

Production System を応用した医学教育・コンサルテーションシステム

MECS-AI

小山照夫 都老人研 開原成久 東大病院情報処理部

1. 序

近年の医学知識の増加には、めざましいものがあり、その結果医療はますます高度化・専門化して行く傾向にある。しかしながらその反面、一般的な医師にとっては、最新の医学知を十分に駆使しての診断・治療を行うことが、ますます困難となって来ているというのが実際である。

この問題を解決する一つの方法として、情報処理技術、なかでもコンピュータ技術を応用することにより、診断・治療にあたって医師を援助するシステムを開発することが考えられる。実際にも、このような研究が広く行われている。

情報処理技術の医学応用として、おそらく現在最も成功していると考えられるのは、文献情報検索システム、MEDLARSであろう。このシステムは、キーワードの組合せにより、主題別に医学関係文献の検索を行うもので、医師の専門知識の基礎作り、および補給の面からみて貴重なシステムである。

MEDLARSのような文献検索システムは、研究・教育の面では大きな意義を持っているが、実際の診断・治療にあたって意志決定を支援するという面からは、有効なシステムであるとは言い難い。診断・治療にあたっては、対象となる各患者の病態情報に応じて、医学知識を柔軟かつ有機的に組合せて適用して行く必用がある。このような要求に対応しようとする方向に、大きく分けて二つの方向がある。一つは、医師に対して診断なり、治療なりの提案を行うシステムであり、もう一つは、データベースの知的検索あるいは Knowledge Base と呼ばれるシステムの研究である。次節以降では、主に前者について述べるが、ここで後者について簡単なコメントを加えておきたい。診断・治療のサポートを目的とする Knowledge Base では、たとえばキーワード等による、何らかの意味で関連のある情報をすべて検索して来るのではなく、患者病態と、医師の採用する仮説に応じて、情報のランク付けをして、重要度の低い情報は切捨てた上で、重要度の順に提示する機能が必要になると考えられる。

このような検索法は、従来の情報検索方法とは大きく異なったものとなることが予想されるが、それが具体的にどのようなものとなるかについては、未だ決定的な結論は出ていないように思われる。

2. 計量診断学

診断・治療にあたって、医師の意志決定プロセスを支援することを目標として、意志決定プロセスの解析および、診断・治療にあたっての具体的提案を行うシステムの構成法の研究を目的とする、計量診断学と呼ばれる体系が形作られて来た。この分野で従来広く用いられて来た手法に統計解析、特に多変量解析の手法を挙げることができる。この分野における多変量解析は、次の二つの目的で使用されて来た。第一は、解析を目的とするもので、たとえば医師が下した診断が、主としてどのような情報要素に支配されると考えられるかを明かにしたり、予後推定の上で、どのような情報が有効と考えられるかを明かにしようとする方向である。第二には、Bays' 判別等、種々の判別分析の手法の応用により、診断をパターン認識の問題と考えて、計算機に診断を行わせたり、予後予測を重回帰分析の応用で行おうとす

る方向である。これらの研究のうち、第一の解析的アプローチは、現在までに様々な、医学上の成果を上げて来たと言えるであろう。一方第二のアプローチは、医師に具体的な提言をする、ある程度実用的なシステムを開発しようという目的に合致するものであるが、現在までの所では、実用化されたシステムは数少ないように思われる。多くの報告で、このようなシステムの能力の評価として、適当に適用分野を限定すれば、十分正確な診断結果を得ることが可能であると報告されているにもかかわらず、実用化された例の少ない理由として、このような多変量解析に基づくシステムでは、結論を導く過程が、医師の推論過程と著しく異っており、診断を導いた根拠の理解も、結果の評価も困難であって、それ故医師に了解されにくいことが挙げられる。また他の問題として、これらのシステムでは、通常そのパラメータ推定を、ある特定のサンプル（具体的には病歴）に基いて行うことになるが、それ故、システムが真に有効であると言えるのは、パラメータ推定に用いたサンプルが代表する患者集団に属すると予想される、患者データを判別する場合に限ることが挙げられる。実際問題としては、解析にかけようとするデータが、実際に特定の集団に属しているか否かの確認は、困難である。その他、一般的にこれらのシステムが、医学上よくみられる欠測値のあつかに柔軟性を欠くことも、実用面への適用を困難にしているように思われる。

最近、診断・治療におけるコンサルテーションシステムとして、人工知能の手法を応用したシステムが提案されて来ている。人工知能の医学応用としては、E. H. Shortliffe等による Production System を応用した MYCIN や、C. Klikowsky 等による Semantic Network あるいは Causal Network の応用である CASNET などがある。以下では主として Production System の応用について述べる。

3. Production System の医学応用

Production System においては、医師が経験的に得た知識や、広く一般に認められた知識を、複数の、形式的に独立したルールの形で定式化し、患者の病態に応じてルールを適用することによって、意志決定を行う。この時、医学情報・医学知識が、しばしばあいまいな性格を有することから、定理証明等で用いられる Production System と異り、あいまいさの処理も可能となるような配慮がなされている。この手法の一つの大きな利点は、意志決定の過程が医師にとって、著しく理解しやすくなり、また仮に誤った結論が導かれた場合にも、推論過程の再検当によって、誤りを導いたルールを発見し、修正することが可能である点である。このような Production System の特徴と、統計的手法、特に多変量解析による推定との比較を第一図に示す。筆者等は、Production System による医学推論に興味を持ち、特に MYCIN の方法論を利用して、心臓病診断と心不全治療を対象に、MECS-AI (Medical Education and Consultation System by Means of Artificial Intelligence) と呼ぶプログラムを開発し、現在実験を行っている。以下では、

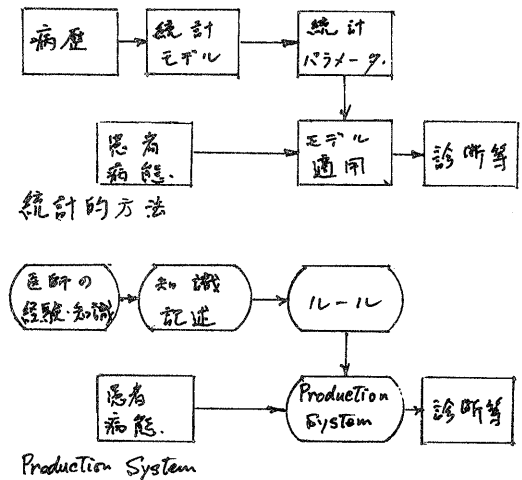


図-1

た場合にも、推論過程の再検当によって、誤りを導いたルールを発見し、修正することが可能である点である。このような Production System の特徴と、統計的手法、特に多変量解析による推定との比較を第一図に示す。筆者等は、Production System による医学推論に興味を持ち、特に MYCIN の方法論を利用して、心臓病診断と心不全治療を対象に、MECS-AI (Medical Education and Consultation System by Means of Artificial Intelligence) と呼ぶプログラムを開発し、現在実験を行っている。以下では、

M E C S - I の基本構造を、その手本とした M Y C I N の基本構造の説明によって概説し、続いて M E C S - I において追加した機能について説明する。

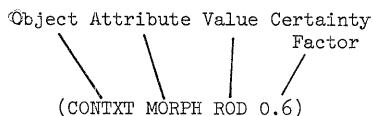
3-1. M Y C I N

M Y C I N は Stanford 大学において開発された、病原菌感染症の診断・治療の援助を目的とするシステムで、対話形式でシステムから要求される情報を入力して行くことにより、病原菌同定結果と治療のための抗性物質リストを出力して来るシステムである。

M Y C I N ではあいまいさを含む情報を

図二に示すような quadtuple で表現している。

この quadtuple によって、ある対象 (Object) のある属性 (Attribute) が特定値 (Value) を取る確からしさ (Cir-



tainty Factor C F) が表現できることが

図-2

示される。ここで C F が情報のあいまいさを表

すファクターであり C F = +1 の時情報は真であり、 -1 の時偽、 0 の時真偽決定不能、中間の値の時あいまいな情報であることを表す。

M Y C I N の基本データは医師から直接採取した、簡単な形のルールの集合である。図三は M Y C I N で用いられるルールの例である。ルールはシステム内では L I S P - S 式の形で表現されているが、ユーザに示される場合には簡単な英語表現に変換される。

ルールは条件部と結論部から成立っており、結論部にはルールが表す知識のあいまいさを示すパラメータが用意されている。図三で .6 という数値がこのパラメータであり、条件部が真である時の結論部の確からしさを示す意味で、やはり Certainty Factor と呼んでいる。一般にはルールは、あいまいな情報に適用されるため、条件部全体の確からしさを代入するための特別な変数 T A L L Y が用意されている。

```
IF: 1) THE STAIN OF THE ORGANISM IS GRAMNEG AND
     2) THE MORPHOLOGY OF THE ORGANISM IS ROD AND
     3) THE AEROBICITY OF THE ORGANISM IS ANAEROBIC
```

```
THEN: THERE IS SUGGESTIVE EVIDENCE(.6) THAT THE
       IDENTITY OF THE ORGANISM IS BACTEROIDES
```

```
PREMISE: ($AND (SAME CNTXT GRAM GRAMNEG
                 (SAME CNTXT MORPH ROD)
                 (SAME CNTXT AIR ANAEROBIC))
ACTION : (CONCLUDE CNTXT IDENT BACTEROIDES TALLY .6)
```

図-3

ルールにおけるあいまいさの計算は、条件部の持つ C F の最小値で条件部の確からしさを代表させる場合と、最大値で代表させる場合とがあり、あいまい演算 \$ AND または \$ OR によって両者の選択を行っている。このようなあいまいな情報から得られる結論の確からしさは、条件部全体の確からしさに、条件部が真である時の結論部の確からしさを乗じたものになると考える。以上のことを定式化して示せば次のようになる。あいまい演算 \$ AND を使い、条件 $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}$ から結論 $H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{im}$ を導くルール R_i

$$R_i : \$ AND (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}) \rightarrow H_{i1}CF_{i1} \otimes H_{i2}CF_{i2} \otimes \dots \otimes H_{im}CF_{im}$$

ここに各 P_{ij} は実際にはあいまいさを含む情報であり、ルール適用の際に、確からしさ CF_{ij}

であると求められる。また CF_j^a は条件部が真の時の各結論部の確からしさを表す。ここで $CF_{min}^p = \min_j CF_j^a$ と置く。MYCIN では、 CF_{min}^p があらかじめ設定された値 CF_{th} より大きい場合に、各結論の確からしさが $CF_{min}^p \times CF_j^a$ になるとしている。

MYCIN ではあいまいさを許すルールを採用しているため、同一の結論が複数のルールにより、異なる確からしきで結論される場合がある。今仮に一つのルールにより、ある情報の確からしきさが CF_1 であると結論され、同時に他のルールにより、同じ情報の確からしきさが CF_2 であると結論された場合を考える。MYCIN ではこのような時、ルールが相互に独立であるとして、全体として得られる確からしきさを

$$CF = 1 - (1 - CF_1) (1 - CF_2) = CF_1 + CF_2 (1 - CF_1) \quad \text{式 2}$$

とする方法を採用している。(ただ厳密には、この演算は少し異ったレベルで行われる。詳しくは文献4を参照) ただしこの演算は、あいまい論理と確率論の使い分けにやや混乱があるようにも思われる。

MYCIN の推論は Production System によってルールを適用して行くことによって実現される。Production System は概念的には図四に示す二つの手続の間の、再帰的相互起動過程であると考えることができる。システムは、Proc1 にゴールと呼ぶ目的を与えてやることによって起動される。Proc1 は与えられた目的達成のために適用可能なルールの組を選び出し、ルールを順々に適用して行く。ルールの適用にあたっては、まず Premise 部の評価が必要となるが、Proc1 はまず Premise 部の評価に必要な情報がそろっているか否かの確認を行う。情報がそろっていればルールの適用に入るが、もし不足しているなら、現在のルール適用を中断して、必要情報項目を指定して Proc2 を起動する。Proc2 は指定された情報が、ユーザに対する問合せによって得られるか、ルール適用によって求められる

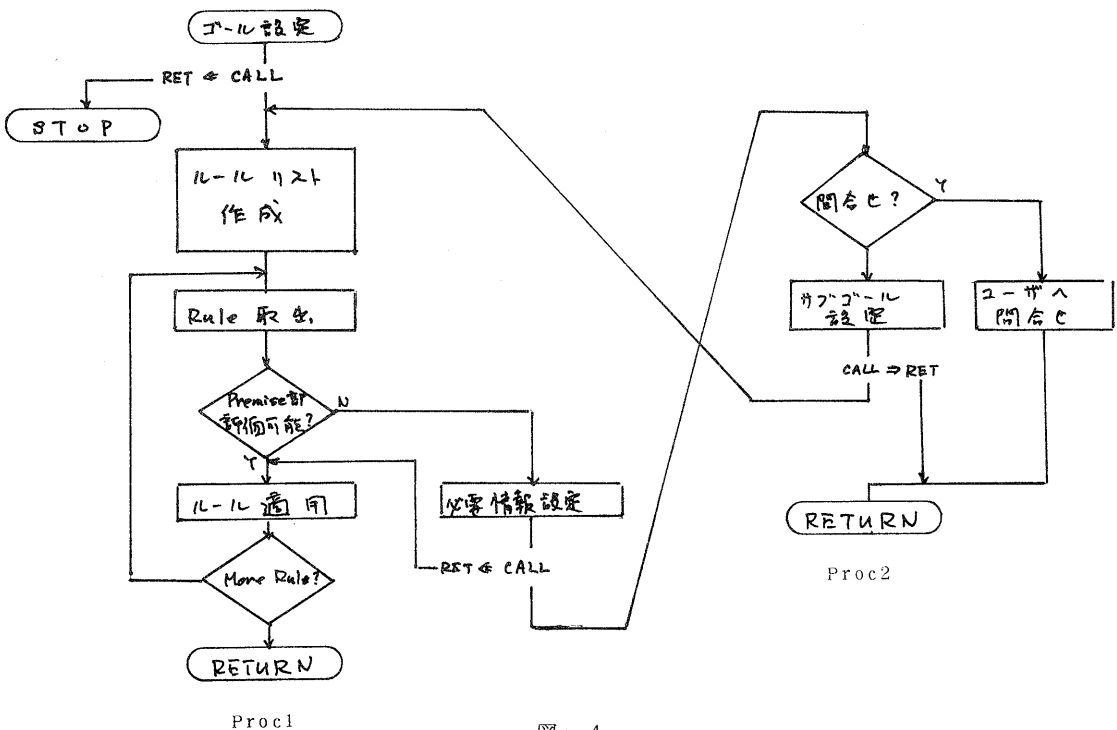


図 - 4

かを判定し、問合せによって得られる場合には対話形式で実際にユーザに問合せを行うし、ルール適用によって求める場合には、求めるべき情報の決定をサブゴールの形で与えて Proc1 を再帰的に起動する。このようなプロセスの繰返しにより、最終的に、最初に与えられたゴールが達成されれば全プロセスが終了することになる。

MYCIN の大きな特徴の一つに、その推論プロセスを理解しやすい形で提示できる点を挙げるができる。この機能を実現するため、MYCIN では、推論（あるいはルールの適用）過程を記録しておき、要求に応じて推論過程を提示する機能を用意している。ユーザはシステムに対して、推論継続中または推論終了後に推論過程の問合せを行うことができる。ここではこのような問合せの簡単な一例を挙げておく。システムが Proc2 を通じて、ユーザに問合せをして来た時、ユーザはこの質問に直接答えず、逆に WHY という質問を出すことができる。この時 Proc2 からの質問は、Proc1 が適用しようとした、あるルールの条件部評価のために必要とされる情報の問合せになっているはずである。Proc1 が適用しようとしているルールが、第1式で定式化された R_i であり、条件 $P_{i1} \sim P_{ik-1}$ については概に CF の評価が終了し、 P_{ik} の評価のために問題となる情報が必要であるとする。この場合、問合せ WHY に対するシステムの解答は次のようなものである。

- 1) 条件 $P_{i1} \sim P_{ik-1}$ について CF を評価した。
- 2) R_i によれば
- 3) 条件 $P_{ik} \sim P_{im}$ について CF が所定の条件を満足すれば
- 4) 結論 $H_{i1} \sim H_{im}$ を実行できる。

ところで、もし R_i が最初に与えられたゴールを直接達成するルールではない時、それは途中で設定されたサブゴール達成のためのルールになっているはずである。そして、 R_i の結論 $H_{i1} \sim H_{im}$ の少なくとも一つはそのサブゴールに関係を持っており、さらにサブゴールを要求している、一段階前のルール R_j が存在するはずである。このような場合には、再度繰返して WHY を入力することができ、 R_j に関する情報を得ることができる。またユーザは、WHY に対する解答1)の中に見られるような、概に CF が決定している情報項目について、HOW という質問により、いかにして CF を決定したかに関する説明を求めることができる。この場合のシステムの解答は、CF 決定に利用したルールの説明であるか、またはユーザへの問合せに基づくものであるとの説明かいずれかである。

3-2. MECS-AI

筆者等は、Production System による推論の医学応用の有効性を検討する目的で、東大病院情報処理部などにおいて、MECS-AI と呼ぶプログラムの開発を行っている。このプログラムは主要な点では MYCIN と同様な考え方を採用しているが、主に適用分野の差に起因する、次の機能追加を行っている。

- 1) 得られた病名に対する情報の逆チェック
- 2) 患者に対する負担が大きかったり、コストが高かったりする検査を、他の検査のみでは十分な CF が得られず、かつその検査の実行によって CF の向上が期待できる場合に限って実行する機能
- 3) 実際に行った治療とその効果を考慮して次に行うべき治療法を決定する機能

図五に MECS-AI の制印の流れを示す。まず第一に Production System によって

病名決定が行われるが、このプロセスにおけるシステムへの情報入力、医師の負担を軽減する意味で、当初医師が注目したデータのみを入力する方法を採用している。しかしながら、実際の医師の診断過程においては、一つの候補病名を思いつくと、それに関連して以前には考慮しなかったデータに注目し、診断の検証を行おうとすることにより、重要なデータの見落としを防止する作業が含まれている。このような検証を行わせる目的で、推論の結果得られた候補病名に対する確認項目リストが用意されており、データ入力もれがないかをチェックしている。このチェック機能が第一の特徴である。チェック終了後、病名決定が十分大きい CF で行われているか否かの検討が行われ、CF が小さい場合には、血管造影などの検査を行うことが適当か否かが検討される。これが第二の特徴である。すべての検討が終了すると、再び Production System の適用により、治療法の決定が行われる。治療法決定が完了した段階で、ユーザは次の治療法の検討を行うか否かを指定できる。次の治療法を行わない場合には、そのままプログラム終了となり、決定を行う場合には、実際にユーザが行った治療とその結果生じた病態変化を入力することによって、次に行うべき治療法の決定が行われる。これが第三の特徴である。

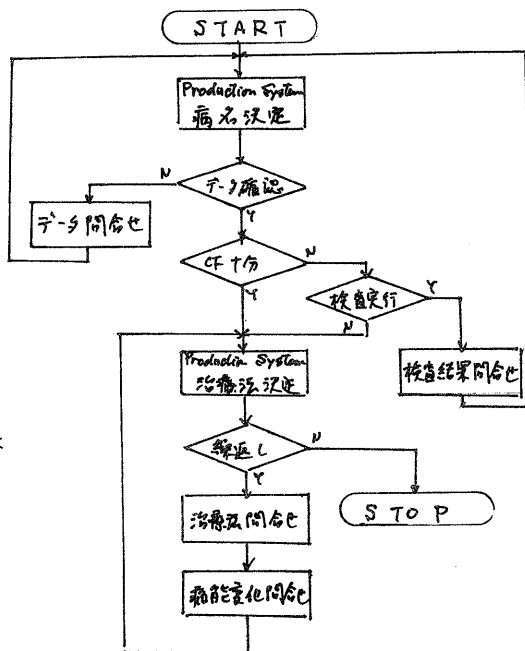


図 - 5

4. 人工知能と計量診断

従来計量診断の分野では、Bays¹ 判別を代表とする多変量解析の応用によって、診断を計算機に行わせたりする試みが数多くなされて来た。これらの研究の多くのものでは、たとえば相当数の変量の分布を、特定サンプルから推定し、別のサンプルセットに対して、ただ一段階で終了する診断を行っている。これに対して人工知能、特に Production System の応用による診断論理では、推論は、比較的少数の変量に基く、形式上相互に独立した多数のルールの多段階適用によって実行される。このような Rule Based Production System の特徴として次のものを挙げる事ができよう。

- 1) 少変量に基くルールは、それ自体の意味が理解しやすく、真偽判定が容易である。
- 2) 適用するルールセットの変較により、システム挙動を変えることができる。
- 3) データと結論との間に中間概念を 入できる。

多変量判別分析の多くでは、全くこの逆が成立つのであって、診断プロセスの理解を困難にするとともに、患者病態に適應させた柔軟なシステム運用を困難にしている。一方、Production System の問題点として、次のものを挙げる事ができる。

- 1) 患者病態に適應してルールセットを選択する、一般的手法が確立されているとは言いにくい。

2) 選び出されたルールセット内のルールが、全体として冗長性や矛盾を持つか否かの判定が困難である。

1) に関して、R. Davis は Meta Rule の概念を提案しているが、たとえば、いかにして適合性のある Meta Rule を構成するかについては、必ずしも明確ではないように思われる。また 2) に関して筆者等は、ルールの矛盾・冗長性検出のため、ルールセット内のルール相互関係をネットワークで表現することを検討している。ネットワーク内に閉ループが存在するならば、それに関連するルールは、矛盾または冗長性を持つ可能性がある。ただし、利用する Production System があいまいさを許していることから、構造上の冗長性なり矛盾なりが、ただちに問題とならない可能性もあり、更に検討の必要がある。

一般に、計算機に診断を行わせる場合に、その評価基準として、一定数のテストサンプルに対する診断結果を、専門医の診断結果と比較して、その一致度によって性能の指針とすることが多く行われる。ただ、筆者の個人的感想としては、具体的に実際の患者に対して診断を行うシステム評価に、診断精度のみを取上げるのは、いくぶん片手落ちの感をまぬがれない。もちろん診断精度が高いことは、それ自体好ましい性質であるし、また計算機診断がどの程度の診断精度を達成できるかは、この分野の大きな研究課題でもある。しかしながら、実際の患者治療にあたっては、安全側の処置といったもの、たとえば診断が微妙である場合に、とりあえず安全側の処置をしておき、しばらく様子を見るなどといったことも必要ではないだろうか。

人工知能の手法の魅力は、なんとと言ってもその推論過程が説明可能であることに基く、医師への説得性と、状況に応じた柔軟なシステム運用が可能となることである。人工知能の医学応用はまだ歴史も浅く、今後検討すべき点もまだ多いが、それだけに可能性も大きく、魅力的な分野であると言えよう。

参考文献

- 1) 小山・開原：情報処理技術を応用した医師への援助—特に人工知能の手法の応用について
システムと制御 22-5
- 2) 小山・他：人工知能 (I) の手法による診断のコンサルテーション
情報処理学会第19回全国大会
- 3) 開原・他：人工知能 (I) の手法 (特に Production System) を用いた
診断・治療のコンサルテーション
医用電子と生体工学 17-1
- 4) E. H. Shortliffe: Computer-based medical consultation, M Y C I N ,
Elsevier Computer Science Library