもつ射影的有向グラフのなかで、射影的・加法的でない辺の数が最小のグラフのことである。□

〔補題 4〕 有向グラフ G の擬似推移的縮約グラフを求める問題は、ブール関数 ϕ の素項による非冗長最小被覆を求める問題と等価である。■

これを求めるアルゴリズムは、文献 [Kunifuji 78] に示したように、NP 完全で、かつその解はユニークでない。そこでパスを経由して、互いに併存到達可能な単純頂点同士あるいは互いに併存到達可能な複合頂点と単純頂点同士を、等価な頂点とみなし、射影的有向グラフ上で濃縮し、縮退した非サイクリ的有向グラフへの変換を行う。

〔定理 4〕 あらゆる互いに併存到達可能な単純頂点同士あるいは互いに併存到達可能な複合頂点と単純頂点同士に対して、同一のブール変数を割り当てたブール方程式 $\phi_e = 0$ より得られる G^* の擬似推移的縮約グラフはユニーク

である。■

上記の擬似推移的縮約グラフを、ISM にならって骨格グラフと呼ぶ。以上の補題より、次のような擬似推移的縮約グラフを得るアルゴリズム [Kunifuji 78, 79, 81 を変形] を得る。

〔擬似推移的縮約アルゴリズム〕

- ① 有向グラフ $G = (2^V, E)$ の辺集合 E に対応するブール方程式 $\phi_e = 0$ を構成する。
- ② ブール関数 ϕ_e の各積項に対して、順次、ド・モルガン則、交換則および補元則を適用し、射影的な辺の全てを除去する。
- ③ 各単純頂点 $u (\in V)$ の非冗長先祖頂点集合を、ブール関数 ϕ_e に $p_u = 0$ を代入した式の素項展開形における全ての正の積項に対応する複合頂点集合として求める。
- ④ 単純頂点間の濃縮を、定理 4 に基づき実施する。そこで派生する非サイクリ的有向グラフの濃度 2 以上の非冗長先祖頂点に対して、新たなブール変数を割り当てる。これを濃縮されたブール関数と呼ぶ。
- ⑤ 複合頂点と単純頂点との間の濃縮を、新たなブール変数に着目し、再度実施する。そこで派生する再び濃縮されたブール関数において、素項間の生成関係を調べ、あらゆる推移的な辺を除去する。

5. 拡張 ISM の Prolog 上での実現法

上記アルゴリズムを論理プログラミング言語 Prolog 上でインプリメントすることを考える。前述の従属性 “ $\{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow \{y\}$ ” の解釈を、“属性 y の値は、属性 $x_1, \dots, x_n$ の値に従属して決まる” と解釈する。すると、このような知識を、“ $y := x_1, \dots, x_n$ ” というホーン論理で表現するのは、自然な記述法である。また属性間従属性のマージについては、個別に与えられた従属関係を、ホーン論理プログラムの集合として、単純に追加することができる。その理由は、純粋のホーン論理プログラムの集合には矛盾が生じないからである。そこで、直ちに論理プログラミング言語 Prolog を用いて、上述の拡張 ISM アルゴリズムをインプリメントしたくなるが、事はそんなに単純でない。例えば、拡張 ISM のアルゴリズム ③ を求めるにも、仮説推論 [Kunifuji 86] 的なメタプログラミング技法が必要である。また、アルゴリズム ④ や ⑤ を、そのまま素直にホーン論理表現すると、しばしば無限ループにおちいり、計算が止まらなくなる。実は、このアルゴリズム ④ や ⑤ は (ブール代数レベルの) ホーン論理プログラム集合に内在する全てのトートロジー・ループとマージ・ループを検出し、トートロジー・ループを除去し、マージ・ループに対して属性 (述語) 名のリネーミングを行い、ループのないプログラムに変換しなさいという問題に帰着される。いずれにせよ、この問題は Pure Prolog の範囲では解決不能であり、著者は Prolog マシン PSI-II のユーザ記述言語 ESP [Chikayama 84] のもつメタプログラミング機能

インプリメントはされなかった。

AHP の欠点は、階層構造決定の方法論やツールを提供していないこと、特に評価項目に相当する属性の数が多くなった場合の方法論を明示していないことであった。そこで、属性の数が人間のもつ認知的制約といわれる値 7 ± 2 以上の場合、属性間のクラスター分析を行い、属性間構造を抽出していくのが案直な考えである。クラスター分析としては、(K法を含む) マニュアル法、拡張ISM、属性クラスターリング等、種々のものが考えられる。属性の総数としては、階層の各レベル当たり、最大20~30個程度の属性が、付与されると考えられる。そのような個数の属性分析手法として、GRAPE では拡張ISMを標準装備している。そこで、その根拠を明らかにしよう。

複雑なシステムの構造モデリング法の一つとして、ISM というシステム分析手法が知られている。ISM は推移的かつ反射的な2項関係であり、因果関係、生成関係、導出関係、先行関係、引用関係の分析に有効である。これに対して、拡張ISMは擬似推移則および反射則を満足する二項関係で、習得可能関係、理解可能関係、達成可能関係、要求満足関係、機能包含関係の分析に有効である。本論文では、この拡張ISMを用いて、属性構造化を行うべきであると主張する。

その理由の一つは、最終的に変換される知識ベースの構造にある。前報 [Ueda 90] で示されたように、構造化された仮説空間はis-a階層のクラス-サブクラス関係の集まりからなる知識ベースである。is-a階層のクラス、サブクラスやインスタンスが、与えられた問題の解に相当する(種々のレベルの) 仮説である。サブクラス、クラスといく程、だんだん抽象的な仮説となる。それらの名前づけはK法の一行見出しと同じく、機械化の困難な作業である。

あるクラス-サブクラス関係に注目したとき、それぞれのサブクラスを差別化する属性の抽出とそのクラスを特徴づける属性の抽出が必要である。ここで抽出された属性がAHPの対比較における評価項目に相等する。抽出された属性の従属性分析を行い、互いに従属しあう属性を縮退することは、AHPの運用精神である「従属性の強い要素(=属性)をまとめて一要素とし、他の要素と対比較する」[Tone 86]とも一致する。ここでの処理の本質は、同一レベルに含まれる各属性を互いに独立に近い関係に追い込むことである。

拡張ISMを標準装備する理由は、それが単に属性間の従属性分析の一手法を提供するからでなく、属性を知識ベースのis-a階層に埋め込んだとき、まさにそれぞれの属性がどのような属性から決定されているかの従属構造が、ホーン論理と呼ばれる知識表現で決定できるからである。お互いに従属しあっている属性集合同志を等価な属性集合とみなし、縮約した骨格の構造を抽出するプロセスを経て、互いに独立な属性構造が抽出される。そのような属性構造に対して、対比較を行い、評価構造を決定していく。興味深いことに、抽出された属性構造を手掛かりに、帰納推論

を適用し、リカージョンを許容する形での洗練プロセスを繰り返すことができる。この洗練プロセスには、Shapiroのモデル推論システム [Shapiro 82] が適用可能である。

3. 属性分析法としての拡張ISMのブール方程式化

ISMの2項関係が単純頂点間において到達可能なパスとして、ビジュアルに表現されるのに注目し、拡張ISMの2項関係が複合頂点間において併存して到達可能なパスとして、ビジュアルに表現されるのに注目し、それを併存到達可能関係 [Kunifuji 79, 81] と呼ぶことにする。まず併存到達可能関係の定義を述べる。

[定義1] 与えられた有限集合 V ($\neq \emptyset, |V|=n$) の部分集合 X, Y, Z, U に対して、併存到達可能関係とは、次の1公理と1推論規則を満足する二項関係である。

- (1) $X \cup U \rightarrow X$ (射影則: projectivity)
- (2) $X \rightarrow Y, Y \cup U \rightarrow Z \Rightarrow X \cup U \rightarrow Z$ (擬似推移則: pseudo-transitivity) □

V の巾集合 2^V を頂点集合、 E ($\subseteq 2^V \times 2^V$) を辺集合とする有向グラフ $G = (2^V, E)$ を考える。この有向グラフ G に対して、複合頂点間のパス、射影的有向グラフ、閉包グラフを定義することができる。

[定義2] 複合頂点 X ($\in 2^V$) から複合頂点 Y ($\in 2^V$) へのパスとは、 $e_k = (Y_{k-1} \cup X_k, Y_k) \in E$ ($k=1, \dots, l$) を満足する頂点の系列 $Y, U X_1 (=X), Y_1, \dots, Y_{l-1}, U X_l, Y_l (=Y)$ が存在する場合の辺の系列 $e_1, \dots, e_l$ のことである。このとき生成されたパスの始点 $X = Y, U \bigcup_{k=1}^l X_k$ 、終点 $Y = Y_l$ である。

$k=1$ □

[定義3] 与えられた有向グラフ $G = (2^V, E)$ の射影的有向グラフ G^p は、頂点集合が 2^V 、辺集合が $E \cup \{(X, Y)\}$ なる有向グラフとして定義される。
 $Y \subseteq X$ □

射影的有向グラフ G^p において、 X から Y へのパスが存在することを、 $X \Rightarrow Y$ と表記する。

[定義4] 与えられた有限集合 $G = (2^V, E)$ の閉包グラフ G^* は、頂点集合が 2^V 、辺 (X, Y) が G^* の辺集合 E^* のなかに存在することと、 $X \Rightarrow Y$ とが同値となるような有向グラフとして定義される。 □

定義1より出発し、公理的アプローチにより、それらをブール代数上で形式的に取り扱う方法を示すことができる。

[補題1] 射影則と擬似推移則が成立すれば、次式で示される加法則が成立する。

- (3) $X \rightarrow Y, X \rightarrow Z \Rightarrow X \rightarrow Y \cup Z$. ■

[補題2] 任意の X, Z ($\in 2^V$) に対して、次の2式が等価である。

- (4) $Z \rightarrow X$.
- (5) $\bigwedge_{x \in X} (Z \rightarrow \{x\})$. ■

与えることを許容すると、このようなブール方程式の整合性を維持するシステムをも構築しなければならない。このような整合性維持システムの研究開発は今後の研究課題である。

〔謝辞〕本研究の一部は、第5世代コンピュータ・プロジェクトの一環として行われた。拡張ISMの共同研究者だった当研究所竹島 卓研究員に感謝する。

〔参考文献〕

[Boose 84] Boose, J.H.: Personal Construct Theory and the Transfer of Human Expertise. Proc. of AAAI'84, 1984, pp. 27-33.

[Boose 87] Boose, J.H. and Bradshaw, M.: Expertise Transfer and Complex Problems: using AQUINAS as a knowledge-acquisition workbench for knowledge-based systems. Int. J. of Man-Machine Studies, Vol. 26, 1987, pp. 3-28.

[Chikayama 84] Chikayama, T.: ESP Reference Manual, ICOT TR-044, 1984.

[Fransella 77] Fransella, F. and Bannister, D.: A Manual for Repertory Grid Technique, Academic Press, 1977.

[Hashimoto 89] Hashimoto, K., Terano, T., Sawai, S., Izumi, R., and Wakino, T.: YUAI - A knowledge acquisition tool for classification-type problem. TIMS'89, Osaka, July 1989.

[Kelly 55] Kelly, G.A.: The Psychology of Personal Constructs, Norton, 1955.

[Kunifuji 78] 國藤 進、若木利子、竹島 卓: ユーザ・ビューに基づくフィルタリング法について、電子通信学会、オートマトンと言語研究会AL78-68, Dec. 1978.

[Kunifuji 79] 國藤 進、竹島 卓: 複合頂点間の到達可能性解析、電子通信学会、信学技報CAS79-110, 1979.

[Kunifuji 81] 國藤 進、竹島 卓: ブール方程式による併存到達可能性解析、京都大学数理解析研究所講義録「情報の記憶と利用に関する理論的研究」研究集会, Feb. 1981.

[Kunifuji 86] 國藤 進、鶴巻宏治、古川康一: 仮説選定機構の一実現法、人工知能学会誌, 1-2, 228/237, 1986年12月.

[Kunifuji 89a] 國藤 進、上田晴康、須永知之、井深克憲、岩内雅直: グループ知識獲得支援システムGRAPE 構想、計測自動制御学会、第10回知識工学シンポジウム講演論文集、北海道大学, pp. 47-52, Oct. 19, 1989.

[Kunifuji 89b] 國藤 進、上田晴康、須永知之、井深克憲、岩内雅直: グループ知識獲得支援システムGRAPE における初歩知識ベース獲得機能、人工知能学会研究会資料SI

G-HICG-8903-5, pp. 41-50, Dec. 6, 1989.

[Kunifuji 90] 國藤 進、沢井 進: AHP のエキスパートシステム知識獲得への応用、計測自動制御学会主催: 特別講演会「AHP: 基本的考えから新しい応用まで」、東京工業大学, pp. 43-46, Jan. 22, 1990.

[Lenat 86] Lenat, D., Prakash, M. and Shepherd, M.: CYC: Using Common Sense Knowledge to Overcome Brittleness and Knowledge Acquisition Bottlenecks, AI Magazine, Vol. 6, No. 4, pp. 65-85, 1986.

[Saaty 80] Saaty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.

[Sawai 89] 沢井 進、橋本恵司、泉理恵子、脇野敏浩、寺野隆雄: 知識獲得ツールYUAI、情報処理学会第38回(昭和64年前期)全国大会2C-9, pp. 127-128, 1989.

[Shapiro 82] Shapiro, E.Y.: Algorithmic Program Debugging, The MIT Press, 1982.

[Takeshima 78a] 竹島 卓: 関係データベース・スキーマにおける関数従属関係のブール方程式を用いた扱いについて、情報処理学会、データベース管理システム研究会, 6-2, 1978.

[Takeshima 78b] 竹島 卓: ブール関数処理システムSyllolister、情報処理学会、記号処理研究会, 4-3, 1978.

[Tone 86] 刀根 薫: ゲーム感覚意志決定法、日科技連, 1986.

[Ueda 90] 上田晴康、國藤 進、井深克憲、須永知之、岩内雅直: 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、計測自動制御学会、第11回知識・知能システムシンポジウム、国立教育会館, Mar. 12, 1990.

[Warfield 76] Warfield, J.N.: Societal Systems, John Wiley, 1976.