

船用機關에 있어서의 故障診斷 SYSTEM에 관한 研究

柳 吉 洙

A study on the fault diagnostic System of Marine Engines

Keel-Soo Rhyu

< 目 次 >

Abstract	2.3 確實度の 適用
1. 序 論	2.4 知識의 削除, 追加, 修正
2. 知識表現의 基本的 構造	3. 推論機構
2.1 事實의 概念에 對한 表現	4. 結 論
2.2 事實間의 規則에 對한 表現	參考文獻

Abstract

In order to keep the safety of automatic ships, it is required that ship automation systems find the factors of marine engine troubles faster and recover them immediately.

Recently, expert systems in artificial intelligence perform complex tasks demanding a large corpus of expertise. To construct such a system, a knowledge engineer must extract domain specific knowledge from a human expert, and augment the knowledge base of the computer program with it.

In this paper, we examine whether expert systems are available to be applied to ship automation systems.

To deal with the special domain problem of knowledge engineering, representation of knowledge is very important. We use the data structure based on the frame model and production rules to represent knowledge.

Further, we show that the knowledge is useable for the diagnosis of marine engines by using the backward reasoning to analyze the cause and the forward reasoning to find the result.

1. 序 論

現在 船舶의 運航經濟性을 追求하기 위해서 에너지節約化 및 自動化에 관한 研究가 推進되고 有

으며, 少人員運航의 「超合理化船」에 對한 檢討도 行하여지고 있다. 이러한 面에서 船舶機關에 對한 信賴性은 船舶運航의 生命이라고 할 수 있다. 따라서 機關의 故障에 對한 豫測診斷과 이것에 對處하는 自動措置에 關한 研究가 從來부터 着手되어 왔던 것이다.¹¹⁻¹³⁾

本 研究에서는 船舶의 故障診斷을 最近 活發하게 研究되고 있는 人工知能 (Artificial Intelligence; 以下 AI로 칭함)의 應用分野인 知識工學(Knowledge Engineering)에 適用하고자 시도했다. 知識工學의 特徵中の 하나는 特定分野에 對해서 專門家的인 判斷知識을 손쉽게 얻을 수 있으며, 또한 此 시스템이 簡單하게 利用手段을 提供해줄 수 있다는 利點이 있다. 이러한 知識工學에 있어서 大部分의 시스템은 Production Rule(以下 PR로 칭함)을 使用한 Production System(以下 PS로 칭함)⁶⁾으로 構成되어 있다. 本來 PR은 AI의 分野에서 開發된 것이 아니고 Post에 의해 組合問題의 Formal Reduction의 理論⁷⁾으로서 提案되었던 것이지만, AI의 研究가 推論中心으로부터 知識中心의 研究로 方向을 轉換하기 시작함과 同時에 AI의 시스템에 利用되기 시작했던 것이다. DENDRAL⁸⁾, MYCIN⁹⁾, EXPERT¹⁰⁾, OPS¹¹⁾, MECS-AI¹²⁾, RI¹³⁾, PRODOG²⁰⁾ 등의 시스템이 그 代表的인 例이며, 이들은 知識表現을 PR 즉 IF-THEN 規則으로 統一함에 따라 知識에 對한 理解가 쉬우며 知識表現의 定義, 變更, 擴張이 容易하고, 推論機構(Inference Engine)로서도 完全한 構造를 形成할 수 있는 등 柔軟性이 豊富한 시스템이 될 수 있기 때문이었다. 즉 이것은 시스템의 遂行能力을 높이는데 重點을 두고 開發한 결과였다.

이것을 Software 構造의 面으로부터 보면 Knowledge Base(以下 KB로 칭함)와 推論機構로 構成되어 있으며, 이 兩者가 相互獨立된 機能을 가지고 있다. 또한 시스템의 性能面으로부터 評價해 보면 KB는 知識의 定義 및 保存과 함께 容易하게 追加·變更될 수 있어야 하며, 하나의 推論機構를 利用하고, 또한 KB內의 知識을 交替함에 따라 여러 種類의 問題解決(Problem Solving)이 可能하게 되어야 한다. 그러나 KB를 단지 PR에만 依存하게 되면 規則의 數가 增加함에 따라 즉 大規模시스템으로 發展함에 따라서 規則間의 相互關係, 또는 全體의 構造를 把握하기가 어려워지고 推論에 關해서도 柔軟性이 缺如된다.

이러한 缺點을 解決하기 위하여 많은 研究者가 Minsky의 프레임理論(Frame Theory)¹⁴⁾에 바탕을 둔 프레임型시스템(Frame-based system)으로 데이터構造를 形成하고, PR에는 變數를 包含시켜 規則數를 減少시킴에 따라 보다 柔軟한 시스템으로 만들며 또한 시스템 自體가 學習할 수 있도록 하는 方法에 對해서 研究해 왔다.^{11), 13), 19)}

이러한 研究도 研究者의 判斷과 見解에 따라 또는 시스템의 使用目的에 따라서 크게 달라진다. 本 研究에서는 以上の 方法을 어떻게 利用하는 것이 船舶機關을 表現하는데 適切한가를 보이고, 表

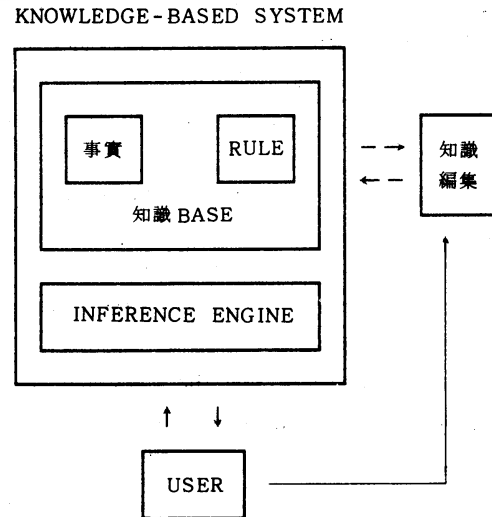


Fig. 1 Constitution of the System.

現한 知識을 基礎로 하여 機關故障診斷을 위한 推論機構를 作成하는데 그 目的을 두고 있다. Fig. 1 은 本 시스템의 構成을 나타낸 것이다.

2. 知識表現의 基本的 構造

知識中心型시스템을 開發하는 경우에 있어서, 知識의 表現形式에 의해 시스템의 性格, 또는 能力이 크게 影響을 받기 때문에 知識을 어떻게 表現할 것인가 하는 問題가 가장 重要하다. 그러므로 知識表現의 模型을 設計할 때에는 다음과 같은 點에 重點을 두어야 한다.

- i) 表現力: 어떠한 知識을 獲得해야 할 것인가 獲得한 知識을 어떻게 解釋하여 活用할 것인가 하는 메타知識(Meta-Knowledge)에 對한 表現.
- ii) 柔軟性: 새로운 知識의 設定, 既存하고 있는 知識의 變更이 容易하고 擴張성이 豊富하도록 하기 위해서는 一貫된 知識表現方式이 要求된다.
- iii) 構造化力: 知識의 適切한 管理, 維持, 活用을 위해서는 體系的이고 階層的으로 表現할 수 있는 能力이 要求된다.

이러한 意味에서 本 시스템에서는 KB를 데이터베이스(Data Base)와 規則베이스(Rule Base)로 構成하여, 데이터베이스에는 프레임형으로 데이터構造를 위한 事實의 集合을, 또한 規則베이스에는 PR을 利用한 規則의 集合을 貯藏하기로 한다.

2.1 事實의 概念에 對한 表現

데이터構造는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 프레임에 關連있는 情報, 즉 對象의 具體的인 性質을 그 프레임의 構成要素에 記入함으로써 對象의 概念을 階層的으로 나타내고 있다. Fig. 3이 이와 같은 階層的構造를 利用하여 主機關과 主機關用 자켓트冷却水を 表現한 例이다.

```

<data-structure> ::= (<data-structure 名> {<context>})
<context>      ::= (<context 名> {<attribute>})
<attribute>   ::= (<attribute 名> (<data-type>) ({<value>}))
<data-type>   ::= data | unique-data | numerical-data
<value>       ::= <data 名> | (<min-max><numerical>)
<min-max>    ::= min | max
<attribute 名> ::= a-kind-of | purpose-of | cause-of | part-of |
                    condition | state | make-from | pressure |
                    temperature
    
```

* The item enclosed by braces may appear zero or more times.*

Fig. 2 Data-Structure of Frame Model by BNF Representation Method.

이와같이 Fig. 2에 있어서의 “DATA-STRUCTURE 名”으로는 “ENGINE”, “ELECTRIC” 등으로 大別했으며 “CONTEXT 名”으로는 機器名 등, 그 對象을 階層的으로 表現할 必要性이 있는 것으로 分

```

(engine .
.
.
  (main-engine
    (a-kind-of (data) diesel-engine)
    (purpose-of (data) rotate)
    (cause-of (data) diesel-oil fuel-oil air)
    (state (unique-data) stop run)
    (condition (unique-data) normal abnormal)
    (part-of (data) cylinder piston . . .))
.
.
  (main-engine-jacket-cooling-water
    (pressure (numerical-data) ($min +2.0) ($max +2.5))
    (temperature (numerical-data) ($min +50.0) ($max +70.0))
    (condition (unique-data) normal abnormal))
.
.
.
)

```

Fig. 3 Example of Data-Structure for Ship model.

類했다. 또한 “ATTRIBUTE 名”으로는 “a-kind-of”, “purpose-of”, “cause-of”, “state”, “condition”, “make-from”, “part-of”, “pressure”, “temperature”로 分類하여 對象의 概念을 表現했고, “VALUE 名”의 경우에는 그 값의 特性에 따라 3 種類로 나누었으며 그 特性值를 “ATTRIBUTE 名”과 “VALUE 名”의 사이에 “data”, “unique-data”, “numerical-data”로 表示했다. “VALUE 名”이 複數의 데이터틀 가질 수 있는 경우에는 그 特性值로서 “data”를 使用하고, “VALUE 名”이 複數의 데이터中에서 하나의 데이터만을 選擇해야 되는 경우, 例를 들어 主機關의 狀態는 “stop, run”中에서 하나의 狀態이어야 하기 때문에 이와같은 경우에는 그 特性值로서 “unique-data”를 使用했다. 또한 “VALUE 名”이 數值인 경우에는 그 特性值로서 “numerical-data”를 使用했다. 즉 “ATTRIBUTE 名”이 “state”, “condition”의 경우에는 “VALUE 名”의 特性值로서 “unique-data”를, “ATTRIBUTE 名”이 “pressure”, “temperature”의 경우에는 “VALUE 名”의 特性值로서 “numerical-data”를, 그리고 “ATTRIBUTE 名”이 “a-kind-of”, “purpose-of”, “cause-of”, “makefrom”, “part-of”의 경우에는 “VALUE 名”의 特性值로서 “data”를 各各 使用했다.

以上과 같이 프레임모델 表現方式을 應用하여 船舶機關의 概念을 階層的으로 構造化할 수 있었다.

2.2 事實間의 規則에 對한 表現

事實과 事實間의 規則을 表現하기 위하여 經驗에 의해서 얻은 知識이나 一般的으로 널리 알려진 事實을, PR 을 利用하여 表現하기로 한다.

一般的으로 PR 은

IF situation THEN action

IF condition THEN conclusion

으로 表現되며 IF 部(條件節)와 THEN 部(結論節)로 大別할 수 있다.

Fig. 4 는 事實間의 規則을 表現하기 위하여 本 시스템에서 使用한 方法으로, BNF 表現方式에 의

```

<rule> ::= <premise-part><action-part>
<premise-part> ::= <condition> | <connect-function><premise-list>
<connect-function> ::= $ AND | $ OR
<premise-list> ::= <premise-part> | <premise-part><premise-list>
<condition> ::= <function><context><attribute><value>
<action-part> ::= <action> | <action><action-part>
<function> ::= $ SAME | $ HIGH | $ LOW
<action> ::= <context><attribute><value>
    
```

Fig. 4 Syntax of Rule by BNF Representation Method.

하여 나타낸 것이다. 즉 1個以上の 條件要素를 가진 條件節을 構成하기 위하여 「AND/OR tree」를 利用했으며, 結論節에 1個 以上の 要素가 存在할 경우에는 全要素가 個別的으로 實行되는 것으로 간주하여 단지 리스트形態를 취하였다. 이 중에서 條件節의 條件要素는 “\$HIGH”, “\$LOW”, “\$SAME”과 같은 函數와 “CONTEXT名”, “ATTRIBUTE名”, “VALUE名”으로서 構成되어 있으며, 結論節의 要素는 “CONTEXT名”, “ATTRIBUTE名”, “VALUE名”, “CF(Certainty Factor; 以下 確實度로 칭함)”로 構成되어 있다.

```

(( $or ( $same main-lubricating-oil pressure abnormal )
        ( $same main-lubricating-oil temperature abnormal ) )
   ( main-lubricating-oil condition abnormal cf1 ) )
    
```

Fig. 5 Example for the Rule of Main-Engine-Lubricating-Oil.

Fig. 5는 主機關의 潤滑油系統이 非定常狀態의 경우에 對한 規則을 以上の 表現方式에 의하여 階層的으로 表現한 例이다. 이와같이 PR에 基礎를 두고 知識을 表現하는 것은 그 表現을 統一化할 수 있기 때문에 推論機構를 簡單하게 만들 수 있다는 長點과 各種 說明機能 및 學習機能을 實現하기 쉽다는 利點이 있다.

2.3 確實度の 適用

知識을 利用한 推論에서는 推論에 使用된 事實과 結論된 事實이 어느 程度로 確實性이 있는가 하는 確實度の 問題가 再起된다. 이것은 不必要한 探索을 省略할 수 있는 重要한 問題이며, 어느 程度까지 實行速度를 單縮시킬 수 있는가 하는 問題이기도 하다. 例를 들어 Fig. 5에서는 潤滑油의 壓力과 溫度의 非定常狀態의 程度에 따라서 潤滑油가 어느 程度의 非定常狀態인가 하는 確實도가 다르게 될 것이다. 이런 點에서 確實度を 考慮하는 것은 반드시 必要하다고 생각된다.

本 研究에서는 完全肯定에 對한 事實의 確實도를 CF=1로, 完全否定에 對한 事實의 確實도를 CF=-1로, 그 외의 경우에는 事實의 確實性에 따라 中間值를 選擇하였다.

지금, 2個의 事實을 e1, e2라고 하면

i) 論理積(AND)의 경우에는

$$e1 \wedge e2 \Rightarrow \min\{CF(e1), CF(e2)\}$$

ii) 論理和(OR)의 경우에는

$$e1 \vee e2 \Rightarrow \max\{CF(e1), CF(e2)\}$$

로 表現된다.

Fig. 5는 IF~THEN{(結論)·(結論의 實行度)}와 같이 記入되어 있기 때문에 1個의 規則에 對한 全體의 確實度 CF는 다음과 같이 定義된다.

$$CF = (\text{條件節의 確實度}) \times (\text{結論의 實行度})$$

또한 하나의 情報의 確實도가 1個의 規則으로부터 CF1이라고 結論됨과 同時에 다른 規則으로부터는 CF2로 結論되었다고 하면 Bayes의 定理¹⁵⁾를 利用하여 全體의 確實도를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$CF = CF1 + CF2(1 - CF1)$$

本 시스템에서는 “VALIDDATA”函數가 以上の 方法을 利用하여 作成되어 있다.

2.4 知識의 削除, 追加, 修正

2.1, 2.2에서는 KB內의 知識表現의 定義에 對하여 記述했다. 그러나 狀況에 따라서는 그 知識을 變更해야 하며, 最初에 入力한 知識의 表現이 部分的으로 잘못되었을 경우에도 쉽게 變更되어야만 한다. 이와같이 知識의 削除, 追加, 修正이 容易하게 實行될 수 있는 시스템이 바람직하다고 할 수 있을 것이다.

本 시스템에서는 知識의 削除機能으로서 “DLTDT”, “DLTRULE”函數가, 追加機能으로서 “ADD-DT”, “ADDRULE”函數가, 修正機能으로서 “EDITDT”, “EDITRULE”函數가 各各 定義되어 있다. 또한 規則베이스의 變更은 確實성을 기하기 위하여 利用자가 데이터베이스에 存在하지 않는 “CONTEXT名”, 또는 “ATTRIBUTE名”을 入力했을 경우 入力不正을 表示하고 再入力を 要求할 수 있도록 構成되어 있다.

3. 推 論 機 構

推論機構는 KB內의 知識을 利用하여 推論을 遂行하면서 問題解決을 實行하는 機能으로서 KB와는 獨立되어 있지만, 兩者가 相互密接하게 關連되어 있기 때문에 知識을 어떻게 表現했는가에 따라서 推論機構도 크게 달라진다.

本 研究에서는 中間假說을 設定하여 結論 즉 結果를 향하여 探索을 行하는 前方推論方式과 事實 즉 原因을 향하여 探索을 行하는 後方推論方式으로 推論機構를 構成하였다. 또한 探索 도중에 各 데이터가 어떻게 해서 決定되었는가를 記錄하여 利用자의 質問에 따라 應答할 수 있도록 說明機能을 追加했다.

本 시스템의 알고리즘(Algorithm)은 다음과 같이 構成했다.

1) INITIALVALUE에 初期值를 設定한다.

例를 들어 機關이 定常적으로 作動되고 있다면 各 部屬펌프 등의 狀態, 壓力, 溫度 등이 定常

狀態로 記入될 것이다.

2) HYPOTHESES에 現在의 焦點이 되는 狀態를 設定한다.

예를 들어 主機關이 停止되었다면 “(main-engine state stop)”이 記入된다.

3) 前方推論의 경우

3·1) 假說이 條件節에 存在하는 規則 R(s)를 確實度の 順序에 의하여 選擇한다.

3·2) R(s)의 條件節의 條件要素가 1個, 또는 “\$OR”에 의하여 複數의 條件要素로 結合된 경우에는 結論節이 즉시 推論된다.

3·3) R(s)의 條件節이 “\$AND”에 의하여 複數의 條件要素로 結合되어 있으면 條件要素가 INITIALVALUE에 存在하는가를 調査하여, 存在하지 않는 條件要素에 關하여 利用者에게 質問한다. 條件節의 全要素가 滿足되면 結論節이 推論된다.

3·4) 推論된 結論節이 RULEUSED에 存在하면 프로그램을 停止시키고, 存在하지 않으면 貯藏한다.

3·5) INITIALVALUE에 存在하지 않으면 貯藏함과 同時に 그 事實의 反對狀態를 除去한다. 이 反對狀態를 除去하는 作業은 “ATTRIBUTE名”이 “condition”, “state” 즉 “VALUE名”의 特性值가 “unique-data”의 경우에 한하며, “ATTRIBUTE名”이 “pressure”, “temperature” 즉 “VALUE名”의 特性值가 “numerical-data”인 경우에는 단지 그 값을 交替하면 된다.

3·6) 推論된 結論節을 變數로 하여 3)을 實行한다.

4) 後方推論의 경우

4·1) 假說이 結論節에 存在하는 規則 R'(s)를 確實度の 順序에 의하여 選擇한다.

4·2) R'(s)의 條件節이 1個, 또는 “\$AND”에 의하여 複數의 條件要素로 結合되어 있으면 全要素가 推論된다.

4·3) R'(s)의 條件節이 “\$OR”에 의하여 複數의 條件要素로 結合되어 있으면 條件要素를 各 區分하여 推論을 實行한다.

4·4) 推論된 條件節의 條件要素가 RULEUSED에 存在하면 프로그램을 停止시키고, 存在하지 않으면 貯藏한다.

4·5) 3·5)를 實行한다.

4·6) 推論된 條件要素를 變數로 하여 4)를 實行한다.

위의 알고리즘에서 RULEUSED變數는 利用된 規則을 貯藏하기 위한 變數이며, 데이터가 어떻게 해서 구해졌는가 對答할 수 있는 說明機能에 利用되기도 하며 不必要하게 探索이 反復되는 것을 防止하는 強力한 變數로써 利用된다.

說明機能을 위해서 本 시스템에서는 “WHY”와 “HOW”函數가 準備되어 있으며, “WHY”函數는 原因을 分析하기 위하여 後方推論을 행하고, “HOW”函數는 結果를 發見하기 위하여 前方推論을 행한다. 主機關이 停止된 狀態에 있어서 “WHY”와 “HOW”函數에 의한 探索의 簡單한 診斷例가 Fig.6에 表現되어 있다.

```
>(diagnose)
  Please give me the current state
>State of main-engine is stop.
  Yes, I see.
>Why state of main-engine is stop?

  What is state of starting-lever?
    :run-position
  What is state of cooling-sea-water-pump?
    :on
  What is pressure of cooling-sea-water?
    :normal
  What is pressure of main-lubricating-oil?
    :3.0
  What is temperature of main-lubricating-oil?
    :40.0
  What is state of fuel-oil-service-tank?
    :normal
  What is state of fuel-oil-booster-pump?
    :off
    Off state of fuel-oil-booster-pump deduced
    abnormal pressure of fuel-oil.
    Abnormal pressure of fuel-oil deduced
    abnormal condition of fuel-oil.
    Abnormal condition of fuel-oil deduced
    stop state of main-engine.

  What is pressure of jacket-cooling-water?
    :2.0
  What is temperature of jacket-cooling-water?
    :60.0

    Off state of fuel-oil-booster-pump deduced
    stop state of main-engine.

>How is by stop state of main-engine?

  Stop state of main-engine deduced
  stop state of shaft.
  Stop state of shaft deduced
  stop state of propeller.
  Stop state of propeller deduced
  stop state of ship.

>end

  Thanks, see you again.
```

Fig. 6 Example executed by Backward Reasoning and Forward Reasoning.

4. 結 論

以上과 같이 本 研究에서는 船舶의 機關을 相對로 하여 故障診斷을 遂行하는 시스템에 關한 構成 및 諸機能을 紹介했으며, 本 시스템을 UTILISP 言語로 作成하여 檢討하였다.

프레임理論을 基礎로 한 데이터構造는 船舶對象의 知識을 階層的으로 表現할 수 있었으며 “ATTRIBUTE名”으로 使用한 “a-kind-of”, “purpose-of”, “cause-of”, “part-of”, “make-from”, “state”, “condition”, “temperature”, “pressure” 등은 船舶機關에 對한 概念을 充分히 表現할 수 있다고 생각된다. 또한 “VALUE名”의 特性을 나타내기 위하여 使用한 “data”, “unique-data”, “numerical-data”는 그 概念을 더욱 特徵지을 수 있었으며, 知識의 定義, 變更, 修正 등에도 有用하게 利用될 수 있었고, 探索할 때에도 PR과 相互關連하여 시스템의 實行速度를 單縮시킬 수 있었다.

또한 事實問의 規則을 나타내기 위한 知識表現에는 「AND/OR tree」를 利用하여 그 知識을 構造化했다. 그러나 경우에 따라서는 探索도중에 推論되는 事實의 數가 점점 增加할 경우가 있으므로 發見의 方法(Heuristics)를 利用하지 않으면 안된다. 이런 意味에서 本 시스템에서는 確實度의 概念을 適用시켰으며, 專門家에 의하여 對象의 狀況에 따른 確實度를 規則의 CF1變數에 代入함으로써 完全한 實行을 할 수 있다고 생각되며, 시스템의 實行速度를 單縮시킬 수 있다고 생각된다.

以上과 같은 프레임理論과 PR에 基礎를 두고 知識을 表現하는 것은 知識의 表現力, 構造化力 및 柔軟性과 知識全體의 完全性 및 一貫性을 滿足시킬 수 있다고 생각되며, 시스템構成에 있어서 가장 重要한 問題이기 때문에 以上の 두가지 方法을 어떻게 相互關連시킬 것인가는 앞으로 더욱 研究되어야 할 課題이다.

또한 本 시스템에서 使用한 推論機構로서는 “IS-THIS-TRUE”, “WHAT”, “HOW”, “WHY”이며, 이들은 事實에 關한 推論, 招來될 結果, 原因分析의 質問에 對答할 수 있었다. 그러나 보다 自然스런 自然言語의 使用에 의한 會話, 故障의 處置方法에 對한 研究는 考慮되어 있지 않으므로 앞으로의 研究課題라 할 수 있을 것이다.

그리고 本 시스템에서 實行한 例는 機關에 對한 극히 簡單한 例이므로 本 시스템을 實際로 船舶에 適用시키기 위해서는 專門家에 의해서 보다 詳細한 規則이 作成되어야 할 것이며 이와같이 시스템이 大型化되었을 경우에 시스템의 實行速度, 問題解決能力 등은 再檢討되어야 할 것이다. 또한 實行速度를 改良하기 위하여 導入된 確實도가 0.0 以下の 事實에 對해서는 무시했지만 實際로는 確實도가 낮은 事實이 原因 또는 結果로 되는 경우도 많다. 이러한 曖昧한 點에 대해서도 再檢討되어야 할 것이며 이러한 點에서 時間經過를 考慮한 推論 즉 過去의 經驗을 參照할 수 있는 시스템이 바람직하다고 생각된다.

參 考 文 獻

- 1) 佐川外：機關故障診斷(シンポジウム), 日本船用機關學會誌, vol. 14, No. 11, 1979, 905-950.
- 2) 永田至孝：船舶とエレクトロニクス, 日本機械學會誌, vol. 85, No. 767, 1982, 1149-1154.
- 3) 「省エネルギー船」特集：日本造船學會誌, 第632號, 1982.
- 4) Barr, A. and Feigenbaum, E. A., The Handbook of Artificial Intelligence, Computer Science Department, Stanford University, Stanford, CA, 1980.
- 5) Hayes-Roth, F., Waterman, D. and Lenat, D. B., Building Expert Systems, Addison-Wesley, 1983.
- 6) Davis, R. and King, J., An Overview of Production Systems, In E. W. Elcock and D. Michie (eds.),

- Machine Intelligence (Wiley, New York, 1976) 300-332.
- 7) Post, E., Formal Reductions of the General Combinatorial Problem, Am. Jnl. Math. 165 (1943) 197-268.
 - 8) Buchanan, B.G., Sutherland, G.L. and Feigenbaum, E. A., Heuristic DENDRAL: A Program for Generating Explanatory Hypotheses in Organic Chemistry, In B. Meltzer and D. Michie (eds.), Machine Intelligence 4, Edinburgh: Edinburgh University Press (1969) 209-254.
 - 9) Shortliffe, E. H., Buchanan, B. G. and Feigenbaum, E. A., Knowledge Engineering for Medical Decision Making: A Review of Computer-based Clinical Decision Aids, Proceeding of the IEEE 67 (1979) 1207-1224.
 - 10) Weiss, S.M. and Kulikowski, C. A., EXPERT: A System for Developing Consultation Nodes, Proc. Sixth Internat. Joint Conf. Artificial Intelligence (1979) 942-947.
 - 11) Forgy, C. and McDermott, J., OPS: A Domain-independent Production System, Proc. Fifth Internat. Joint Conf. Artificial Intelligence (1977) 933-939.
 - 12) 小山, 開原, 時間経過の概念を含む汎用医療コンサルテーションシステム, 情報処理學會論文誌, VOL. 11, 145-172, 1978.
 - 13) McDermott, J., RI: A Rule-Based Configurer of Computer Systems, Artificial Intelligence 19 (1982) 39-88.
 - 14) Minsky, M., A Framework for Representing Knowledge, The Psychology of Computer Vision, P. Winston (ed), McGraw-Hill, 1975.
 - 15) Duda, R. O., Hart, P. and Nilsson, N. J., Subjective Bayesian Methods for Rulebased Inference Systems, Nat. Computer Conf. (1976).
 - 16) Davis, R., Buchanan, B. G. and Shortliffe, E., Production Rules as a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program, Artificial Intelligence 8 (1977) 15-45.
 - 17) Sacerdoti, E. D., Planning in a Hierarchy of Abstraction Spaces, Artificial Intelligence 5 (2) (1974) 115-135.
 - 18) Davis, R., Interactive Transfer of Expertise: Acquisition of New Inference Rules, Proc. Fifth Internat. Joint Conf. Artificial Intelligence (1977) 321-328.
 - 19) Davis, R. and Buchanan, B. G., Meta-level Knowledge: Overview and Applications, Proc. Fifth Internat. Joint Conf. Artificial Intelligence (1977) 920-928.
 - 20) 平井: 機械・装置類の故障診断へのルールベースドシステムの適用について, 電気學會, システム・制御研究會資料 SC-82-43 (1982).