

ファクトリーオートメーションにおける自律分散制御システム

Autonomous Decentralized Control System for Factory Automation

中種中量生産あるいは多種少量生産のような多様な作業パターンに対応できるFA制御システムとして、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。本報では、FA制御システムを、ワークス、ファクトリー、ショップ、ワークセンタ(セル)、ワークステーション、ユニットの6レベルに階層化し、各レベルの機能を満たす計算機、FAコントローラ、ネットワークについて述べる。特に、ワークセンタ(セル)レベルでは、以下の三つの特徴をもつ。(1)HD68000をベースとしたFMCのハードウェア及びソフトウェア構成をもっている。(2)FMCへ組み込む制御用核ソフトウェアは、事象駆動形制御を基本とした制御用簡易言語POLとして動作フロー記述のSCRとルールベース記述のSCDをもっている。(3)ネットワークとして、自律分散思想に基づくADLネットワークと μ - Σ Netをもっている。

松本邦顕* Kuniaki Matsumoto

解良和郎** Kazuo Kera

加藤 猛** Takeshi Katô

三井善夫*** Yoshio Mitsui

松丸 宏**** Hiroshi Matsumaru

1 緒 言

従来、FA(ファクトリーオートメーション)に対する期待は、(1)危険作業、単純作業、悪環境作業から作業者を解放する、(2)高齢化、高学歴化による現場作業者の不足を補う、(3)多品種生産による多様なニーズへの対応、(4)生産性向上などであったが、最近はこれに加えて、(5)製品ライフサイクルの短期間化に伴うラインの柔軟性と早期立上げの実現、(6)FAシステムの高信頼性、及び事故時の原因の早期発見と早期復帰の実現、(7)現場オペレータによるプログラム作成と保守の実現、が求められるようになってきた。このニーズを実現するためには、信頼性、柔軟性、拡張性、保守性の高いFAシステムが必要である。これにこたえる方式として、サブシステムの自律性を保ちながら、それらを必要に応じ、自律性を損わぬよう留意しながら協調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¹⁾。

その核となるFA用簡易言語SCR(Station Controller)²⁾、SCD(Station Coordinator)³⁾は事象駆動形制御を基本としている。事象駆動形制御には、制御や情報の流れを記述する抽象化モデルであるペトリネット⁴⁾及びプロダクションシステムによる方法がある。これらの研究は、東京工業大学^{5),6)}、NBS(National Bureau of Standards)⁷⁾、RANDコーポレーション⁸⁾、MIT(Massachusetts Institute of Technology)⁹⁾、CMU(Carnegie-Mellon University)¹⁰⁾などでも進められており、FAの新世代の核技術となってゆくと考えられる。

2 自律分散FAシステム

2.1 自律分散FA制御システムの基本思想

緒言で述べたニーズを具体的に書き直すと、(1)情報・処理の統一性(生産計画から末端設備制御までの一貫したシステムの統合)、(2)システム開発工数低減[コンピュータパワーと情報、知識の融合によるSE(System Engineer)レスとプログラムレス、及びシステム立上げの迅速化]、(3)高信頼性(システムの無停止及び異常箇所の早期発見と復帰)、(4)柔軟性(システム構成、運用変更に対する柔軟性)、(5)拡張性・保守性

(設備計画に合わせた段階的システム構築とオンライン時の局所メンテナンス)である。これらのニーズにこたえるために、最近の高機能マイクロコンピュータ、制御ソフトウェア及びネットワーク技術を駆使し、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。

このシステムの特徴は、

(1) 管理集中・制御分散

FA計算機システムは、図1に示すように管理レベルに応じた階層構成となるが、(a)管理主体のファクトリー、ショップレベルはHIDIC-V90シリーズで集中管理し、(b)制御主体のワークセンタ、ワークステーションレベルはFMC(Flexible Manufacturing Cell Controller)で分散制御させる。FMCは、ワークセンタ(セル)レベルの設備機器のフレキシブルな生産制御を主目的とする分散向きFA専用コントローラである。

(2) フォールトトレランス性の追求

ワークセンタレベルの分散制御には、自律分散思想を適用している。信頼性向上は、仮にHIDIC-V90計算機がダウンしてもFMCは制御を続行し、更にFMCのダウン時も残ったFMCで協調制御が可能というように、フォールトトレランス性を追求している。また、拡張性の面でもシステムの増設、改造時にシステムの全体を停止することなく部分停止でこれを可能とするなど、分散システム構築上自律分散思想は極めて有効なコンセプトである。

(3) FMCのソフトウェア生産性向上

分散化されたFMCのソフトウェア開発、保守の生産性は極めて大きな問題であるが、これに対してはユーザープログラマブル及びメンテナブルなFA向き簡易言語(POL: Problem Oriented Language)をサポートし、これに込めている。

2.2 システムアーキテクチャ

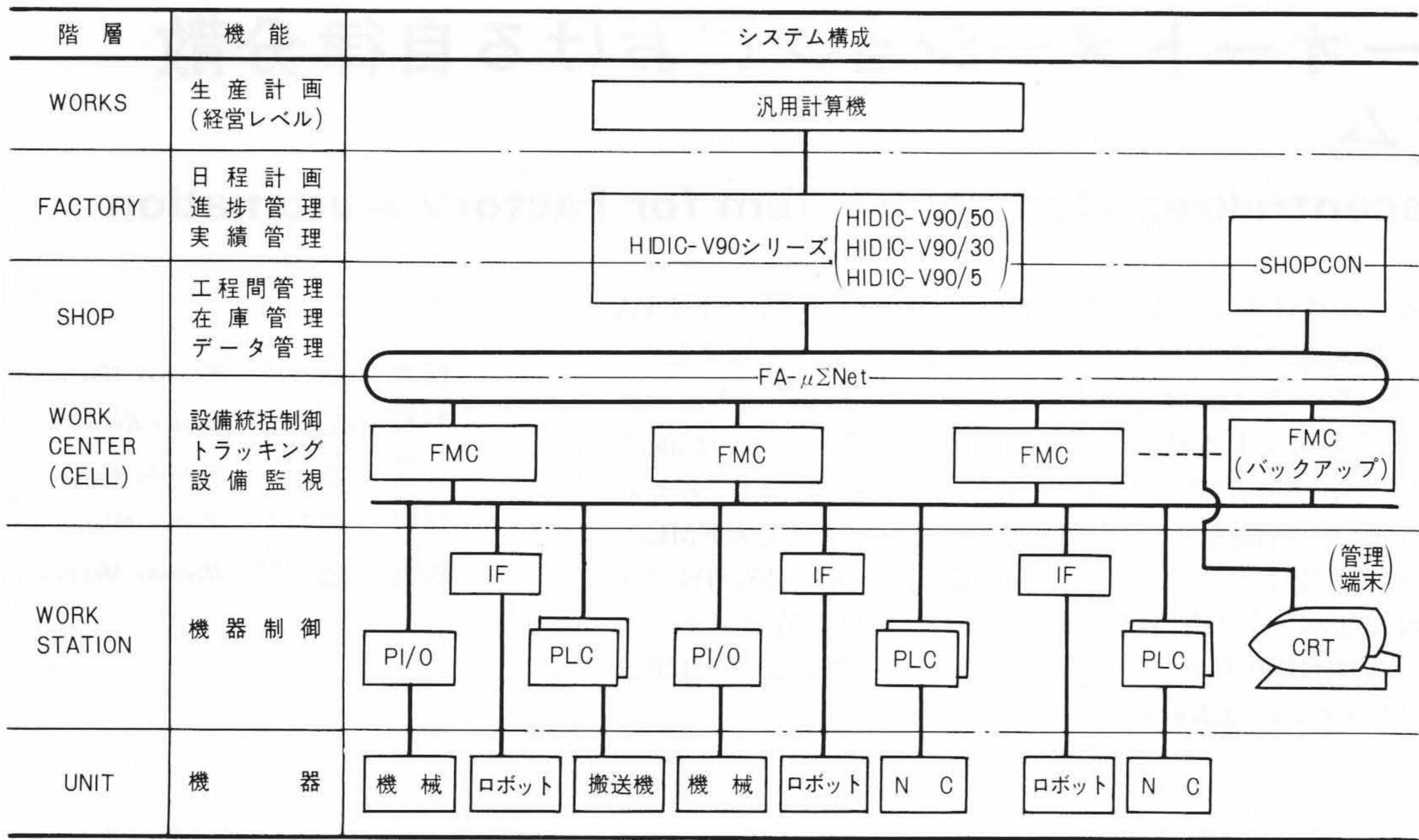
自律分散FAシステムの基本思想を実現するシステムアーキテクチャを図2に示す。システムは生産計画管理用汎用計算機HIDIC-V90、FMC及びFA用LAN(ローカルエリアネットワーク)、ADL(Autonomous Decentralized Loop)、 μ - Σ Net

* 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

*** 日立製作所機電事業本部

**** 日立製作所水戸工場



注：略語説明
FMC(Flexible Manufacturing Cell Controller)
PI/O(プロセス入力機器)
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1 FAトータルシステムの構成 FAシステムを図のように6階層に分け、各階層の必要機能を明確にし、各機能に適した計算機、ネットワーク、コントローラを準備した。

によって構成される。日程計画、在庫情報などの管理用データベースは、HIDIC-V90計算機に集約され、作業計画は下位FMCへ分配され、FMCは作業計画に基づき制御を実行する。制御のレベルでは、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)に行なわせ、FMCは機器群の統括制御、群管理を行なう。自動倉庫システムなどサブシステムでデータベースをもつ必要のある場合は、HIDIC-V90/5、SHOPCONを適用する。

FMCはオプションとしてN:1バックアップ(常用N台に対し予備1台)構成を可能とする。これは特に、フローショップ形のシステムの場合で1台のFMCのダウンが全体に影響を与えるようなケースに有効である。

このほか、機器の重要度に応じた異常時のフォールバックモードの選択など、きめ細かなフォールトトレランス技術の特徴とする。

次節で、これらの機能を実現するためのFMCのハードウェア構成及びソフトウェア構成を示す。

2.3 FMCのハードウェア

自動分散FAシステムの中心となるのは、FMCである。このハードウェア構成を図3に、ハードウェア諸元を表1に示す。本コントローラの特徴は、下記のとおりである。

- (1) 現場設置形16ビットマイクロプロセッサ
CPU(中央処理装置)は16ビットマイクロプロセッサを使用、メモリは512kバイトから1Mバイトまで実装可能である。
- (2) FA用LAN(ADL, μ-ΣNet)サポート
LANは自律分散サポートを前提としており、伝送速度は1Mbpsである。
- (3) PI/O, PLC接続用S-Bus
PI/O及びPLCサポート用である。ケーブル総延長1kmまで可能で、また、伝送速度は19.2kbpsである。
- (4) 豊富なI/Oレパートリー

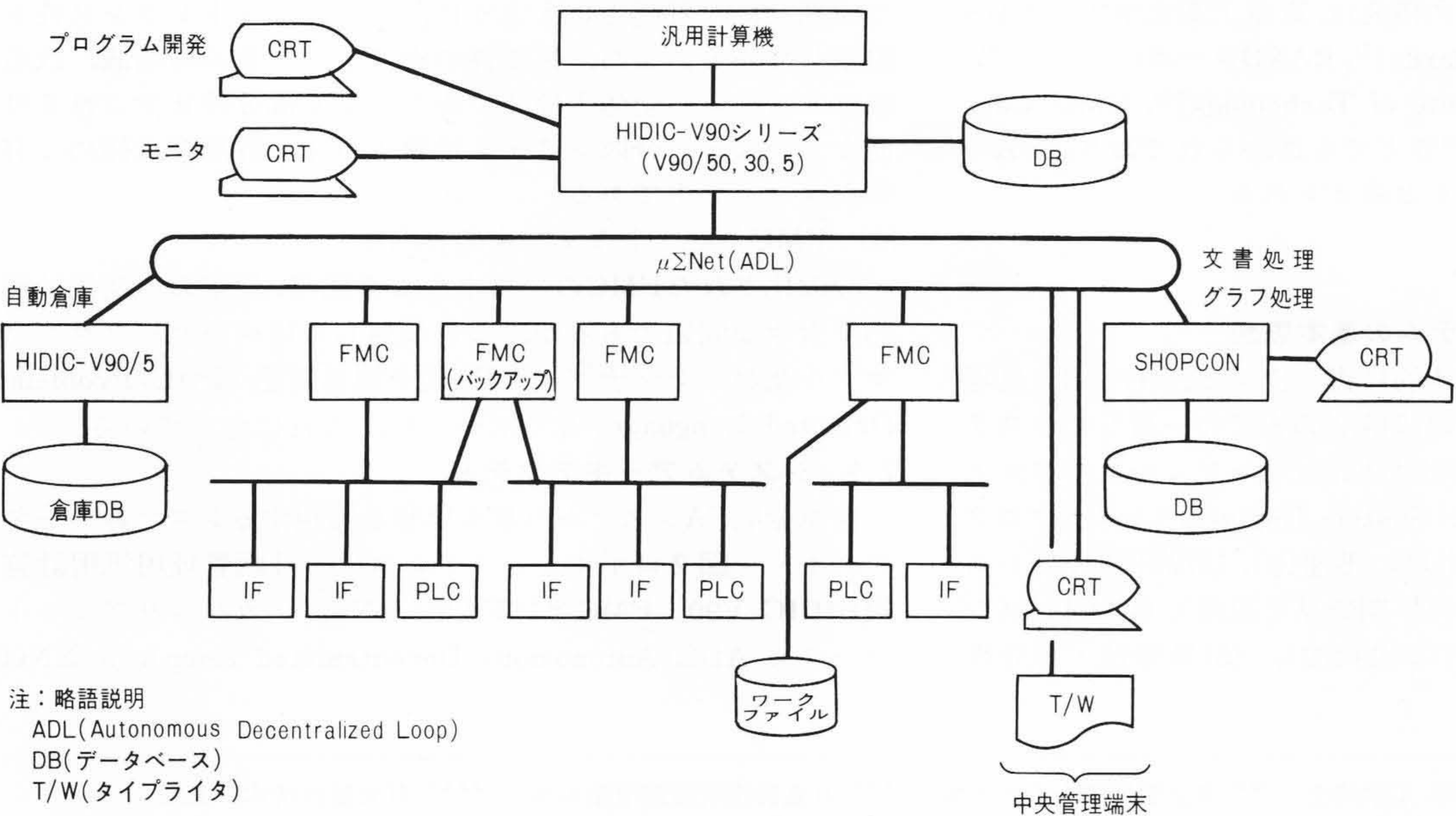
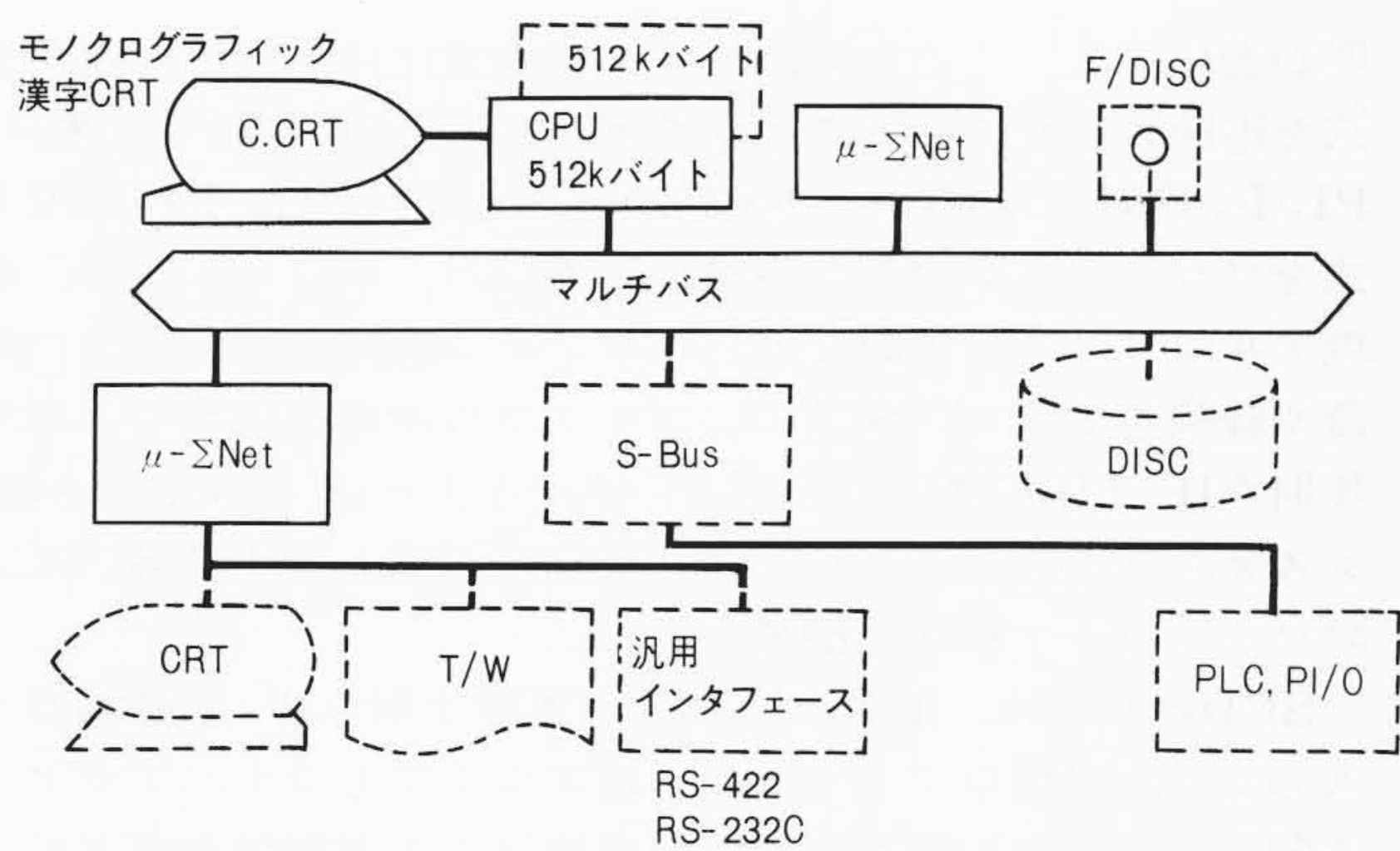


図2 システムアーキテクチャ 管理用業務及びそのデータベースは、HIDIC-V90に集約され、作業計画は下位FMCへ分配される。下位でデータベースを必要とする場合は、HIDIC-V90/5やSHOPCONが使用される。

注：略語説明
ADL(Autonomous Decentralized Loop)
DB(データベース)
T/W(タイプライタ)



注：略語説明など
CPU(中央処理装置), F/DISC(フロッピーディスク)
[] は、オプションを示す。

図3 FMCのハードウェア構成 ワークセンタ(セル)に適したコントローラで、16ビットマイクロコンピュータを使用しμ-ΣNetを介して上位計算機とPI/O及びPLC接続用S-Busを介してFA機器と結合される。

表1 FMC諸元 CPUにHD68000を使用した高機能FMCであり、マルチバスをもっている。

項 目	仕 様
マイクロプロセッサ	HD68000
命 令 数	56種
デ ー タ 長	8ビット, 16ビット, 32ビット
演 算 速 度	ADD 0.8μs(16ビット) MUL 9.0μs, DIV 20.0μs
割 込 レ ベ ル	7レベル
主メモリ	容 量 最大 1Mバイト
	サイクルタイム 480ns
	チェック方式 ECC
	プロテクション 7種
バ ス	インタフェース IEEE 796準拠(マルチバス)
	アクセスタイム 0.8μs
	DMA 速 度 1.5Mバイト/s
S-Bus	方 式 専用バスインタフェース
	伝 送 速 度 19.2kbps
	距 離 最大延長1km Max.16台

注：略語説明
ADD(Addition), MUL(Multiplier), DIV(Division), IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.), DMA(Direct Memory Access)

マルチバス上ではオプションとしてF/DISC(フロッピーディスク), DISC, GPIB(General Purpose Interface Bus), μ-ΣNet, S-Bus上にはRS-232C, RS-422をはじめPLC, PI/O(プロセス入出力機器), CRT(Cathode Ray Tube), T/W(タイプライタ)が接続可能である。

2.4 FMCコントローラのソフトウェア

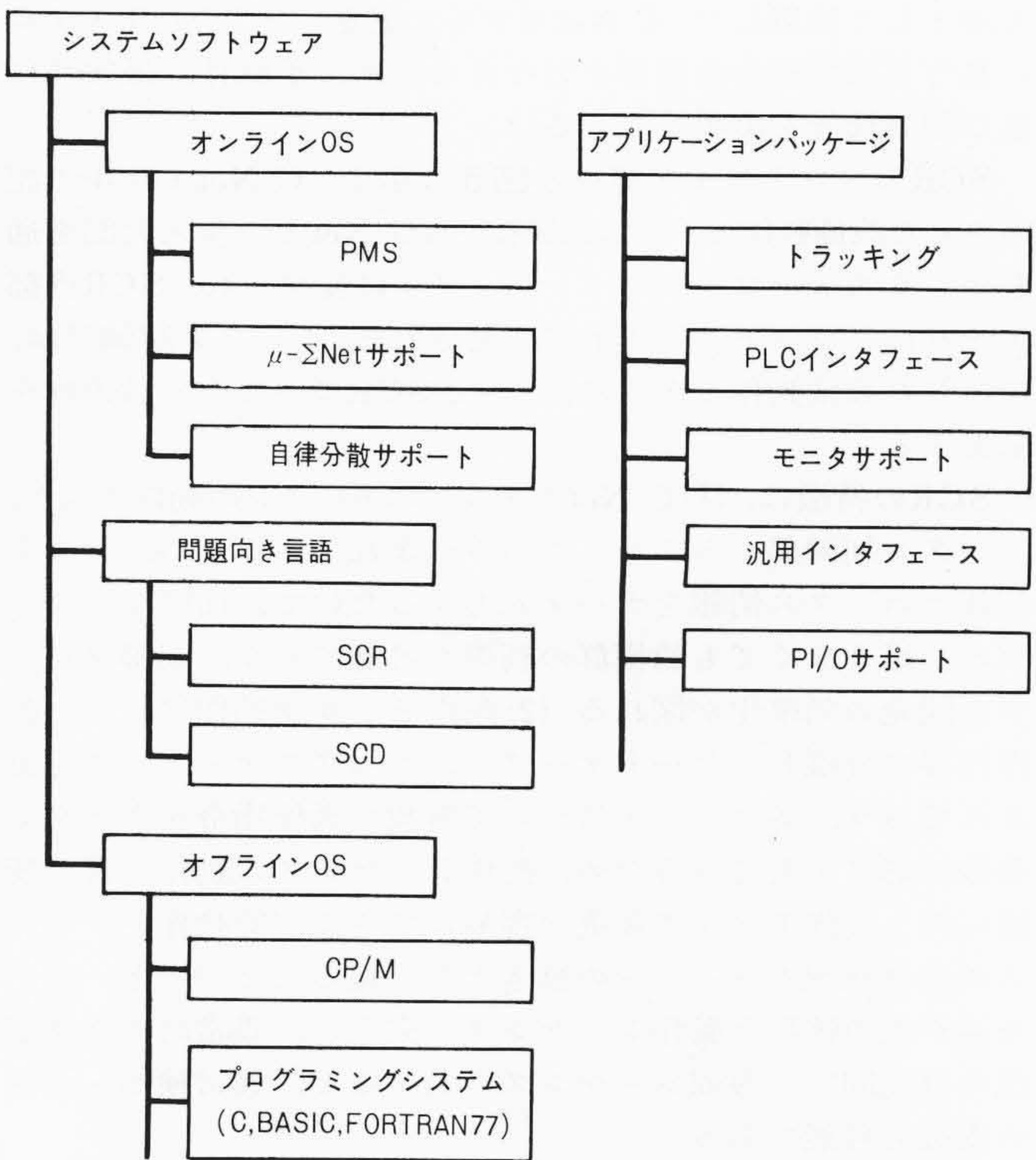
FMCコントローラのソフトウェア構成を図4に示す。

(1) OS(オペレーティングシステム)

オンラインOSとしてPMS(Process Monitor System), オフラインOSとしてCP/M(Control Program for Microcomputer: プログラム開発に使用)を利用できる。

(2) FAネットワークサポート

自律分散ネットワークのサポート及び保守集中化を図るプログラムのダウンロード、アップローディング機能を備えている。



注：略語説明
OS(オペレーティングシステム), SCR(ステーションコントローラ)

図4 ソフトウェア構成 オンラインOSとしてPMS, オフラインOSとしてCP/Mをもち、ユーザーは、SCR, SCDを用いて制御プログラムを作成できるとともに、CP/M下でC, BASIC, FORTRANも使用できる。

(3) FA用簡易言語POL (Problem Oriented Language: SCR²⁾, SCD³⁾) (第3章参照)

(4) 汎用言語によるプログラム開発

ユーザープログラマブルを指向しており、ユーザー言語はBASIC, FORTRAN-77, C, をサポートしている。

プログラム開発はターゲットマシンのほかHIDIC-V90など上位計算機でも可能である。

3 FA用簡易言語POL (SCR, SCD)

3.1 SCR, SCDの基本思想

システム構成・運用変更に対応し柔軟に制御プログラムを修正でき、システムの立上げ再調整、異常処理などを実現する制御ソフトウェアSCR, SCDについて述べる。順序制御が主体の組立ステーション内の機器群の制御ソフトウェアSCRと、条件組合せ制御が主体のFAショップ内のステーション間作業割付け、搬送車運行制御ソフトウェアSCDを開発した。SCRは、動作フロー記述による事象の自動同期・排他と動作状態モニタを実現でき、SCDは、現場の用語を使い、“IF(条件), THEN(動作)”型のルールによる運用規則の記述が可能である。

3.2 SCR

従来広く使われているラダーダイヤグラムでは、シーケンスの流れが把握しにくいという大きな欠点があり、ペトリネット^{4)~6)}を用いたシーケンス記述方法が提案されている。SCRは、ペトリネットをPI/Oの条件、繰返し作業、ファイルアクセスなどを扱うように制御向けに拡張したControl-Network Model(以下、C-Netモデルと呼ぶ。)を動作シーケンスの記述

方法として採用した。C-Netモデルで記述した設備動作モデルに基づき設備動作の制御を行なえるため、柔軟性、保守性に富む制御機能を実現している。

SCRのソフトウェア構成を図5に示す。C-Netモデルで記述された設備動作モデルは、端末からC-Netモデル入力部を通しボックステーブル、ゲートテーブルに変換され、SCR内部メモリにグラフモデルの形で記憶される。トークン制御部は、記憶した設備動作モデルに従って、SCRにつながる設備群を制御する。

SCRの特徴は、(1) C-Netモデルでのトークンの動作規則が、トークン制御部にあらかじめ組み込まれているため、ゲート情報とボックス情報をデータ入力するだけで、面倒なプログラムを組まなくても設備群の制御が可能であり、制御プログラム開発の効率化が図れる。(2) 動作モデルが動作フローと動作内容に分離してゲートテーブル、ボックステーブルに記憶されており、各ボックスについて複数の動作指令をトークン番号対応に定義できるため、動作シーケンスの動作内容の変更に伴う動作モデルの変更が容易にできる。(3) 動作シーケンスの進捗状況をトークンの動きとして見ることができ、高いモニタ性の確保と動作シーケンスの立上げ、異常時の異常部位の自動同定と復帰シーケンスの表示など、異常検出・復帰の支援も可能である。

3.3 SCD

FAのような離散形システムでは、システム規模の変化、取り扱う品種の変更などによって、そのシステム特性や運用規

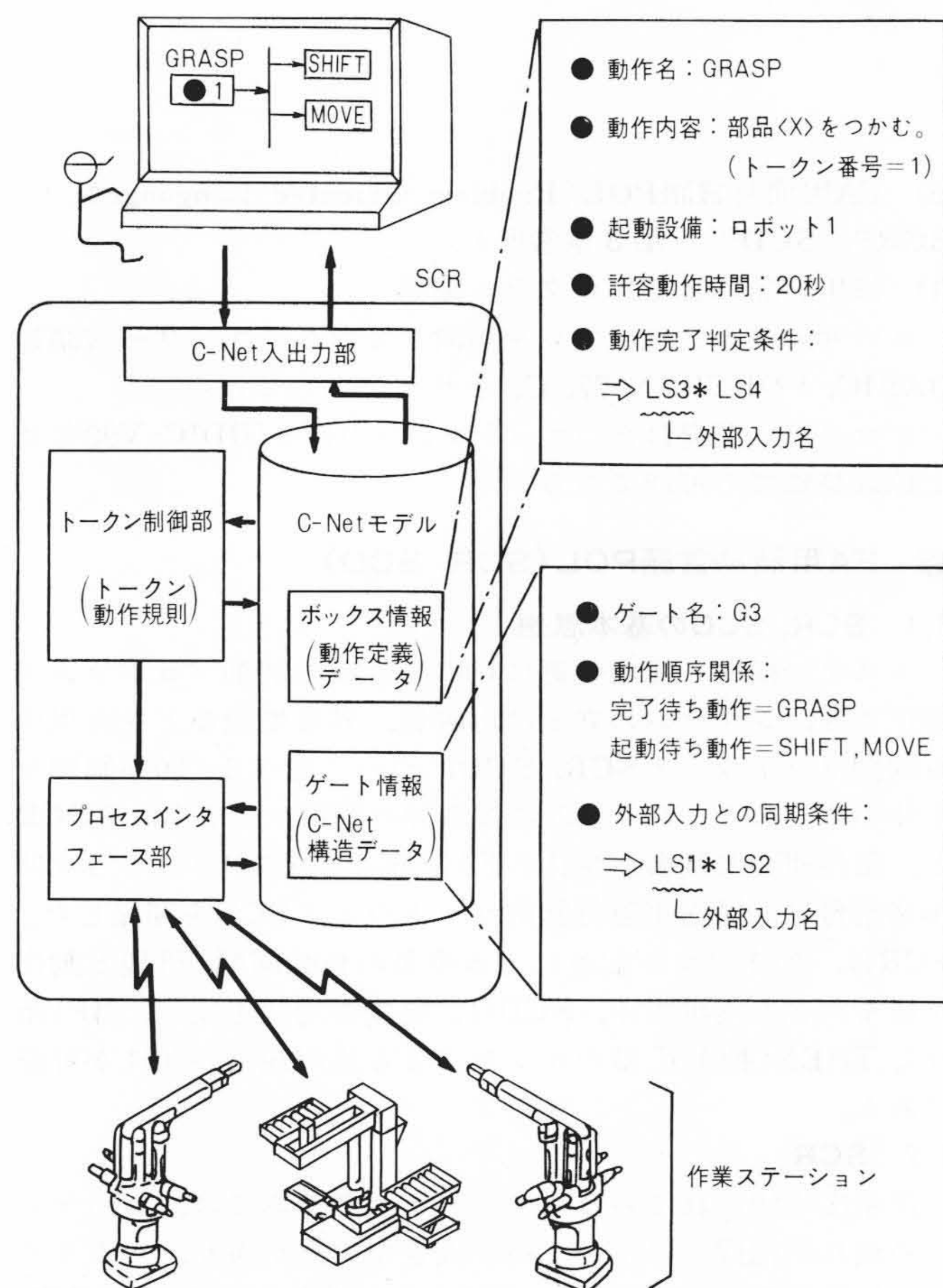


図5 SCRのソフトウェア構成 SCRは、動作順序が決まっている設備群の制御に適用できる。ユーザーは、ボックス及びゲートの条件を入力するだけでプログラム化でき、動作時は設備の動作状態がトークンによって表示される。

則が変化する。このため、対象の特性変化に追従して運用方式を迅速に変更できることが要求される。これに対し従来は、PL/IやFORTRANレベルの汎用言語を用いて、各種運用方式をプログラミングしていた。このため、テーブル設計、処理アルゴリズムの検討など、プログラム開発に関する専門知識や経験を要した。SCDは、プログラムの非専門家でも運用規則をIF-THEN型のルールデータで与えれば、自動的に対象システムの状態を取り込み、運用指令を決定し出力する。SCDのソフトウェア構成を図6に示す。

SCDの特徴は、(1) 制御方式を日本語を用いIF-THEN型で入力でき、面倒なプログラムを組まなくてもよく、プログラム開発の効率化が図れる。(2) 台車搬送や作業割付けなどのシヨップ内の運用規則の変更に対し、ルールの記述変更だけで容易に対応できる。(3) ルール適用状況モニタ機能やルール合理性自動判定機能を備えることによって、運用論理のチェックを可能とする。(4) ルール記述によってプログラム記述量を大幅に低減できる。

4 自律分散FAネットワーク

4.1 FA用ネットワークへの要求事項

FA用ネットワークには下記の事項が要求される。

- (1) 高信頼性：システム停止を起こさない高信頼性の確保
- (2) 拡張性：システムの段階的構築に容易に対応可能
- (3) 応答性：システムの機能を満たす実用的な応答速度の確保
- (4) 接続性：標準インタフェース及び接続ソフトウェアの準備
- (5) 耐環境性：動力源からのノイズ、温・湿度、塵埃などの影響を受けない。
- (6) 低価格化：ミニコンピュータ、コントローラ、端末などとの接続を低価格で実現

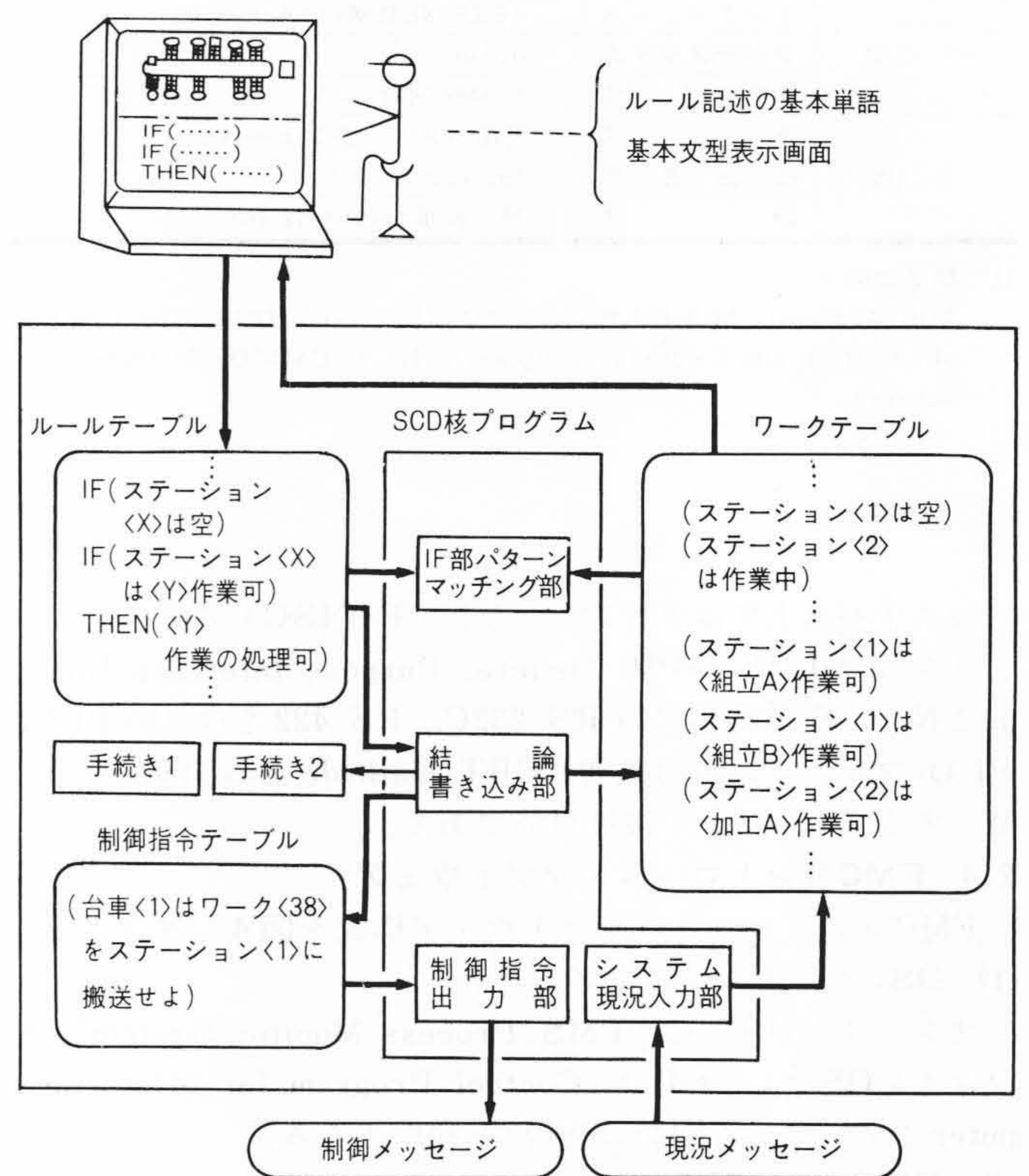


図6 SCDのソフトウェア構成 SCDは、条件の組合せによって制御出力が決まる設備群の制御に適用できる。ユーザーは、運転規則を“IF(条件), THEN(動作)”のルールで入力するだけでプログラム化ができる。動作時は、設備の現況を取り込み運転指令を出力するプロダクションシステムである。

(7) ネットワーク機能の充実：ホストマシンによる効率的なプログラム開発と保守の実現

4.2 自律分散ネットワーク(ADL, μ - Σ Net)

自律分散ネットワークは、図7に示すように伝送系に要求される信頼性、保守性、拡張性を自律分散思想によって実現する伝送システムである。伝送路としては、光ファイバだけでなくより対線も使用でき、一重ループはもとより高信頼性を実現するため二重ループも可能である。ADLを例として自律分散ネットワークを述べる。

ADLネットワークは、親のないマスタレスな伝送システムであり、NCP(Network Control Processor)と称する均一な伝送制御装置だけで構成されている。伝送制御は、FC(Function Code)と称する機能アドレスを用い行なわれる。伝送すべきデータはFCを付けてループ上へブロードキャストされ、各NCPはあらかじめ登録されているFCと照合し、自ステーションに必要なデータだけを自律的に選択受信し、ホストコンピュータ側へ送出する。このような伝送制御によって1回の伝送で効率良く多くの複数のステーションへ同一情報を送出できるとともに、ステーション増設などに対しても高い拡張性を発揮できる。

また、伝送路を二重ループにした場合、NCP自身が(異常の検知)→(う回構成)→(異常の回復検知)→(う回路解除)などのRAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能を自律的行なうため、マスタをもつ伝送システムに比べて極めてフォールトトレランス性は高まる。一重ループの場合でも、各ステーションから一定周期でデータを送出させ、特定のステーションでそれをチェックすることによって一重ループでありながら異常箇所を特定化できる。

以上のようなマスタレス、ブロードキャスト、選択受信な

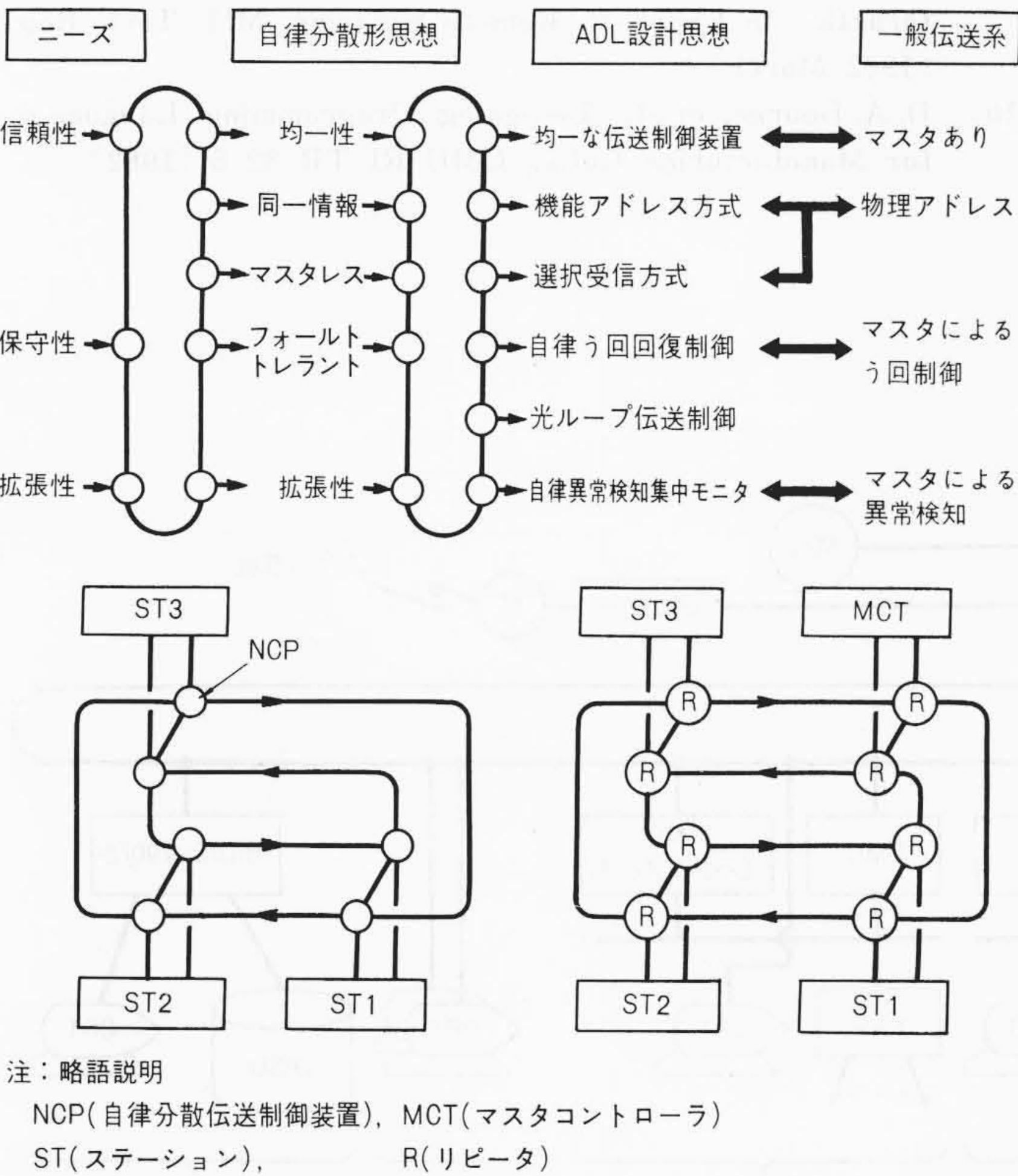


図7 ADL(自律分散ネットワーク)の思想 自律分散ネットワークは、伝送系に要求される信頼性、保守性、拡張性を自律分散思想によって実現している。光ファイバ又はより対線を使用でき、一重ループ又は二重ループを構成できる。

どユニークな特長によって、イニシャルコストを低く抑えながら、段階的にシステムを拡張したり、変更したりすることが容易にでき、この種ニーズの多いFA用のネットワークに適している。

FA向け自律分散ネットワークとしては、(1)フォールトトレランス性、オンライン拡張性、機能アドレス、ブロードキャスト方式などに重点を置いたADLと、(2)制御用計算機との結合性を重視し、トークンパッシング方式、ループバック機能、プロセス間通信やファイル転送、プログラムローディングなどに重点を置いた μ - Σ Netがある。

自律分散ネットワークADL及び μ - Σ Netの仕様を表2に示す。両システムとも小形・低価格化を目指しLSI化を図っている。

5 FAシステムの事例

5.1 小規模FAシステム

小規模システムではFMCコントローラ1台でシステムを構築できる。図8に示す例は、CNC8台と搬送車、その他から構成される機械加工ショップを、1台のFMCが制御する例である。作業スケジュールはCRTから人が入力し、作業の結果をタイプライタにプリント出力する。一方で設備の状況を判断し、作業スケジュールの優先順位を考慮しながら8台のCNCの群管理を行なう。将来はFAネットワークに接続することによって、上位生産管理用ホストコンピュータと結び、大規模FAシステムへと簡単に拡張できる。

5.2 大規模FAシステム

図9はフローショップに適用する大規模分散FAシステムの例を示す。本システムは、製造工程全体を自動化するもので組立加工用自動機群、ロボット群、工程間を結ぶコンベヤ及び自動搬送車群のFAに対し、FMCによる分散制御方式を採用している。ただし、ショップの生産管理用として高機能制御用計算機HIDIC-V90/30を二重系にし、片系ダウン時も残

表2 自律分散ネットワーク(ADL, μ - Σ Net)の仕様 自律分散ネットワークとしては、(1)フォールトトレランス性、オンライン拡張性、機能アドレス、ブロードキャスト方式などを重点に置いたADLと、(2)制御用計算機との結合性を重視し、トークンパッシング方式、ループバック機能、プロセス間通信やファイル転送、プログラムローディングなどに重点を置いた μ - Σ Netがある。

項番	項目	ADL	μ - Σ Net
1	システム規模	最大50ノード/ループ	最大32ステーション/ループ
2	ステーション間の距離	最大1km(光ファイバ) 最大100m(ペア線)	最大1km(光ファイバ) 最大100m(ペア線)
3	伝送速度	1Mbps	1Mbps
4	伝送路	光ファイバ又はペア線	光ファイバ又はペア線
5	伝送符号	CMI	マンチェスター符号
6	伝送手順	ブロードキャスト/選択受信(HDLC準拠)	HDLC準拠
7	データ長	最大256バイト/メッセージ(可変)	最大512バイト/メッセージ(可変)
8	伝送形態	N:M転送(ブロードキャスト/選択受信)	N:M転送
9	アクセス方式	レジスタインサージョン方式	トークンパッシング方式
10	外部インタフェース	●RS232C ●PI/O	●RS232C/RS422 ●IEEE488(GPIB) ●標準バス(MULTIBUSほか)
11	システムRAS	●自律構成制御(マスタレス) ●システムテスト EXT/BITによる診断	●伝送誤り制御 ●モニタN:1バックアップ ●ループバック ●トレース

注：略語説明
EXT/BIT(External Tester/Built-In Tester), CMI(Coded Mark Inversion), GPIB(General Purpose Interface Bus), RAS(Reliability, Availability, Serviceability)

りのHIDIC-V90/30でバックアップする。また、ラインレベルではFMCを冗長構成とし、各工程内のFMCがダウンしてもバックアップ用のFMCが制御を行なう。このように、ショップのコンピュータとラインのコントローラがそれぞれシステム停止をさせないように自律性を保ち、高信頼性を実現している。

6 結 言

以上、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制御システムについて述べた。現在、16ビットマイクロコンピュータを使用した低価格FAコ

ントローラが開発できる環境が整ってきたので、今まで以上に多くのコントローラを現場に設置することが可能となり、ラインの柔軟性や拡張性などの要求に対応できる。本報告で述べたコントローラFMC、制御ソフトウェアSCR、SCD、ネットワークADL、 μ - Σ Netは、新時代のFA制御システムを実現する手段であると考えている。

最後に、SCR、SCDの開発に関し、東京工業大学大学院総合理工学研究科教授・市川惇信工学博士に御指導・御討論をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

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 (昭58年12月)
- 2) 薦田, 外: FAステーションコントローラ (SCR) の開発, SICE第9回システムシンポジウム (昭58年8月)
- 3) 田代, 外: プロダクションシステムを用いた分散型システムの運用自動決定機構, SICE第1回知識工学シンポジウム (昭58年3月)
- 4) J. T. Peterson: Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Prentice Hall (1981)
- 5) 長谷川, 外: マーク流れ線図と不連続システム制御, SICE第7回システムシンポジウム (昭56年10月)
- 6) 市川, 外: 事象駆動型システムの表現と制御, 計測と制御, Vol. 21, No. 10 (昭57年10月)
- 7) J. A. Simpson, et al.: The Automated Manufacturing Research Facility of the National Bureau of Standards, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 1, No. 1 (1983)
- 8) D. McArthur, et al.: An Object-Oriented Language for Constructing Simulations, Proc. of Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (1981)
- 9) T. B. Sheridan: Supervisory Control, Problems, Theory and Experiment for Application to Human-Computer Interaction in Undersea Remote Systems, MIT Tech. Rep. (1982 March)
- 10) D. A. Bourne, et al.: Designing Programming Languages for Manufacturing Cells, CMU-RI-TR-82-5 (1982)

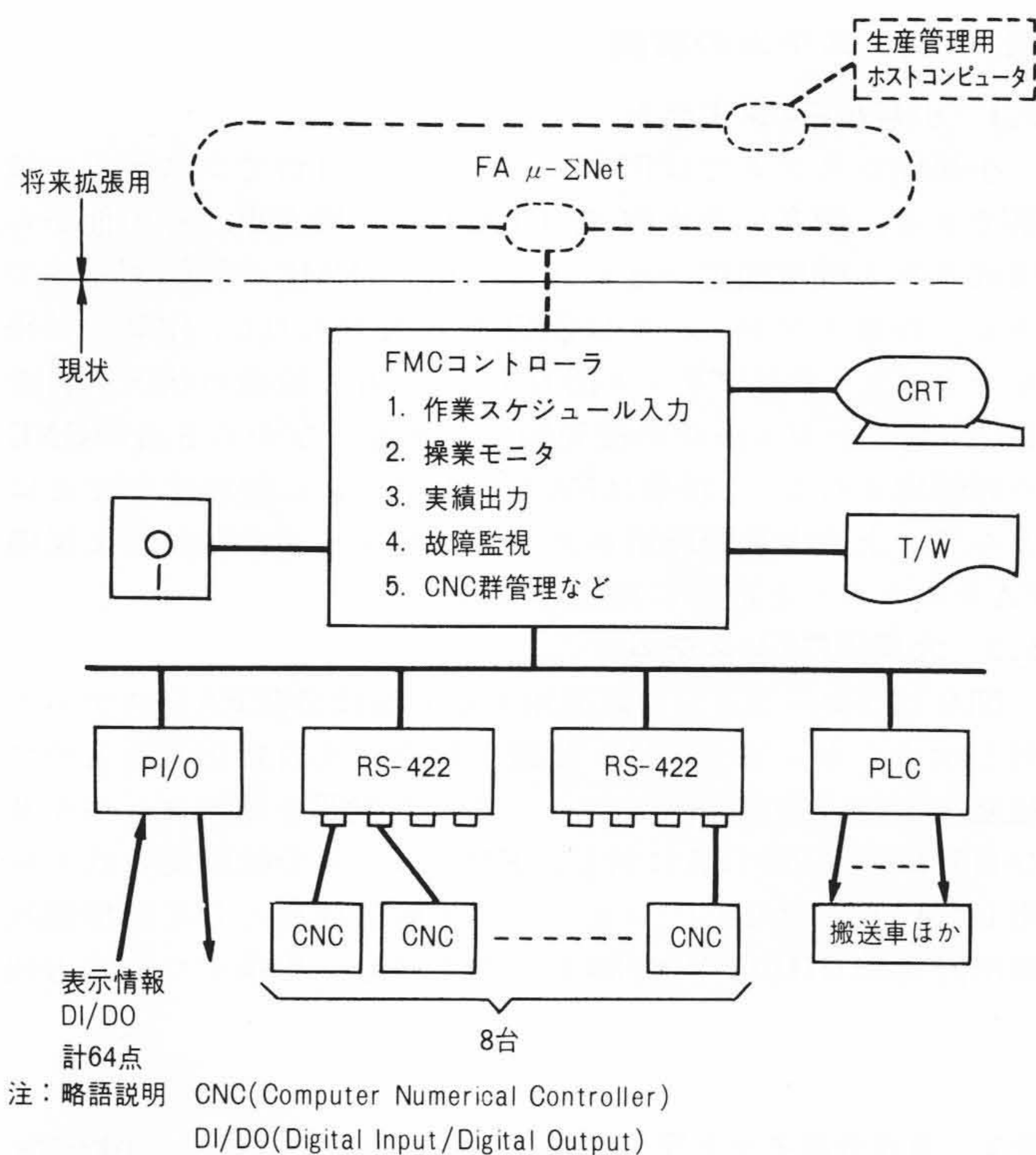


図8 小規模FAシステム構成例 CNC 8台と搬送車などから構成される機械加工ショップに、FMCコントローラを適用する例であり、将来は、 μ - Σ Netに接続することによって、ホストコンピュータと結合可能となる。

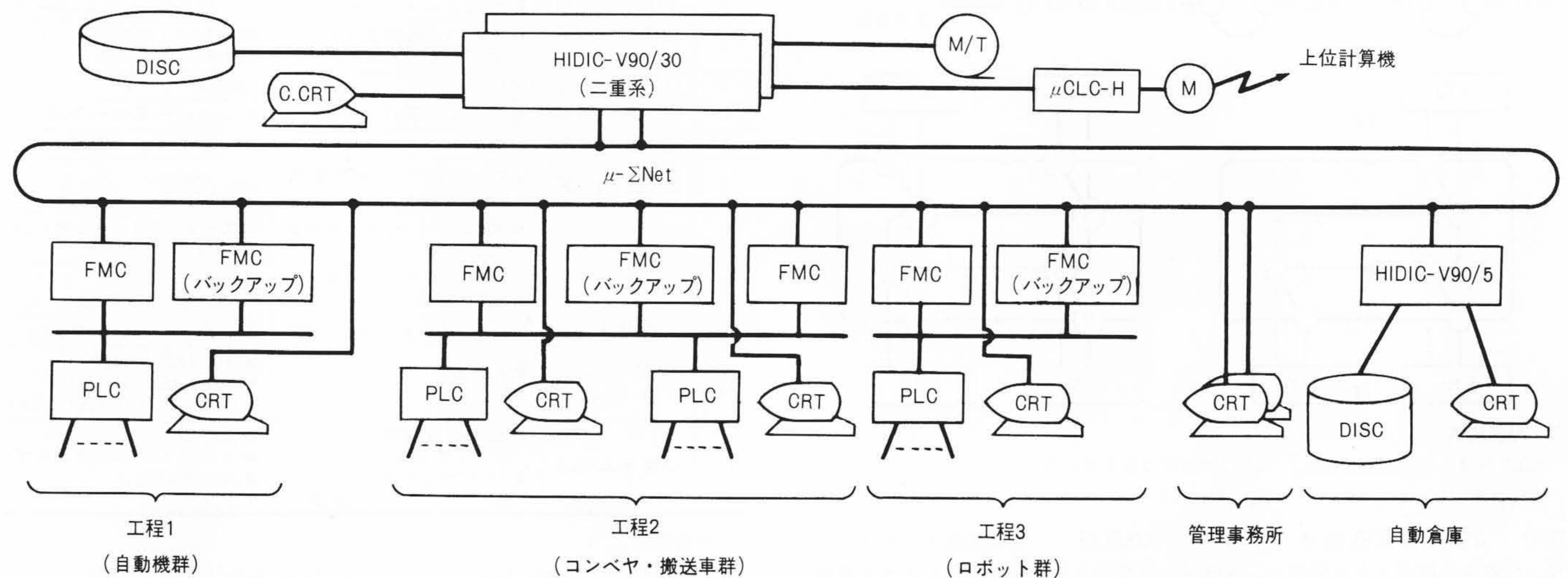


図9 大規模FAシステム構成例 この例は、自動機群、コンベヤ・搬送車群、ロボット群を含む大規模FAシステムで、HIDIC-V90/30とFMCを適用する例で、FMCのN:1バックアップによってシステム無停止を実現する。