

AIを利用したネットワーク工程計画用 データ作成支援システム

東京大学工学部土木工学科 ○島崎敏一
東京大学工学部土木工学科 松本嘉司
東亜建設工業(株) 佐野可寸志

1. はじめに

最近、土木工学の分野でも人工知能の応用が検討されはじめており、とくに各種のエキスパートシステムが勢力的に構築されはじめている。現場経験の豊富な土木技術者の不足などから、この傾向は今後とも進むものと考えられる。これまでに開発されているエキスパートシステムは、計画、設計、工法選定、制御、診断、経営など多くの分野にわたっており、その対象も土木構造物については、土留壁、仮設工事、基礎工事、基礎杭、トンネルなど多くの構造物にわたっている¹⁾。しかしながら、現場で実際に土木構造物を建設するうえでもっとも重要なものの1つである工程計画については、人工知能的手法の必要性は指摘されてはいるが²⁾、まだ十分な検討はなされていないのが現状である。

工程計画手法のうちの代表的なものの1つは、ネットワーク手法である。昭和30年代にわが国に導入された当時は、建設業界も、その研究開発に熱心であり、かなりの成果もあげた。しかし、現在、実際の現場ではほとんど普及していないといっても過言ではない。その原因には、いくつかあるが、土木学会建設マネジメント委員会の研究³⁾によれば、ハードウェアの能力などの問題を別にすれば、プログラム上の問題としては、データ作成など入出力の問題が大きいと指摘されている。WBSなど工事原価を体系的に解析するための手法を応用することも考えられるが、これを利用して具体的に計算機用の入力データを作成する手間は大変である。

ネットワーク工程計画用データを作成するのに必要な知識は、各作業のつながりとその所要時間であるが、小規模なプロジェクトについてこれを1つ1つ考えるのはそれほど困難ではない。しかし、大規模なプロジェクトについてネットワークを作成する場合には、その手間も膨大となるが、それに加えて見落としや間違いなどが生じる確率も急速に大きくなる。これまで、人工知能の工学への応用として考慮されてきたものは、相当部分がいわゆるエキスパートシステムと名付けられるものである。しかし、このようなたとえ専門家でも誤りを起こしやすくまたその労力が膨大となるような問題こそ、人工知能的な考え方を適用するのが適していると考えられる。また、人工知能的な手法を応用することにより、ネットワークを利用した工程計画について別の問題点として指摘されている入力すべきデータが厳密すぎて柔軟性に欠けるという点なども緩和できる可能性がある。本研究は、ある構造物について、基本的には知識ベースのデータを参照しながら、適宜、ユーザーに確認しながらネットワーク工程計画用の入力データを出力するようなシステムのプロトタイプモデルを作成することを目的とする。

2. 作成支援システムに関するデータ構造の検討

(1) ネットワーク工程計画に必要なデータ

ネットワーク工程計画用のデータ作成支援システムを開発するにあたって、まず、必要となる知識について考える必要がある。それを大きく分類すれば、次の2種類の知識があると考えられる。

- (1) 土木構造物に関する一般的知識(基本知識と名付ける)
- (2) ある対象工事に特有なデータ(固有データと名付ける)

このうち固有データについては、各工事に特有な諸元、歩掛かりなどを規定するものであり、仕様書、図面、積算用の資料などで与えられるものである。したがって、固有データについては、ユーザーが入力するのが原則であり、システム側で事前に準備する必要はない。ただし、入力のあるデータのうちでも、構造物の諸元など以外の歩掛かりなどのデータは、デフォルト値を使うなどの工夫によりなるべく入力の負担を少なくすることが望ましい。また、将来的には、構造物の規模を表わす代表的な長さなどなるべく少ないデータの入力により、標準的な値を表示できるようにする必要があると考えられる。

基本知識とは、土木構造物に関する一般的な知識をデータベース化したものであり、これはさらに、(1) 構造に関する知識、(2) 工法に関する知識、(3) 施工法に関する知識、(4) 工程に関する知識、(5) 計算手続きに関する知識、(6) デフォルト値に関する知識に分類できる。

構造に関する知識とは、橋梁とは橋脚、橋台、上部工でできている、橋脚とは基礎杭、フーチング、柱、梁でできているなどという構造物を構成している部分構造物に関する知識を表わすものである。工法に関する知識とは、基礎杭には、ベノト杭、PC杭などの工法があるというようなある1まとまりの工法の集合としての概念の具体的な要素に関する知識を表わすものである。施工法に関する知識とは、ベノト杭を施工するには、ベノト杭準備工、ベノト杭打設、ベノト杭養生という工程が必要であるというある工法を具体的に施工する際の知識を表わすものである。また、フーチングを施工するには、その前に掘削が必要であり、さらに掘削をするためには一般には土留杭が必要であるという知識も施工法に関する知識として表現することができる。工程に関する知識とは、フーチングを施工するには基礎杭が完成していなければならないなどの各工法の順序関係などの知識を表わすものであり、構造に関する知識で表現される構造物の部分構造物から、施工法に関する知識で表現される作業に相当するものまで各種のレベルについての知識を含むものである。計算手続きとは、所要日数は施工量÷施工速度で計算されるなどの知識を表現するものである。デフォルト値に関する知識とは、コンクリートの養生所要日数は通常7日間であるというような知識を表現するものであり、固有データの入力の際にユーザーを援助する目的で使用され、あるいは、概略の工程計画を作成する際には、入力すべき固有データを構造物の諸元などの必要最小限のものに限定できるようにするためのものである。

これらの知識のいくつかについて、その特徴を次に考える。構造については、ある構造物をそれを構成する部分構造物にわけけるものであり、それらがすべて（あるいは少なくとも相当部分）がそろって初めてその構造物を構成することになる。この意味で、構造物は部分構造物のand結合で構成されているものと考えられる。工法については、一般にいくつかの工法があり、そのうちの1つを選択すれば完成するものであり、orで結合されているものと考えられる。施工法についても、構造と同様の特徴があり、いくつかの作業の連続として表現されるものであり、原則としてすべてを含む必要がある。また、計算手続きは、文字どおり手続きを表現するものであり、いわば、サブルーチンを示しているものと考えられる。

(2) 必要な知識の表現法

人工知能を考える場合、基本的には、その構成は大きくわければ、知識ベースと推論エンジンにわけられる。各々について、あるいは、それらを統合した人工知能モデルとして各種のものが提案されている。その主要なものは、次のようなものである⁴⁾。

(1) 論理型：古典的な形式論理で知識を表現するものであり、推論は論理学の推論規則によって行なわれる。これを具体化したものとしては、1階述語論理を使用するものがあり、Prologのような方式で

ある。この意味ではプロダクションシステムのうち、仮説から出発して事実やデータの方角に推論する後向き推論もこの方式であるともいえる。

- (2) 手続き型：手続きの集合として知識を表現するものであり、あることが与えられたときに、それをどのように処理するかということを知っているということに知識を表現するものである。
- (3) 意味ネットワーク：Quillianらによって開発された知識の表現法の代表的なものであり、当初は、人の語句の意味の記憶モデルとして開発され、認知心理学の分野で良く使われている。isa, has-part などでものとの関係を表現するが、その意味自体はそれら进行操作するプログラムに依存する。
- (4) プロダクションシステム：(if 条件部 then アクション部) の形のルールで推論を進めるものであり、前述の後向き推論のほかに、逆に事実やデータから仮説や結論を導く前向き推論や、これらを組み合わせたものなどがある。
- (5) フレーム型：ミンスキーによって提案されたが、具体的なインプリメントの方法は示していないために各種の方法が考えられている。フレームによる表現が適しているのは、データの構造が型どおりのもの、上位概念、下位概念の関係がはっきりしているものなどである。また、これは手続きと知識を統合した形で表現できるところに特徴がある。

以上の知識表現法の特徴を考慮し、いま、対象としている知識が、手続き型のものや宣言型のものを含み、上位概念、下位概念がはっきりしているなどのことから、本システムについては、フレーム型が適していると考えられる。

表-1 本システムで使用している主なスロット名

(3) 具体的なデータ構造

本システムの知識表現は、フレーム型によることとしたが、フレーム型の表現法には、一般に、フレーム、スロット、ファセット、スロット値という4つの項目がある。フレームとは、知識を表現しようとしている対象を表わすものであり、橋脚、基礎杭などが入るものである。スロットとは、その対象が持っている性質のどれを表現するかということを表示するものであり、本システムでは、表1のようなスロット名を使用している。ファセットとは、スロット名に対して具体的に与えられる値

である最後の項目のスロット値の性格が確定したものであるのかなどどのようなものであるかを表示するものである。本システムでは、表2に示すファセット値を使用している。

具体的なデータ構造については、工法に関する知識のような選択型の知識については、フレ

ームの akoスロットで表現し、その上位概念の性質の継承を行なうようにする。構造に関する知識のよ

スロット名	意味
ako	具体例であることを示す
part_of	あるものの1部であることを示す
duration	作業の所要日数を示す
cond	先行作業を示す
speed	施工速度を示す
volume	施工量を示す
isa	固有データであることを示す

表-2 本システムで使用している主なファセット値

ファセット値	意味
value	確定値であることを示す
default	デフォルト値であることを示す
if_needed	計算手続きなどのデモンを起動することを示す

うな構成部分を表現する知識については、part_of スロットを使用し、上位概念の性質の継承は原則として行なわない。また、所要日数を求めるなどの手続きについては、フレームのdurationスロットのファセット値が if_neededのときに手続きデモンを自動的に起動するように表現する。また、デフォルト値については、通常のフレーム理論で行なわれるように表現するが、この場合には、あわせて、if_defaultデモンを起動し、値の確認、修正が可能のようにする。また、実際の解析の対象となる構造物などは、知識ベースに蓄えられている事物の具体例としてakoフレームのファセット値valueで表現することにする。

(4) ネットワーク工程計画用の入力データ

ネットワーク工程計画用のプログラムへの入力データは、システムによって異なることはもちろんであるが、基本的には、作業名、所要日数、先行作業などである。山くずしなどを行なうプログラムでは、所要資材、所要重機類、所要人数なども必要となるが、これらは所要日数と同様の方法で取り扱うことができる。

本システムは、プロトタイプモデルであることから、同様の扱いをできるものは省略することとし、このシステムからの出力すなわち推論結果は、原則として、作業名、所要日数、先行作業名のリストにすることにする。

3. ネットワーク作成支援システム

(1) システムの概要

開発したシステムは、図1に示すように、前節で述べたフレームにより知識を表現した部分とそれを使って推論をする推論エンジン、作業記憶からなっている。本システムは、Prolog-KABAを使用してNECのPC9801Fで開発した。

(2) 処理の流れの概要

処理の基本的な流れは、以下のとおりである。起動すると、まず、対象構造物の一覧表を出力し、どれを対象とするか聞く。選ばれた構造物の名前はそれを唯一の要素として持つリスト（以下、検討する対象構造物のリストという意味で対象構造物リストと呼ぶ）として作業記憶にassertされる。以下の処理は、この対象構造物リストに対して行なわれる。すなわち、対象構造物リストについてその第一番目の要素を取り出し、フレームの形で表わされている知識を参照して下位構造への展開を行なう。このときの動作は、以下の4種類に分類される。なお、対象とした構造物については次節で述べるが、図2に一部

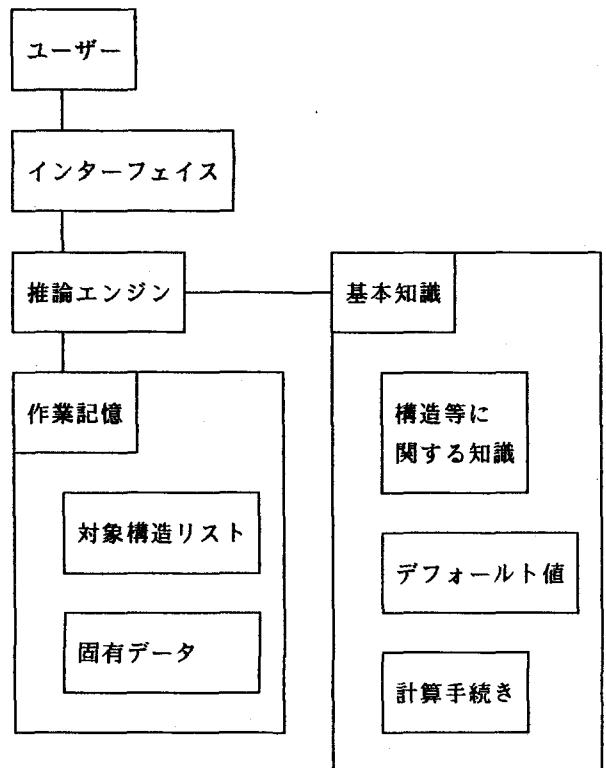


図-1 ネットワーク工程計画用データ作成支援システムの構造

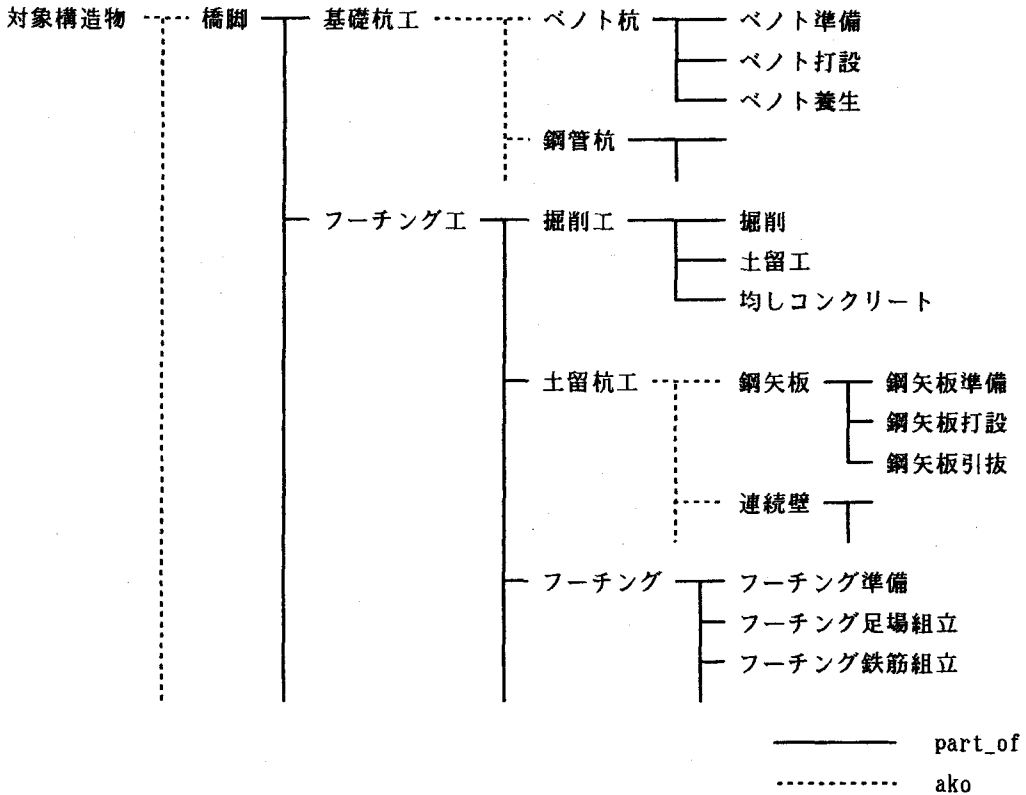


図2 作成したシステムの高架橋の橋脚の構造（一部）

を示す。

(1) 対象構造リストの先頭要素がpart_ofで表わされる下位構造を持つとき

この場合には、その構造や作業は、原則として、その下位構造をすべて含むものであるので、part_ofで表わされる下位構造すべてについて、いま対象としている具体的な構造物に必要なかどうかを確認し、必要なものの集合で、その先頭要素を置き換える。たとえば、高架橋の橋脚の例では、[橋脚]という対象構造リストが[基礎杭工、フーチング工、柱工、梁工]という対象構造リストに置き換えられる。なお、フーチング工などがその対象になっているときには、当然、先行作業として土留杭、掘削などが必要となるので、こうした施工上必要な作業も施工法に関する知識を利用してこれによって展開される。このとき、確認をするたびに、その作業の名前を入力してもらい、固有データとして作業記憶にassertしておく。なお、作業の名前は、[[作業種類、作業名]、上位作業名]というリストの形とすることとした。この固有データのassertは以下の場合も同様に行なわれる。

(2) 対象構造リストの先頭要素がakoで表わされる下位構造を持つとき

この場合には、対象構造リストの先頭要素は原則として、下位構造の1つだけを持つことになるので、ユーザーの選択にしたがって、置き換えを行なう。先の例で言えば、たとえば[基礎杭工、フーチング工、柱工、梁工]という対象構造リストはその先頭要素がユーザーの選択にしたがって[ベノト杭、フーチング工、柱工、梁工]に置き換えられる。

(3) 対象構造リストの先頭要素がそれ以上展開できないとき

この場合には、その先頭要素は、作業の最小単位ということになる。したがって、その作業の所要日数をdefault値に関する知識を利用して求め、確認あるいは修正を要求した上で、固有データとしてas-

sertされる。また、この段階で判明している先行作業についても、固有データとしてassertする。その上で、その先頭要素は対象構造リストから除かれる。
(4) 対象構造リストが空リストである場合

この場合には、構造物の展開がすべて終了していることを意味しており、展開作業を終了する。

以上の展開が終了した段階で、この過程で検出できなかった先行作業を検索し、前と同様にassertをしたうえで、最小作業単位について、作業名、所要日数、先行作業のリストという形で出力する。

なお、こうしたAIシステムについては、ヒューマンインターフェイスの重要性が多々指摘されているが、本システムは、工程計画というこれまであまり検討されていない分野への適用性を検討するためのプロトタイプモデルであること、インターフェイス自身は別の問題として扱えること、使用言語がProlog-KABAであり、グラフィック処理にはそれほど適していないことなどから、ヒューマンインターフェイスについては十分には検討していない。

(3) 主要なフレーム

本システムは、土木学会建設マネジメント委員会のレポート⁵⁾を参考にして、橋脚の施工について作成した。その構造については、その一部を図2に示す。本システムで使用されている主要なフレームについて、橋脚の施工を例に、基本知識などの知識を表現するフレームの一部を以下の(1)-(6)に例示する。なお、以下に示されるデフォルト値などは架空のものであり、実用するためには、適切な数値を入れる必要がある。また、(7) 個別データについては、システム起動後、システム側でassertするものを例示したものであり、当初から入力されているデータではない。

(1) 構造データ

frame(基礎杭工,part_of,default,橋脚).

意味: 基礎杭工は橋脚の1部である。

(2) 工法データ

frame(ベノト杭,ako,default,基礎杭工).

意味: ベノト杭は基礎杭工の1種である。

(3) 施工法データ

対象構造物 を番号で選んで下さい。

1 橋脚

2 橋台

|: 1.

名前をいれて下さい|: 1.

基礎杭工 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 2.

フーチング工 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 3.

柱工 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 4.

梁工 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 5.

基礎杭工 を番号で選んで下さい。

1 ベノト杭

2 鋼管杭

|: 1.

名前をいれて下さい|: 6.

ベノト準備 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 7.

ベノト打設 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 8.

ベノト養生 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 9.

ベノト準備 の duration は 1 日

でいいですか(y or other)?|: y.

ベノト打設 の speed は 10 本/日

でいいですか(y or other)?|: y.

ベノト打設 の volume は 100 本

でいいですか(y or other)?|: y.

ベノト養生 の duration は 14 日

でいいですか(y or other)?|: y.

掘削工 は必要ですか?: y.

名前をいれて下さい|: 10.

土留杭工 は必要ですか?: y.

以下省略

図3 システムとユーザーの応答例の一部

frame(ベノト準備,part_of,default,ベノト杭).

意味: ベノト準備はベノト杭の1部である.

(4) 工程データ

frame(フーチング工,cond,default,基礎杭工).

意味: フーチング工を行なうには基礎杭工が終了している必要がある.

(5) 計算手続き

例として, 所要日数を求めるフレームをつぎに示す. このフレームは, ある具体的な構造を示すフレームのdurationスロットのファセット値としてvalueを持たないときだけ, if_neededファセット値をきっかけとして起動されるものである. なお, データを検索する述語fget(フレーム, スロット, 値)については, 高野⁶⁾によるものをベースにしてこれを改良して使用した.

```
frame(Frame,duration,if_needed,[Value]{U}):-  
    fget(Frame,speed,[V1]{U1}),!,  
    fget(Frame,volume,[V2]{U2}),!,  
    Value is V2 / V1,  
    fget(unit,duration,[_]{U}),!,  
    asserta(frame(Frame,duration,value,[Value]{U})).
```

(6) デフォルト値

frame(ベノト準備,duration,default,[1,日]).

意味: ベノト準備の所要日数のデフォルト値は1日である.

(7) 個別データ

frame([[ベノト打設,6],[[ベノト杭,4],[[基礎杭工,3],[[橋脚,1],[[]]]],ako,vlaue,基礎杭工).

意味: [[ベノト打設,6],[[ベノト杭,4],[[基礎杭工,3],[[橋脚,1],[[]]]]]という具体的な工種は, 基礎杭工の1種である. また, ベノト打設は6という名前を持ちベノト杭という作業の下部構造である.

以上のようにして作成した高架橋の橋脚を対象としているシステムのフレーム数は, 約200である.

(4) 適用例

以上に示した考え方により作成したシステムをいくつかのケースについて適用し, 検討を行なった. 検討したケースは, 基本的には, (1) 想定された工種がすべて含まれている場合, (2) 工種のいくつかが不都合な場合, (3) 先行作業が複数ある場合であり, この3ケースですべての場合を尽くしている. なお, 作成したシステムは高架橋の橋脚を対象としたものであるため基本的には各作業は直列に接続されている. したがって, ケース(3)の場合には, データベースを人為的に変更し並列の部分が生じるようにした上で検討をした. そのシステムとユーザーの応答例の一部は, 図3のとおりであり, その出力の一部の例は図4のとおりである.

その結果, 本システムは, ネットワーク工程計画用のデータ作成に有効であると考えられ, 専門家が使ったとしても, 誤りや漏れのチェックに効果があると考えられる. ただし, その処理速度については, 構造物の展開が進むにつれて, 応答時間が10秒以上かかるようになるなど, 人が不満を感じない応答時間であるといわれる2-3秒よりも長くなる. したがって, より高速なコンピュータの使用, プログラムのコンパイルなどを考える必要がある.

4. 結論と今後の課題

1	[[[ベント準備,7],[[ベント杭,6],[[基礎杭工,2],[[橋脚,1],[[begin]]],	[1,日],
2	[[[ベント打設,8],[[ベント杭,6],[[基礎杭工,2],[[橋脚,1],[[[[[ベント準備,7],[[ベント杭,6],[[基礎杭工,2],[[橋脚,1],[[begin]]]]]]],	[10,日],
3	[[[ベント養生,9],[[ベント杭,6],[[基礎杭工,2],[[橋脚,1],[[[[[ベント打設,8],[[ベント杭,6],[[基礎杭工,2],[[橋脚,1],[[begin]]]]]]],	[14,日],
4	[[[掘削,14],[[掘削工,10],[[フーチング工,3],[[橋脚,1],[[[[[ベント養生,9],[[ベント杭,6],[[基礎杭工,2],[[橋脚,1],[[begin]]]]]]],	[1,日],
5	[[[土留工,15],[[掘削工,10],[[フーチング工,3],[[橋脚,1],[[[[[掘削,14],[[掘削工,10],[[フーチング工,3],[[橋脚,1],[[begin]]]]]]],	[2,日],
6	[[[均しコンクリート,16],[[掘削工,10],[[フーチング工,3],[[橋脚,1],[[[[[土留工,15],[[掘削工,10],[[フーチング工,3],[[橋脚,1],[[begin]]]]]]],	[1,日],

以下省略

図4 システムの出力例の一部

これまで、あまり検討の対象となっていなかった工程計画の作成支援システムのプロトタイプシステムを作成した。この結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 人工知能的な考えを使った工程計画作成支援システムは、有効であり、特に、専門家の誤りや漏れの防止に効果があると考えられる。
- (2) 本システムにより、工程計画用入力データの作成という手間のかかる作業を半自動化でき、その分、専門家本来の業務に集中できる可能性がある。

なお、今後の課題としては、次のような点がある。

- (1) プログラムのコンパイルなどによる高速化
- (2) 今回は、プロトタイプシステムということで重視していないマンマシンインターフェイスの改良

参考文献

- 1) 土木学会土木情報システム委員会人工知能小委員会：昭和62年度活動報告書，昭和63年6月。
- 2) 吉井良二，池田将明：「工程管理支援システム(PF-NETS)の開発と適用に関する研究」，第5回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，土木学会建設マネジメント委員会，1987年12月，pp31-38。
- 3) 土木学会建設マネジメント委員会計画・管理技法小委員会：ネットワーク手法活用に関する研究報告書，D-02，1987年3月，p.3。
- 4) Barr,A, and Feigenbaum,E.A.編，田中幸吉，瀧一博監訳：人工知能ハンドブック，共立出版，1983年4月，pp.184-192。
- 5) 土木学会建設マネジメント委員会計画・管理技法小委員会：ネットワーク手法活用に関する研究報告書，D-02，1987年3月，p.9。
- 6) 高野真：Prologで学ぶAI手法，啓学出版，1988年3月，pp.93-95。