

AI手法を用いた工程計画支援システム

A Support System for Scheduling by AI Method

東京大学 ○佐野可寸志*

東京大学 島崎 敏一**

By Kazushi SANO and Toshikazu SHIMAZAKI

工程計画の代表的な手法のひとつとして、PERTを始めとするネットワーク手法があるが、実際の現場においては、あまり利用されていないのが実状である。この理由としては、入力データ作成の煩雑さが最大の問題点として挙げられている。一方、バーチャート等の棒式工程表は現場で頻繁に利用されていることから、もしバーチャート並の入力の手間でネットワークプランニング用データの入力が可能ならばそれらの利用はもっと盛んになると予想される。本稿では、主要工種の作業量、作業開始日、作業終了日の入力を行なうと、フレームシステムによりあらかじめシステムに蓄えられた知識を利用して主要工種を単位作業に分解するとともに、構造物の大きさや作業特性をもとに作業順序や作業日数の推論を行い、工程計画ネットワークの作成を支援するシステムを構築する。

【キーワード】 工程計画, エキスパートシステム

1. はじめに

工程計画作成の方法としては、まず必要な工事要素を拾いだし、要素ごとに立案した詳細計画を整合することによって全体工程を完成させる積み上げ方式と、全体工程の概略を作成し、これに基づき詳細な工程計画を作成する割付方式の2種類がある。従来のネットワーク手法に基づいたシステムは、基本的に積み上げ方式で、全ての単位作業の日数を決定した後、ネットワーク計算により全体工期を求める方法をとっており、工事を所定の期日に納めるべく主要マイルストーンを設定し、次に各作業の日数をそれに合わせて決定していくという実際に行われている決定手順に適さないという問題があった。さらに、M.L.Manhein¹⁾ や田村ら²⁾ は、計画過程において経験的知識が利用可能であるときには、割付方式による計画の方が積み上げ方式よりも適していることを述べている。以上のような理由から本システムでは、割付方式を採用した。一般に工程計画のよう

なプランニングの問題では、対象が広範囲で、かつ自由度が大きくなるので可能な計画案が無限に存在してしまう。これを防ぐために本システムでは、ユーザーが主要工種のおよその作業日数をバーチャートの形式でシステムに入力することにより、それ自身が制約条件になり、それらを満たす解の組合せの数を減少させている。

また、一般にある問題を人工知能だけを使って解決しようとする、計算機に負担がかかり過ぎて、“探索枝の爆発的増大現象”が起こり、小さな問題だと解決可能だが、実用上の問題が解けなくなることがしばしば見受けられる。本システムでは、人工知能の知識だけを利用するのではなく、最小限の人間の知識も活用することによって、実問題を解くことを目的としている。

2. データ構造の検討

(1) 知識の表現方法

AIシステムにおいて最も重要な問題の一つは、知識をいかに表現するかということである。この知識表現に必要な要件としては、コンピュータ処理向

* 東京大学助手 工学部土木工学科

** 東京大学助教授 工学部土木工学科

(〒113文京区本郷7-3-1)

きであること、人間にとっても操作性が良いこと、知識の量が多くなったとき個々の知識間の一貫性の管理が容易にできることなどが挙げられる。知識の表現方法の代表的なものとしては、論理モデル型、意味ネットワーク型、プロダクションシステム型、フレームシステム型などと、これらの複合型と多くのものが提案されているが、土木構造物の構築過程では、対象としている知識のデータ構造が型通りでかつ上位概念下位概念の関係がはっきりしていることから、本システムでは、フレームシステム型の知識表現を使用することにする。

(2) フレームシステム

フレームシステムとは情景や物語の理解のために、認知科学的な一つの考え方として、1975年に、ミンスキーが発表したフレーム理論に基づく知識表現であり³⁾、上位と下位のフレーム間の情報の伝達によるインヘリタンス機構と、ある一定の条件が満たされれば自動的に起動される付加手続きとを主な推論機構としている⁴⁾。フレームのデータ構造の一例としては、以下のようにも表現される。

frame(フレーム名, スロット名, ファセット, スロット値)

フレーム名とはシステムを通じてユニークにフレームにつけられた識別名であり、知識表現の対象を表わすものである。スロット名とはスロットにつけられた識別名であり、フレームが持っている多くの性質のうちで、どれを対象とするかを示すものであり、それが属するフレーム内でユニークでなければ

表-1 本システムで使用しているスロット名

スロット名	意 味
ako	具体例であることを示す
part_of	あるものの一部であることを示す
duration	作業日数を示す
volume	作業量を示す
machine	作業に必要な機械を示す
man	作業に必要な人員を示す
act	下位作業の手順を示す
ability	作業能力を示す
cost	作業にかかる費用を示す

表-2 本システムで使用しているファセット値

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
assump	仮定値であることを示す
if_needed	計算手続きを起動することを示す
question	質問手続きを起動することを示す

表-3 フレームデータ構造の例
掘削フレーム

スロット名	ファセット値	スロット値
part_of	default	掘削工
cond	default	start
machine	default	[バ'ックホ, トラック]
man	default	[オ'レータ, 土工]
duration	assump	[0.6, 掘削工]

ならない。本システムでは表1に示すスロット名を用いている。スロット値とは、フレームの性質を表わすスロットに具体的に与えられる値のことである。ファセットとは、スロット値の性質を示すものであり、本システムでは表2に示すファセットを用いている。具体例として掘削工の単位作業である掘削フレームを表3に示しておく。

(3) 作業関係の表現方法

本システムではPrologを用いてシステムを構築しているため、作業関係が柔軟なデータ構造が許されるリスト形式で表現できれば非常に都合がよい。今回は作業関係の表現方法として鉤括弧 '[]' 内のカンマ ', ' の外側に鉤括弧が偶数個のときは直列作業を、奇数個のときは並列作業を表わすものとする。

eq. [a,b,c,d] a -> b -> c -> d
 [a,[b,c],d] a -> b -> d
 └─┬─┘
 c

この表現方法は、作業が複雑になると人間にとっては、非常に見にくいものとなっているが、2次元のネットワークを計算機に処理させるためには、都合の良いものであり、主要工種レベルで単位作業の順序関係の記述に利用することや、インターフェイスを改良しグラフィック化すれば、実用上の問題は

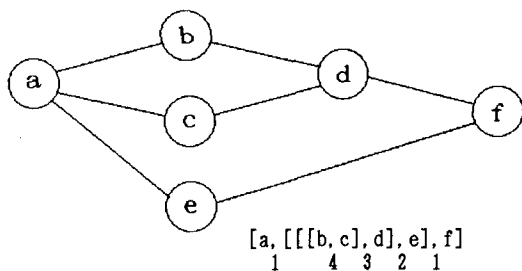


図-1 作業関係の表現例

ない。(図1)

(4) 本システム用入力データ

本システム用入力データは、入力専用画面(図2)を用いて入力する。主要工種名、作業量はキーボードから、作業日数はマウスを操作することによって入力を行なう。入力後でも、作業日数の変更は、マウスを用いて容易に行える。なお、作業日数は絶対的なものとは考えず、下位の作業における推論過程において合理的な作業日数が導き出されれば、それと置き換わるものとする。

作成モード

高架橋下部工工程表			
作業名	作業量		作業日数
準備工			5
基礎杭工	100,本		10
土留杭工	100,本		10
掘削工	2000,m3		10
フック工			
柱工			
埋戻工			
梁工			
片付け工			

図-2 入力画面例

(5) 本システムの出力データ

本システムでは、ネットワーク工程用の入力データとして単位作業名、作業日数、先行作業名、使用機械名およびその台数、作業員の職種およびその人員数のリストを出力するものとする。出力データ的具体例を図3に示す。

3. ネットワーク作成支援システム

(1) システムの概要

本システムは、ユーザーが入力画面より入力したデータから得られる主要工種の作業日数、作業量、土質条件等の固有データと、あらかじめシステムが

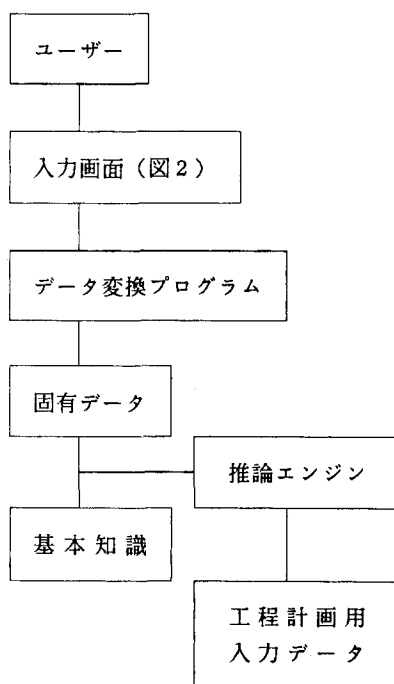


図-4 工程計画支援システムの構造

[[作業名],	[先行作業],	[作業日数],	[使用機械],	[作業人員]
[[掘削, a],	[鋼矢板打設, z],	[6, 日],	[[7tバックホウ, [1, 台]],	
			[10tトラック, [5, 台]]],	[土工, [2, 人]]].
[[土留工, b],	[掘削, a],	[3, 日],	[[30tクレーン, [1, 台]],	[[嵩工, [2, 人]], [土工, [4, 人]]].
[[均しコンクリート, c],	[土留工, b],	[1, 日],	[ポンプ車, [1, 台]],	[土工, [4, 人]]].

図-3 システムの出力例

準備している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基本知識から、推論エンジンを用いて工程計画用の入力データを作成するものである。図4に本システムの概念図を示す。

なお、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、橋脚の施工を例に作成した。開発言語としてはProlog-KABAを使用し、NEC 9801F 上で開発した。

(2) 本システムでの推論の主な流れ

a) デフォルト知識を活用して主要工種を単位作業に分割し、作業順序を確定する。

b) ユーザーから与えられた主要工種の日程を基本知識を用いて、単位作業に割り付ける。この際単位作業には、主要工種の数量に比例するものと数量に関係なく一定であるものの2種類あるとした。前者の例は掘削のような作業であり、後者の例としてはコンクリート養生のような作業である。

c) 割り付けられた日程の範囲で、最も安いコストで単位作業が完了する使用機械の種類、台数を決定し、その時の単位作業の日程を更新する。その際に、主要工種におけるクリティカルパス以外の単位作業においては、日程の制約をクリティカルパス上の単位作業よりも緩くしておく。主要工種におけるクリティカルパスは、前記のリスト形式で表現された作業関係から容易に求めることができる。

d) 当該主要工種のすべての単位作業の日程を累計し、あらかじめ定められている主要工種の日程から大きく乖離した場合はc) にフィードバックする。

(3) 具体的な処理の流れと簡単な例

a) 単位作業への分割と作業順序の確定

一般的には、建設工事の作業関係は図5のようなtree状に表わされる。そして上位フレームと下位フレームの関係には、工法に関する知識のように選択関係にあるako(a kind of)スロットと、構造に関する知識のように、下位フレームが上位フレームの構成要素になっているpart_of スロットの2種類存在する。

上位作業と複数の下位作業が ako関係で結ばれている時は複数の下位作業の中から適当な下位作業を選ぶようにしている。本システムは工程計画へのエ

キスパートシステムの適用性を調べることを目的としていることや、工法選択のエキスパートシステムは多くのものが各種開発されていることを踏まえて、本システムでは、簡単のため、各工法の適用範囲をあらかじめ決めておき、工事数量がどの範囲にあるかで工法を決めるという非常に初歩的な推論方法をとることにした。

また、part_of 関係で結ばれているときは、上位作業は下位作業をすべて含むので上位作業を複数の下位作業のリストに置き換えた。

一方、作業順序はcondスロットを用いて、ユーザーが確認しながら作業リストを作成する。例としては、

```
frame(掘削,cond,default,掘削工).
```

```
frame(土留工,cond,default,掘削工).
```

```
frame(均しコンクリート,cond,default,掘削工).
```

という知識から

```
frame(掘削工,act,value,
```

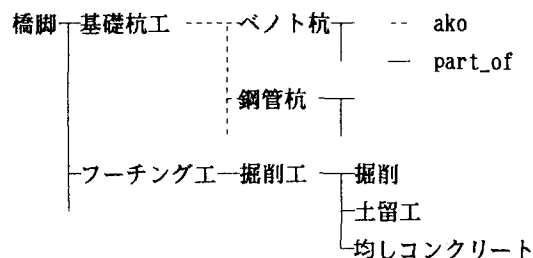
```
  [掘削,土留工,均しコンクリート]).
```

という知識を得る。

b) 単位作業への日程の割付

ユーザーから入力された

```
frame(掘削工,duration,value,[10,日])
```



```
frame(基礎杭工,part_of,default,橋脚).
```

```
frame(フーチング工,part_of,default,橋脚).
```

```
frame(ベノト杭,ako,default,基礎杭工).
```

```
frame(鋼管杭,ako,default,基礎杭工).
```

```
frame(掘削工,part_of,default,フーチング).
```

```
frame(掘削,part_of,default,掘削工).
```

```
frame(土留工,part_of,default,掘削工).
```

```
frame(均しコンクリート,part_of,default,掘削工)
```

図-5 橋脚の作業例とデータ構造 (一部)

という知識とシステムがあらかじめ用意している
`frame(掘削,part_of,default,掘削工)`
`frame(掘削,duration,assump,[0.6,掘削工])`
 という知識から
`frame(掘削,duration,assump,[6,日])`という知識を
 得る。

c) 単位作業日程の更新

ユーザーから入力された
`frame(掘削工,volume,value,[4000,m3])`という知識
 は、掘削工の下部作業である掘削にフレームを通じて
 継承されており、[4000,m3]の作業量を[6,日]以内に
 終了するためには
`frame(掘削,machine,default,[バックホウ,トラック])`
`frame(.4バックホウ,ability,default,[400,m3])`
`frame(.7バックホウ,ability,default,[700,m3])`
`frame(.4バックホウ,cost,default,[30000,50000])`
`frame(.7バックホウ,cost,default,[30000,60000])`
 等の知識を利用すれば以下の2案が導出される。

1. [[.7バックホウ,[1,台]], [6,日], 390000]
2. [[.4バックホウ,[2,台]], [5,日], 560000]

.7バックホウを使用した方が費用が安いので、1案が採
 用される。また、掘削で使用されるmachineであるト
 ラックについても推論が行なわれ、
`frame(10トラック,ability,default,[10,m3])`。
`frame(トラック,ability,question,[1日可能投入台数,`
 1日可能往復回数])。

等の知識やユーザーへの質問から掘削した残土の搬
 出可能性をチェックする。

掘削工の他の下位作業である土留工、均しコンク
 リートについても同様にして作業日数が決定される。

今回のシステムはプロトタイプということで、コ
 ストについての知識を使用機械の選定にのみに用い
 たが、使用材料費、燃料費、労務費等のコストに関
 する知識についても、あらかじめシステムに与えて
 おけば、それらを単位作業ごとに集計することによ
 って、見積りにも利用できる。

d) 単位作業日程の集計

掘削工の下位作業である[掘削,土留工,均しコンク
 リート]の3単位作業の作業日数から掘削工の作業
 日数を求める(図5)。この場合は、単位作業が直

列に行なわれるので単に3単位作業の作業日数の和
 を求めれば良い。並列に単位作業が行なわれる場合
 は、内側の鉤括弧の中で最も作業日数が長い作業を
 抜き出し、直列の時はそれらの作業をひとまとめに
 して鉤括弧を外していく。簡単な例を以下に示す。

eq. $[a, [[b, c], d], [e, f]], g]$, : 並列
 $[a, [[b], d], [e, f]], g]$ $b > c$, : 直列
 $[a, [b], d], [e, f]], g]$
 $[a, [b], d], [e, f]], g]$ $[b+d] > [e+f]$
 $[a, b, d], g]$

このようにして求めた主要工種の作業日数と、
 ユーザーから与えられた作業日数との間に大きな差
 が生じた場合は、主要工種内におけるクリティカル
 パス上(上例では、作業 a, b, d, g)にあり、かつ割
 り当てられた日数をオーバーした単位作業から、許
 容範囲に収まるまで、c)で行なった推論をやり直
 す。

(4) 本システムの適用例

以上に示した考え方により作成したシステムをい
 くつかのケースに適用し、検討を行なった。図6に
 ユーザーとシステムとの応答例の一部を、図3にそ
 の出力例を示す。実際の工程がシステムが用意して
 いたデフォルト値と大差がないときは、バーチャ
 ート並の入力手間で、ネットワーク工程用のデータ
 を作成することができた。また、計算時間は実時間内
 に収まったが、これは主要工種をそれぞれ独立なも
 のと仮定し、相互の関係を全く考慮しなかったため
 で、推論から導出した結果を実際の工事に近づける
 ためには、相互の関係を考慮するとともに、効率の
 良い推論方法を考案しなければならない。

4. 結論と今後の課題

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) 作業の流れがシステムで用意したデフォルト
 値と大きく食い違わないときはバーチャート並の入
 力手間で、ネットワーク工程用のデータを作成する
 ことができる。

.4バックホウの ability は [400,m3]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 .7バックホウの ability は [700,m3]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 .4バックホウの cost は [30000,50000]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 .7バックホウの cost は [30000,60000]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 [掘削,a] の duration は [4,日]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 (途中省略)
 [土留工,b] の duration は [5,日]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 [均しコンクリート,c] の duration は [1,日]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 [掘削工,k] の act は
 [[掘削,a],[土留工,b],[均しコンクリート,c]]
 でいいですか(y or other)? |: y.
 [掘削工,k] の duration は
 [10,日] です

図-6 システムとの応答例(一部)

(2) コストに関する知識を増強することによって見積への応用が可能である。

なお、今後の課題としては、次のようなものが挙げられる。

(1) 本システムでは、完全にモジュール化された主要工種の範囲内で推論を行なっているが、実際の工事では主要工種間で、お互いに影響を及ぼしあいながら作業が行なわれている場合が多い。精度の良

いデータを出力するためには、それらの影響を考慮して推論を行なう必要がある。

(2) 今回はプロトタイプということで工区割り等の空間の広がりとは全く考慮しなかったが、実際にはこのような推論も行う必要がある。

(3) 高架橋の橋脚という限られた作業においても、使用する知識のデータ量は膨大なものとなってしまう、これを手作業で作成しようとする、非常に手間がかかってしまう。このシステムを多くの工種に利用できるようにするためには、既存のPERTのデータから逆に知識ベースを作成するサブシステムも必要である。

【参考文献】

- 1) M.L.Manheim: Hierarchical Structure A Model of Design and Planning Processes, MIT PRESS, 1964
- 2) 田村恭, 嘉納成男: 工事計画のための支援システムに関する研究(その3) 割付方式による支援システム, 第5回電子計算機利用シンポジウム, 1983年3月
- 3) P.H.ウィンストン編, 白井良明, 杉原厚吉訳: コンピュータービジョンの心理, 産業図書, 1979年2月
- 4) 上野晴樹, 石塚満: 知識の表現と利用, オーム社, 1987年2月
- 5) 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, 昭和63年6月
- 6) 島崎敏一, 松本嘉司, 佐野可寸志: 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, 第13回電算機利用に関するシンポジウム講演集, 1988年10月 pp.115-122
- 7) 高野真: Prologで学ぶAI手法, 啓学出版, 1988年3月