知識工学基本技術のFAへの応用

Knowledge Engineering Based Control Technology for Factory Automation

最近のFAシステムでは、製品の多様化、ライフサイクルの短期間化に伴って、高柔軟性、高信頼性、高保守性及びシステムの段階的立上げが求められている。これらの要求にこたえるために、エンドユーザーの生産技術者がもっているFA制御の知識を活用し現場で計画や制御のプログラムを容易に作成・保守できる、知識工学を応用した分散形FA制御のミドルソフトウェアと、異形の貨物を自動で積み付けるための積付け計画の基本ソフトウェアを開発した。制御用ミドルソフトウェアとしては、非手続形言語のIF(条件)~THEN(結論)ルールで記述するSCD、及び動作フローで記述するSCRを開発し、16ビットマイクロコンピュータに搭載して現場設置形のFAコントローラFMCを実現した。また、積付け計画用の基本ソフトウェアとしては、計画者の経験的知識と数値処理・図形処理を結合できる貨物配置計画システムを開発し、16ビット制御用計算機HIDIC-V90/5へ搭載し実現した。

松本邦顕* Kuniaki Matsumoto 薦田憲久* Norihisa Komoda 明石吉三* Kichizô Akashi 解良和郎** Kazuo Kera 渡瀬英夫*** Hideo Watase 岡坂建一**** Ken'ichi Okasaka

1 緒 言

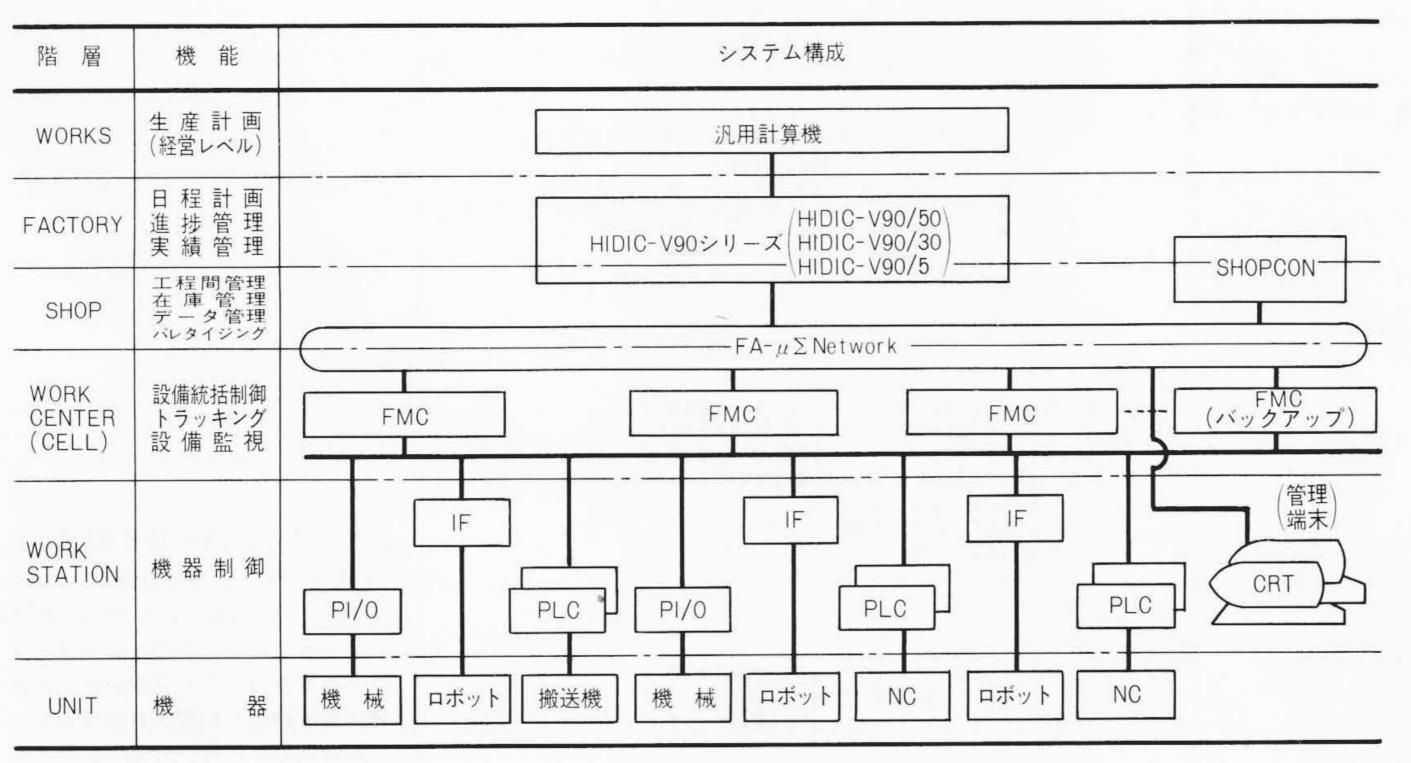
多品種少量・中量生産に対応する高柔軟性、高信頼性、高保守性のFA (Factory Automation)システムとするために、多様な作業パターンに対応できる自律分散FA制御システムを開発した $^{1)}$ ~ 4 。このシステムの中でFA機器群を制御する制御ソフトウェアと、製品をこん包した貨物をパレットやコンテナに積み付けるための積付け計画ソフトウェアについて述べる。これらのソフトウェアには知識工学を応用し、現場の生産技術者が制御や積付けのプログラムを容易に作成・保守できるようにしている。条件組合せ制御に対しては、ルール制御ソフトウェアSCD $^{5)}$ ~ $^{7)}$ (Station Coodinator)を、順序制御に対しては動作フロー制御ソフトウェアSCR $^{8),9)}$ (Station Controller)を、積付け計画に対しては対話形貨物配置計画システム $^{10),11)}$ を開発し、 16 ビットマイクロコンピュータM68000に搭載し、低価格の現場設置形コントローラ $^{12)}$ を実現している。

知識工学応用の類似の研究は,国内外の大学や企業でも進められており^{13)~15)},FAの新世代の核技術となってゆくと考える。

2 ルール制御ソフトウェアSCD

2.1 自律分散FAと制御ミドルソフトウェアの基本思想

FAシステムで、高柔軟性、高信頼性及び高保守性の要求にこたえる方式として、FAシステムを構成する加工・組立、搬送、部品供給、検査、こん包、積付けなどの各サブシステムで、各サブシステムの自律性を保ちながら、機器故障などに迅速に対応するため、協調制御させることを特徴とする自律分散思想に基づく自律分散FA制御システムを開発した。自律分散FA制御トータルシステムの構成は、 $\mathbf{図1}$ に示すように、管理・制御レベルに応じて 6 階層に分け、各レベルの機能を満たす計算機、FA コントローラ FMC (Flexible Manufacturing cell



注:略語説明
FMC(Flexible Manufacturing
Call Controller)
PI/O(プロセス入出力機器)
IF(インタフェース装置)
NC(数値制御機械)
PLC(Programmable Logic
Controller)
CRT(Cathode Ray Tube)

図 I 自律分散FA制御トータルシステム 図に示すように、管理・制御レベルに応じて6階層に分け、各レベルの機能を満たす計算機、FAコントローラ、ネットワークなどを準備した。

^{*} 日立製作所システム開発研究所 工学博士 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所土浦工場 **** 日立製作所笠戸工場

Controller), ネットワークなどで構成する。

制御ミドルソフトウェアについては、生産現場の熟練運転員がもつ経験的知識や運転論理を、生産技術者がそのままの形で記述でき、その知識を機器の制御へ直接利用できることを目指して、知識工学技術をシステム制御へ応用した。知識を活用するためには、一定の形式のもとで構造化された知識と呼ばれる情報群を蓄える知識ベース(Knowledge Base)と、その問題解決に利用するための処理装置一推論機構(Inference Engine)ーを基本要素として含む構成をもつ。知識ベースを推論機構から分離することによって、知識をデータとして取り扱うことが可能となり、この結果、知識の定義、変更及び追加が容易となり、システム制御への適用が可能となる。

2.2 SCDと従来手続形言語の比較

生産技術者の判定論理を中心とした制御ノウハウ(宣言的知識)を制御プログラムとする場合,従来はFORTRANなどの手続形言語で記述されていた。このため、制御ノウハウをプログラム言語レベルの論理に置き換え、制御プログラムの中に埋め込まねばならないという問題のほかに、テーブル設計、処理アルゴリズム設計、プログラム構造設計などの専門知識を必要とする。また、制御ノウハウがどのように利用され、どのような役割を果たしているかの判別作業に多大の時間を要し、制御プログラムの迅速な開発、変更は難作業である。

これに対しSCDは、IF~THENルール、すなわち「~のときは、~を行なう」といったルールの羅列により、運転知識を表現する方法であり、その記述性、可読性及び保守性に優れている。SCDによるルール記述とFORTRAN記述の比較例を図2に示す。

2,3 SCDのソフトウェア構成

SCDのソフトウェア構成を図3に示す。マンマシン端末からIF~THENルールで記述された制御プログラムは、ルールテーブルに記憶される。FA機器やプロセスの状態であるシステム現況は、システム現況入力部を通しワークテーブル内に文字列の形で取り込まれる。IF(条件)部パターンマッチング部は、ワークテーブル中にIF部の文字列と一致する文字列が

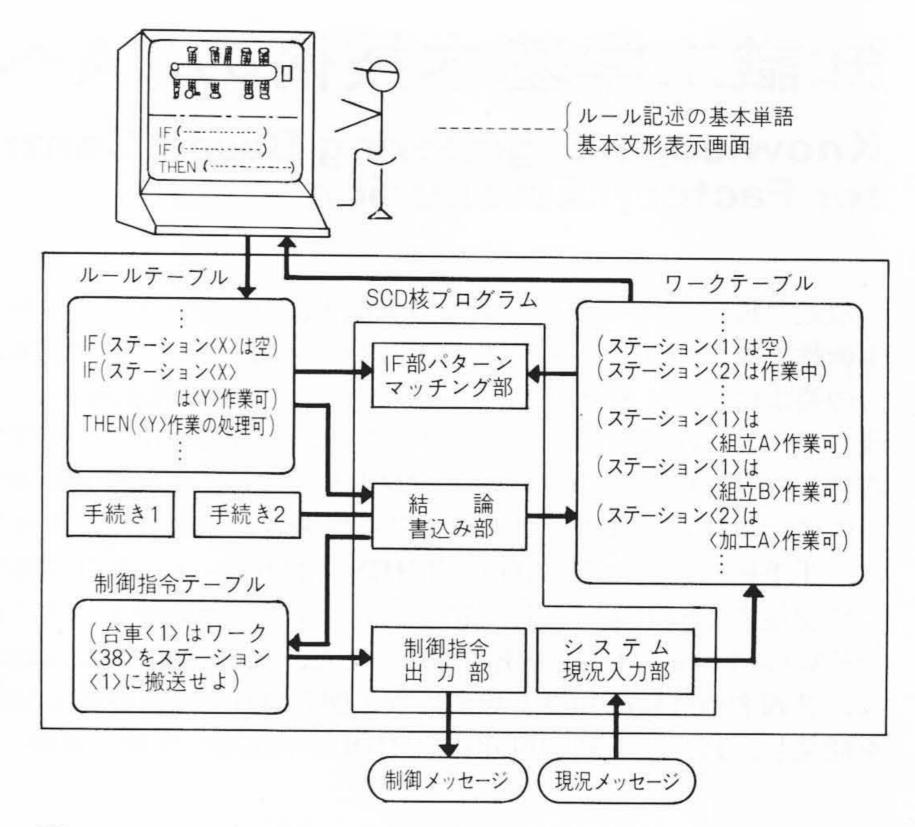


図3 SCDのソフトウェア構成 マンマシン端末からIF(条件)~THEN (結論)ルールで記述された制御プログラムは、ルールテーブルに記憶される。FA機器やプロセスの状態は、システム現況としてワークテーブルに書き込まれる。この二つのテーブルの内容がパターンマッチングされ、制御指令が結論として出される。

存在すると、THEN(結論)部の文字列を新たにワークテーブル(中間結論の場合)、あるいは制御指令テーブル(最終結論の場合)に書き込む。制御指令テーブルに書き込まれた結論は、制御指令出力部により制御対象へ出力される。

2.4 ルールの会話形入力方式

ルールの入力・修正を簡単かつ誤りなく行なえるようにするため、図4に示す構文誘導形入力方式を開発した。これをルールエディタと呼ぶ。本エディタは、ルールの構文規則に従い、入力すべき文節(IF部、THEN部など)を示す"IF"、"THEN"などの識別子を出力し、正しい文字列の入力を誘導

```
SCD (ルール形制御)
                                                              FORTRAN77
                                       IF (BUNP2(1, N). NE.'J') THEN
                                           IF(BUNP2(1, N). NE. 'K') THEN
      (GRタ "イシヤく3) セイシ "ヨウ)
1 F
                                               WRITE(LU06, 2310) N, BUNP2(1, N)
1 F
      (GR(3) セイシ "ヨウ)
                                               IERR1 = IERR1+1
      (GRタ "イシヤく3) サ "イ ナシ)
1 F
                                               BUNP2(1, N) = ''
THEN (GR9^*A>7>7<3>>3>7>7>7
                                             ELSE
      2 - 1
                                               IBUNP = (ICHAR(BUNP2(2, N)) - 240) * 10
      (GRタ "イシヤ〈4〉 セイシ "ヨウ)
                                                      +(ICHAR(BUNP2(3,N))-240)
1 F
                                               IF (IBUNP. LT. 1. OR. IBUNP. GT. KMAX ) THEN
      (GR〈4〉 セイシ゛ョウ)
1 F
                                                   WRITE(LU06, 2320) N, BUNP2(2, N), BUNP2(3, N),
      (GRタ "イシヤ〈4〉 サ "イ ナシ)
I F
                                                   BUNP2(1, N), IBUNP
      (サイテイレサ *イ ナシ)
1 F
                                                   IERR1 = IERR1+1
BUNP2(1, N) = ''
      2 - 2
                                                 ELSE
      (GRタ *イシヤ(X) イシ *ヨウ)
                                               END IF
THEN (GRタ イシヤ(X) ショウ フカ)
                                           END IF
      2 - 3
                                         ELSE
                                             IBUNP = (ICHAR(BUNP2(2, N)) - 240) * 10
      (GR〈X〉 イシ゛ョウ)
1 F
                                                    +(ICHAR(BUNP2(3,N))-240)
THEN (GRタ "イシヤ (X ) ショウ フカ )
                                             IF (IBUNP. LT. 1. OR. IBUNP. GT. JMAX ) THEN
                                                 WRITE(LU06, 2320) N, BUNP2(2, N), BUNP2(3, N),
                                                 BUNP2(1, N), IBUNP
      (キュウサ *イ カリオキ(3) サ *イ ナシ)
1 F
                                                 IERR1 = IERR1+1
       (キュウサ "イ カリオキ(3) セイシ "ョウ)
                                                 BUNP2(1, N) = ''
      (キュウサ *イ カリオキ〈3〉 オロシ コウホ〉
                                               ELSE
THEN
                                             END IF
                                         END IF
                                       ELSE
      1 F
                                         1BUNP = (1CHAR(BUNP2(2, N)) - 240) * 10
      (イサイキ〈3〉 サ * イ アリ )
1 F
                                                +(1CHAR(BUNP2(3,N))-240)
      (イサイキ〈3〉 セイシ゛ョウ)
1 F
                                         IF (IBUNP. LT. 1. OR. IBUNP. GT. IMAX ) THEN
THEN (オロシ サギイ アリ)
```

注:略語説明 SCD(Station Coodinator) 図2 SCD(ルール形制御)と 従来FORTRANの比較 従来 は、FORTRANなどの手続形言語で 記述されていた。このため、制御ノ ウハウをプログラム言語レベルの論 理に置き換え、制御プログラムの中 に埋め込むなど専門知識を必要とし た。これに対しSCDは、IF~THEN ルールにより運転知識をそのまま記 述できる。

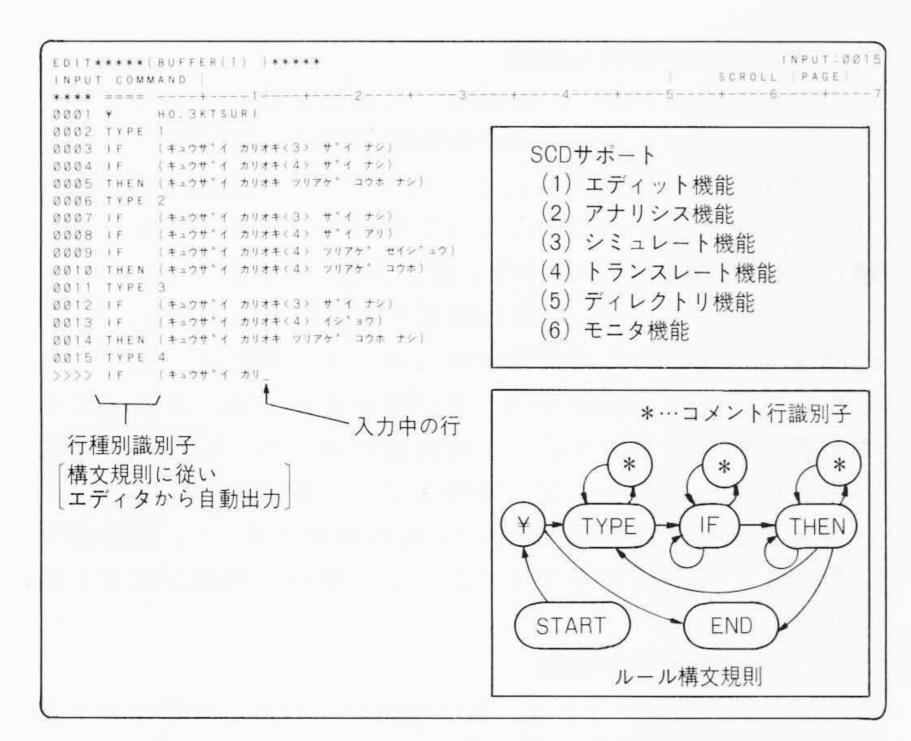
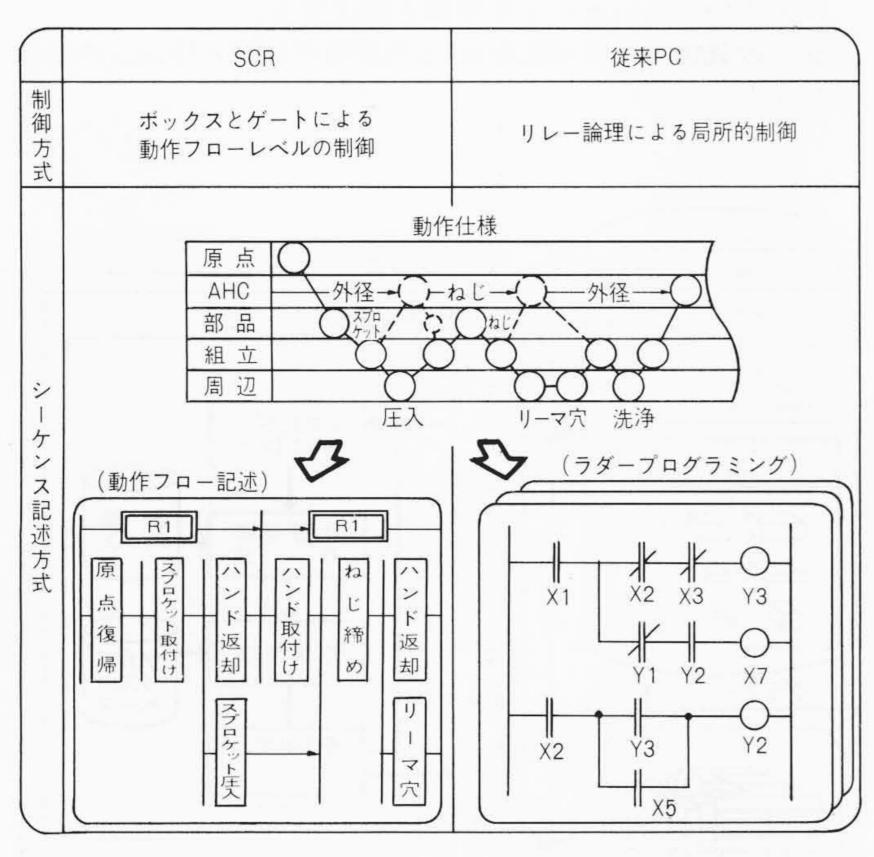


図 4 SCDルールエディタの画面例 利用者が容易にIF(条件)~THEN (結論)ルールを記述できるように、ルールの構文規則に従って入力できるようにした構文誘導形入力方式であり、これをルールエディタと呼ぶ。

する。入力された文字列は、1行ごとに固定部、パラメータ部に分割され、括弧の抜けやパラメータ長のチェックなどの文節単位のシンタックスチェック(アナリシス機能)を行なう。これにより、ルール開発時間の短縮が図れる。

SCDのサポートとしては、上記のエディット機能、アナリシス機能のほか、シミュレート機能、トランスレート機能、ディレクトリ機能及びモニタ機能も開発されている。



注:略語説明 SCR(Station Controller), PC(Programmable Controller), AHC(Auto Hand Changer), R1(ロボット動作中)

図5 SCR(動作フロー形制御)と従来ラダーの比較 従来,機器群の同期・排他制御には、ラダー言語が使用されていた。この言語は設計者の思考内容のレベルとギャップが大きく、動作の流れをそのまま記述できないため、専門知識を必要とした。これに対しSCRは、機器間制御の動作フローに従ってそのまま記述できる。

副 動作フロー制御ソフトウェアSCR

3.1 SCRと従来ラダー言語の比較

作業ステーション内のシーケンス制御には、従来PC(Programmable Controller)が用いられ、代表言語としてラダー言語が使用されていた。ラダー言語は、リレー回路によるハードワイヤードロジックをソフトウェア的に実現したものであるため、設計者の思考内容のレベルとのギャップが大きい。また、動作の流れが表現できないために、同期、排他のインタロックの組込みや修正が難しい。また、異常処理支援機能が弱いなどの欠点が、システムの規模が大きくなるにつれて問題になってきた。

これに対しSCRは、非同期、並行動作システムのモデル化方法の一つであるペトリネットモデルを用い、FA機器間の運転シーケンスや作業などの順序的知識を表現し、動作状態をモニタできるようにした。ペトリネットを制御向きにするために、PI/O(プロセス入出力)の条件、繰返し作業、ファイルのアクセスなどを扱えるように拡張し、これをC-Net(Control Net)と名づけた。SCRによる動作フロー記述とラダー記述の比較例を図5に示す。

3.2 SCRのソフトウェア構成

SCRのソフトウェア構成を図6に示す。C-Netは、(1)動作及び状態を表わすボックス、(2)ボックスの動作が実行中あるいは状態が占有されていることを示すトークン、(3)ボックス間のトークンの移動を制御するゲート、及び(4)ボックスとゲートの接続関係を示すアークの四つの基本要素から成る。C-Netで記述された動作モデルは、マンマシン端末からC-Net入力部を通じ、ボックス情報テーブル及びゲート情報テーブルに分けて格納される。ボックス情報テーブルには、図6に示すような動作定義データが格納される。一方、ゲート情報テ

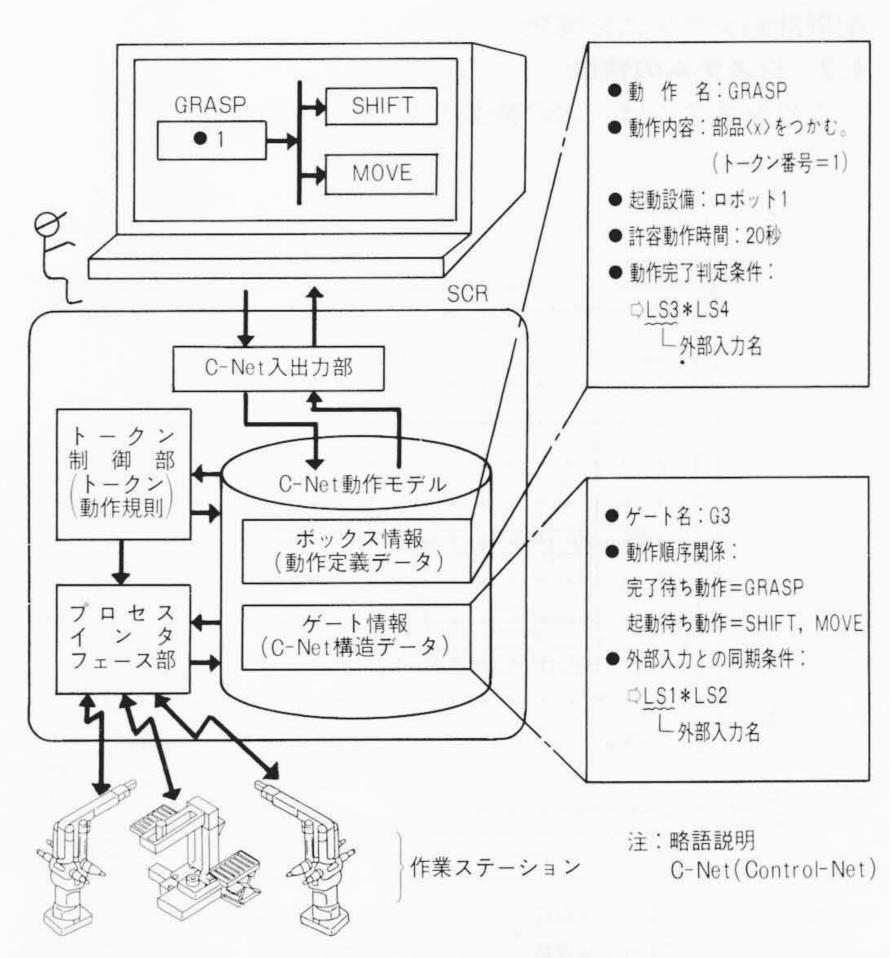


図 6 SCR(動作フロー形制御方式)のソフトウェア構成 FA機器群の同期・排他制御をボックス,ゲート,トークン,アークの四つの基本要素で表現するC-Net(Control-Net)によりモデル化し,動作モニタを行ないながらリアルタイム制御を実行する。

ーブルには、ボックスの接続関係を示すC-Netの構造データが格納される。トークン制御部は、ゲート情報テーブルを調べ、先に述べたゲートの通過条件を満たしてゲートを抽出し、トークンを動かす。新たにトークンが入ってきたボックスについて、プロセスインタフェース部が、制御メッセージ及びメッセージ送信先をボックス情報テーブルから読み出し、設備群へ制御指令を送出する。

3.3 動作フローの会話形入力方式

C-Netの入力、変更を会話形で容易に行なえるように、ライトペン使用による画面エディタを開発した(図7)。C-Netで定義すべきボックスデータ、ゲートデータ、モニタ表示用データなどを、ライトペンにより会話形にコマンドを選択しながら入力できる。この画面エディタを用いることにより、作業ステーション立上げ支援、稼動状況の把握及び異常箇所の検出が行なえる。

4 対話形貨物配置計画システム

4.1 従来法の問題点と対話形貨物配置計画システムのねらい

貨物の積付け作業の自動化のニーズは高く,従来から積付け作業の自動化装置として,オートパレタイザが開発されている。この装置は、同一寸法の貨物の積付け作業を対象としている。一方,異なる寸法の貨物を1個のパレット,コンテナなどに積み付ける作業も多い。この場合には、積付け装置の開発だけでなく、いかに積載効率(輸送器の容積に占める貨物の総容積の割合)の高い貨物配置を決定するかが重要課題となる。

寸法の異なる貨物の配置を決定する問題は,数学的には組合せ最適化問題であり,この問題を数理計画手法によって実用的な時間内に解くことは困難である。そのため,現状では計画者の手作業に頼っており,積載効率の低下,計画時間の増加を招いている。

これを解決するため、知識工学技術を応用した対話形貨物 配置計画システムを開発した。

4.2 システムの特徴

このシステムは,次の特徴をもつ。

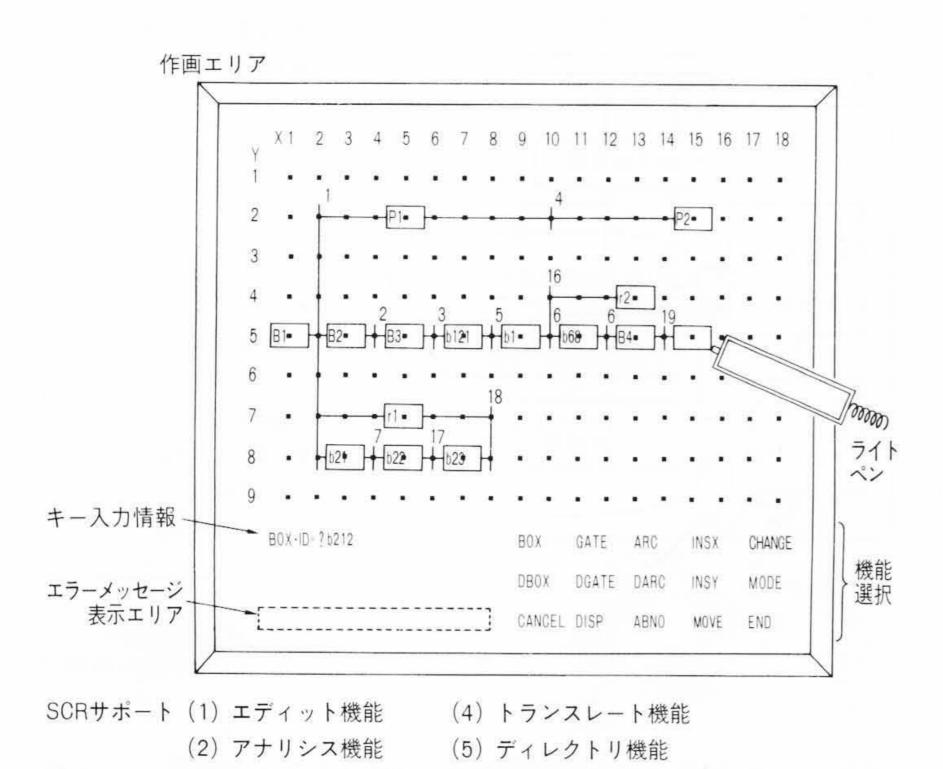


図7 SCR動作フローエディタの画面例 C-Netの入力,変更を会話形で容易に行なえるように、ライトペンを用いてボックスやゲートなどのコマンドを選択し、画面上でプログラミングできる。

(3) シミュレート機能 (6) モニタ機能

(1) 貨物配置自動決定機能

このシステムの第一の特徴は、自動決定機能をもつことである。この機能を、計画者の貨物配置決定に関するノウハウ(これを積付け知識と呼ぶ。)と2次元平面での配置決定アルゴリズムとを融合することによって実現している。すなわち、積付け知識(貨物配置の特徴と配置方針)を知識ベース化し、以下の手順を繰り返し、貨物配置を段階的に決定する。(a)前段階までに決められた貨物配置に対して、例えば、配置の決定されていない貨物が多い、広い面が存在する、といったその配置の特徴を抽出する。この特徴に基づき、知識ベース内の積付け知識を用い、どの貨物をどの位置に配置すべきかの代替案を自動作成する。(b)次に、各代替案に対して、貨物個々の配置を配置決定アルゴリズムにより求め、最適な配置を選択する。

(2) 対話形配置修正機能

上記(1)の機能だけでは、常に積載効率の高い貨物配置を決定できることは保障できない。そこで、上記(1)の機能で得られた貨物配置を、計画者が対話形式で修正できる機能を設けている。

4.3 システム構成

このシステムのソフトウェア構成を図8に示す。

(1) 貨物配置自動決定機能

この機能は、(a) 貨物配置の特徴抽出、(b) 代替案の作成、(c) 配置計算、(d) 配置結果の評価、を繰り返し、貨物配置を自動決定する機能である。計画プロセスを図9に示す。

(a) 貨物配置の特徴抽出

計画の途中段階での貨物配置に対し、その特徴を抽出する。

(i) 配置が決定されていない貨物(これを残貨物と呼ぶ。)の 特徴抽出

残貨物が多い,高い貨物が残貨物の中に存在する,といった残貨物全体の特徴と,残貨物個々の形状の特徴,例えば大きい,高いといった特徴を抽出する。

(ii) 残貨物を配置可能な面(これを積付け面と呼ぶ。)の特徴 抽出

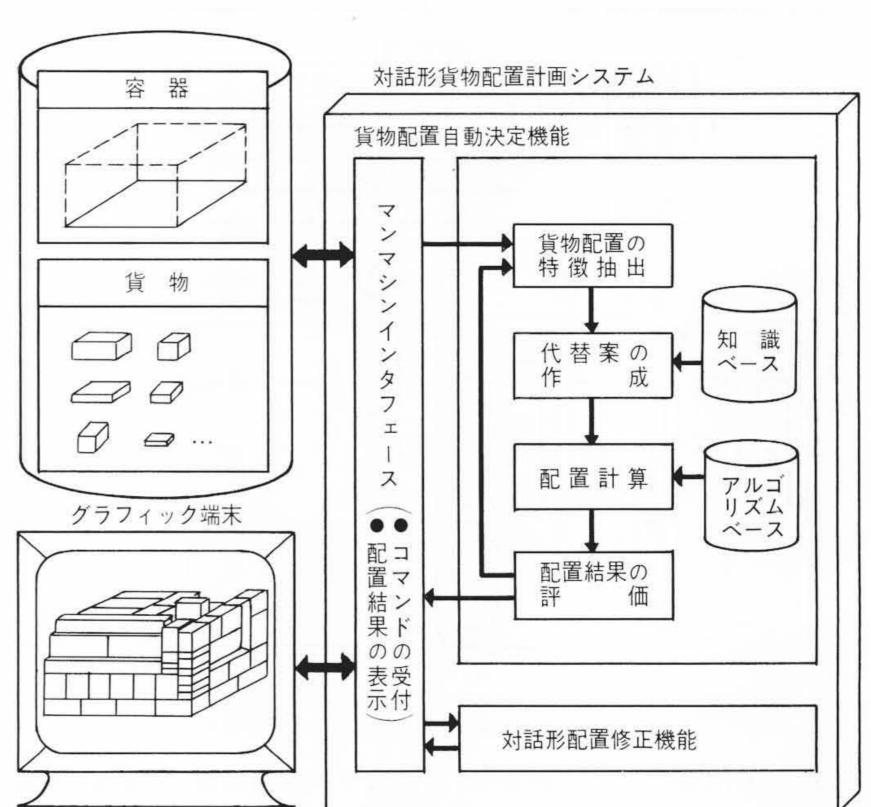


図 8 対話形貨物配置計画システムの構成 貨物配置を自動的に決定する機能と対話形式により貨物配置を修正する機能で構成し、貨物配置結果をグラフィック端末に透視画法で表示できる。

図 9 貨物配置自動決定機能 この機能は,貨物配置の特徴抽出,代替 案の作成,配置計算,配置結果の評価,を繰返して貨物配置を自動決定する。

積付け面が多い,広い積付け面が存在するといった積付 け面全体の特徴と,積付け面個々の特徴,例えば広い,低 いといった特徴を抽出する。

(b) 代替案の作成

貨物配置の特徴に基づき、どの残貨物(名称と個数)をどの積付け面に配置すべきかの代替案を作成する。代替案の作成には、知識ベース内の積付け知識を活用する。積付け知識とは、ある特徴をもつ積付け面に対して、配置すべき貨物とその配置形態とを表現した知識である。この知識はIF-THEN形のルールで表現する。

(c) 配置計算

代替案ごとに、積付け面上での貨物個々の配置を、2エリア配置方式¹⁰⁾、5エリア配置方式¹³⁾などの2次元平面での配置決定アルゴリズムにより決定する。

(d) 配置結果の評価

代替案ごとに決定した貨物配置から,最適な貨物配置を

選択する。このとき、代替案で与えられた積付け面に対する貨物配置の是非だけでなく、残りの貨物の配置に対する 是非をも含めて評価する。それは、代替案で与えられた積付け面に対する貨物の占有率が高くても、残りの貨物を各積付け面に均等に配置することが困難となり、積載効率の低下を招くからである。

(2) 対話形配置修正機能

計画者との対話形式で,貨物配置を修正する機能である。 ここでは、次の修正機能を用意している。

- (a) 輸送器内のすべての貨物の削除
- (b) 計画者から指示された貨物の削除
- (c) 計画者から指示された位置への指示された貨物の配置
- (d) 同一貨物の重ね積み配置
- これら修正の要求は、コマンド入力で実現している。

また、計画者による貨物配置の評価を容易に実現させるため、透視画法で貨物配置をグラフィック端末に表示している。

5 FAコントローラFMCと各基本ソフトウェア適用例

5.1 FAコントローラFMC¹²⁾

自律分散FA制御システムで、日程計画、在庫情報などの管理用データベース、及び貨物配置計画はV90シリーズの計算機やショップ管理用コンピュータSHOPCONに集約され、作業計画は下位FMCへ分配される。FMCは作業計画に基づき制御を実行するため、制御ソフトとしてSCD、SCRを搭載する。制御レベルでは、ロボット、NC(数値制御)の直接制御は原則的には機器コントローラ又はPLC(Programmable Logic Controller)に任せ、FMCは設備群、機器群の統括制御、協調制御を行なう。FMCは、16ビットマイクロコンピュータM68000を使用し、FA用LAN(ローカルエリアネットワーク)の μ - Σ Network(自律分散ネットワーク思想をもつ。)と結合し、拡張性、保守性及び信頼性を高めている。

5.2 SCDの適用例

SCDは、FMCのほか、V90シリーズに搭載され実システムに適用されている。代表例として、物流搬送システムや倉庫システムがある。本稿では、その中の一つである製鉄所のビレット精整プロセスへの適用例 7 について述べる。ビレット精整プロセスは、図10に示すように、10m前後の棒状の鋼材を探傷し、2台(将来4台)のGR(グラインダ)で効果的に研磨するシステムである。このFAシステムで、(a) グラインダ処理能力の最大活用、(b) 同一ロット材の分散防止、(c) 設備故障時の代替設備による切替運転の可能化、である。これを260ルールで実現し、プログラム開発工数を従来に比べ $\frac{1}{3}$ に低減できた。

5.3 SCRの適用例

SCRは、部品組立作業ステーションやロボットの協調制御などの順序制御に使用されている。このうち、ロボットの部品組立ステーションへの適用例を図11に示す。ロボット本体及び周辺機器との間の同期・排他制御をC-Netで記述し、ロボットの主要な部分の部品組立てを行なっている。C-Net記述により、プログラム開発工数を従来に比べ一に低減できた。

5.4 対話形貨物配置計画システムの実験評価

異形物貨物をパレット上に配置する例を,実データを用いて対話的に配置計画を行なった結果,熟練者の手作業による計画立案に比べ,同程度あるいはそれ以上の積載効率を実現するとともに,計画時間を $\frac{1}{10}$ ~ $\frac{1}{15}$ に低減できる見通しを得た。このことは,積載効率の向上による輸送コストの低減だけでなく,少ない計画者で多くの貨物配置計画を可能とする。また,本計画システムをV90/5~搭載し,現場設置の対話形貨物

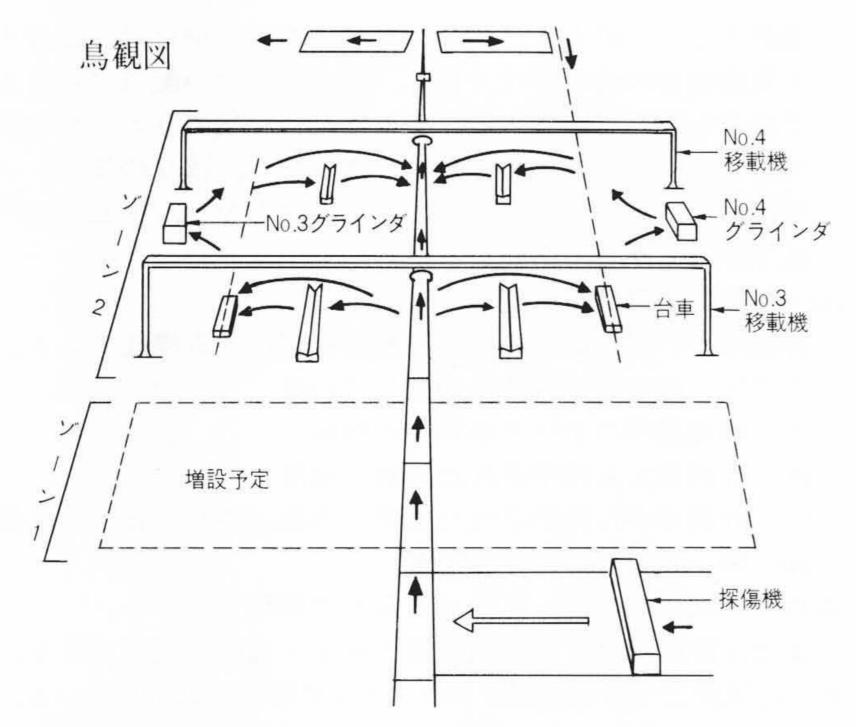
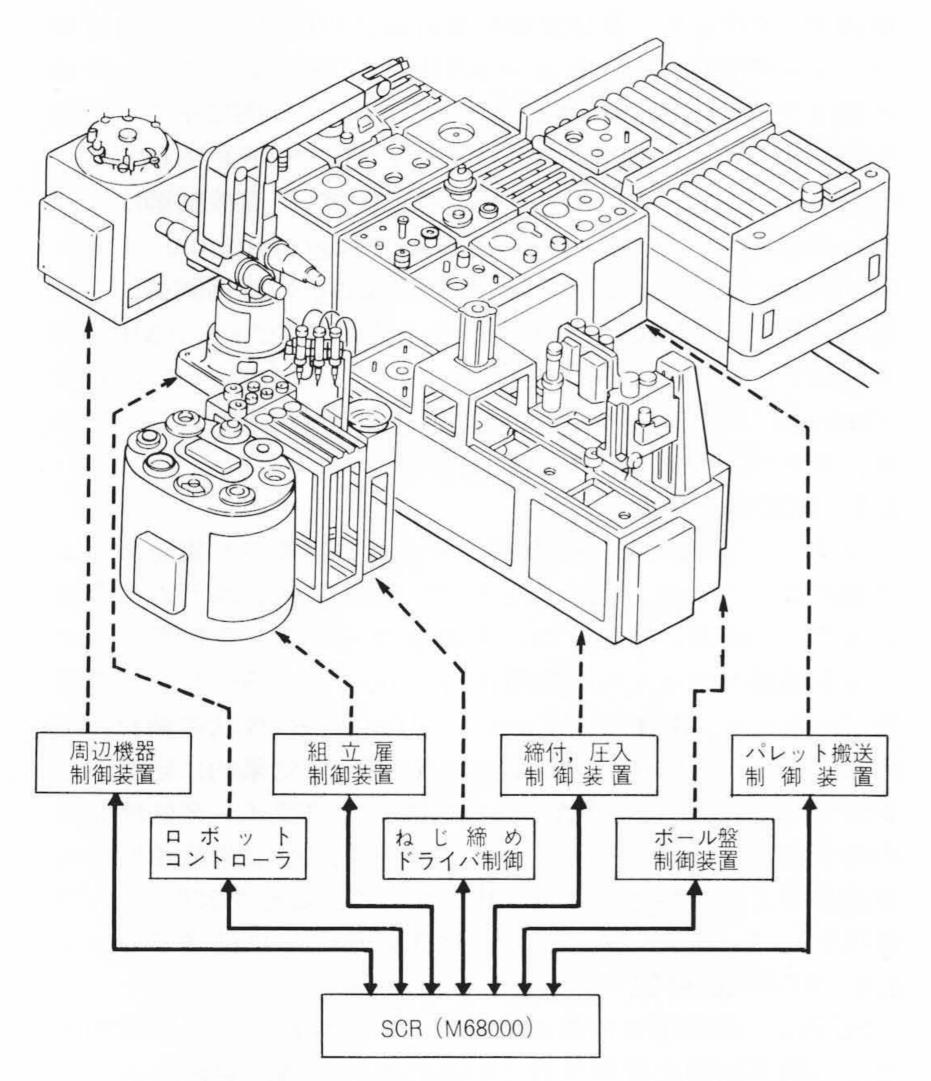


図10 SCD適用のビレット精整ヤードの例 10m前後の棒状の鋼材を探傷し、2台(将来4台)のグラインダで効果的に研磨するシステムでSCDを適用し、ソフトウェア開発工数の低減、現場の早期立上げ、保守容易性を実現した。



図II SCR適用のロボット部品組立ステーションの例 ロボット本体及び周辺機器との間の同期・排他制御をSCRのC-Netで記述し、組立ステーションの早期立上げ、保守容易性を実現した。

配置計画システムを実現した。

6 結 言

拡張性、保守性、高信頼性、開発工数低減化及び低価格化を実現する自律分散FAシステムと、その主要な構成要素であるFAコントローラFMCに搭載する知識形FA制御ミドルソフトウェアSCDとSCR、及びV90/5に搭載する対話形貨物配置計画システムについて述べた。このように知識工学の技術を新しいタイプのFA言語として利用し、16ビットマイクロコンピュータを使用したFMCやV90/5に搭載することにより、ユーザーが直接記述・保守できるようになり、多種少量・中量生産向けの自律分散FA制御システムを実現した。今後のFAは、試作量産形FAシステムへ移行してゆくと思われるため、ますます知識工学応用が図られると予想する。

参考文献

- 1) 松本,外:自律分散FA制御システム,電気学会東京支部大会,S.7-5(昭58-12)
- 2) 松本,外:ファクトリーオートメーションにおける自律分散 システム,日立評論,**65**,12,823~828(昭58-12)
- 3) 松本,外:知識工学のFAシステム制御への適用,ファクトリ・オートメーション(昭59-7)
- 4) N. Komoda, et al.: An Autonomous, Decentralized Control System for Factory Automation, IEEE COMPUTER (December 1984)
- 5) 田代,外:ルール記述に基づくシステム制御方式,計測と制御 Vol. 22, No. 9 (昭58-9)
- 6) 薦田,外:ルールベースコントローラ用ルール入力画面エディタ,情報処理学会第29回全国大会(昭59-9)
- 7) 都島,外:ルール形制御方式の実プロセス制御への適用,第 23回SICE学術講演会(昭59-7)
- 8) 村田,外:ペトリネットに基づく高フレキシブルFA制御システム,計測自動制御学会論文集,第20巻,第9号(昭59-9)
- 9) 村田,外:作業ステーション制御用ステーションコントローラ(SCR)用画面エディタ,情報処理学会第28回全国大会(昭 59-3)
- 10) 小西,外:三次元Cutting Stock問題の一解法と製品積載計 画問題への適用,日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト 集(昭57-10)
- 11) 天満,外:部分最適配置アルゴリズムを活用した対話型貨物 配置計画方式,第27回自動制御連合講演会予稿集(昭59-11)
- 12) 解良,外:分散型FAシステム用高機能コントローラHIDIC FMC(基本アーキテクチャー),情報処理学会第30回全国大会 (昭60-3)
- 13) E. Bischoff, et al.: An Application of Micro to Product Design and Distribution, J. Opl. Res. Soc. Vol. 33, No. 3 (1982)
- 14) 長谷川,外:マークフローグラフとFAへの応用,計測と制御, Vol. 22, No. 11(昭58-11)
- 15) 長谷川,外:非連続システムのためのマーク流れ線図の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 2 (昭59-2)