

自律分散制御の交通システムへの応用

Autonomous Distributed System for Railway Traffic Control

システムが複雑で大規模化してくると、信頼性、保守性及び拡張性に関して、集中形では対応できなくなってくる。一方、半導体技術や光伝送技術などの新しい技術は、従来コスト的に不利と考えられていた分散形の利点を顕在化し、分散形計算機システムや制御装置が導入されつつある。ここに、生物体に分散システムの範をとり、自律分散システムを構築する。

新提案のこのシステムは、一般にシステムは常に不稼動部分を含んでいるとの認識に立っており、自律可制御、自律可協調の性質をもち、その評価は機能信頼性で表わされる。この考え方は、軌道輸送システムに適用され、自律分散伝送システムに結び付けられた列車運行システムとして実現されている。

井原 廣一* Hirokazu Ihara
松丸 宏** Hiroshi Matsumaru
大島 弘安*** Hiroyasu Ôshima
刈谷 志津郎**** Shizurô Kariya
堀 孝正***** Takamasa Hori

1 緒言

一連の半導体技術は、演算や記憶の高速化、高信頼化及び低価格化をもたらし、光伝送技術は回線コストの低減、高速化及び高信頼化を促しつつある。

一方、交通システムのような社会システムや、製造プラント、エネルギープラントなどは、巨大化し複雑化して高い効率と信頼性をもつことが要求されており、これを可能とするために、情報系、制御系の構成を見直し、従来の集中形から分散形へ移行するものがでてきている¹⁾。

情報処理の分野では、取り扱う情報の一元化という点から本質的に集中化の意味はあるが、制御分野では、本来分散しているサブシステムを統合して、調和のあるシステムを構成することに分散システムの意義がある。

ここに提案する自律分散システムは、範を生物体に求め、最近の分子生物学の成果を反映して、システムの構築を半導体技術、光伝送技術を利用して行なうものである。

2 自律分散システム²⁾

今まで、分散システムを考えると、システムは機能単位に分割され、それぞれが能率的に動作することにより、システムとして目的を効果的に果たすものとされていた。したがって、システムの状態を表わす言葉として、稼動中・保守中・故障中、正常動作・異常動作、製作中・拡張中・テスト中、あるいはシステムの寿命・リプレイスなどが使われ、システムを確定的にとらえていた。

一方、生物体をシステムとしてみると次のように表現できる。

- (1) システムは常に不稼動な部分を含む。
 - (2) システムの状態は常に変化しており、維持プロセス(新陳代謝)や成長プロセスにある。
 - (3) しかし、システムの目的は常にほぼ達成し続ける。
- 別の表現を用いれば、従来の表現である異常状態が通常と考えるべきであって、従来正常と考えていた状態は、システムの一つの状態にすぎないということになる。

このような観点に立って、分散システムとは、

- (1) サブシステムの機能と目的を第一義にとらえ、その統合されたものとする。

- (2) システムを、ライフサイクルプロセスをもつものとする。としておく。

生物体では細胞が最小単位のサブシステムで同一の構造をもち、もっている情報も同一である。しかし、その置かれた場所に従って異なった機能を発揮する。そこには、細胞を統合して制御するものは見当たらないが、器官としての機能は存在する。すなわち超分散システムの範といえよう。

以上のことから、分散システムは互いに独立して機能を発揮し、そのサブシステムは均一の構成要素から成り立っており、それらを統合して監視制御するものは存在しないものであり、環境に順応して機能を発揮するように互いに連携する

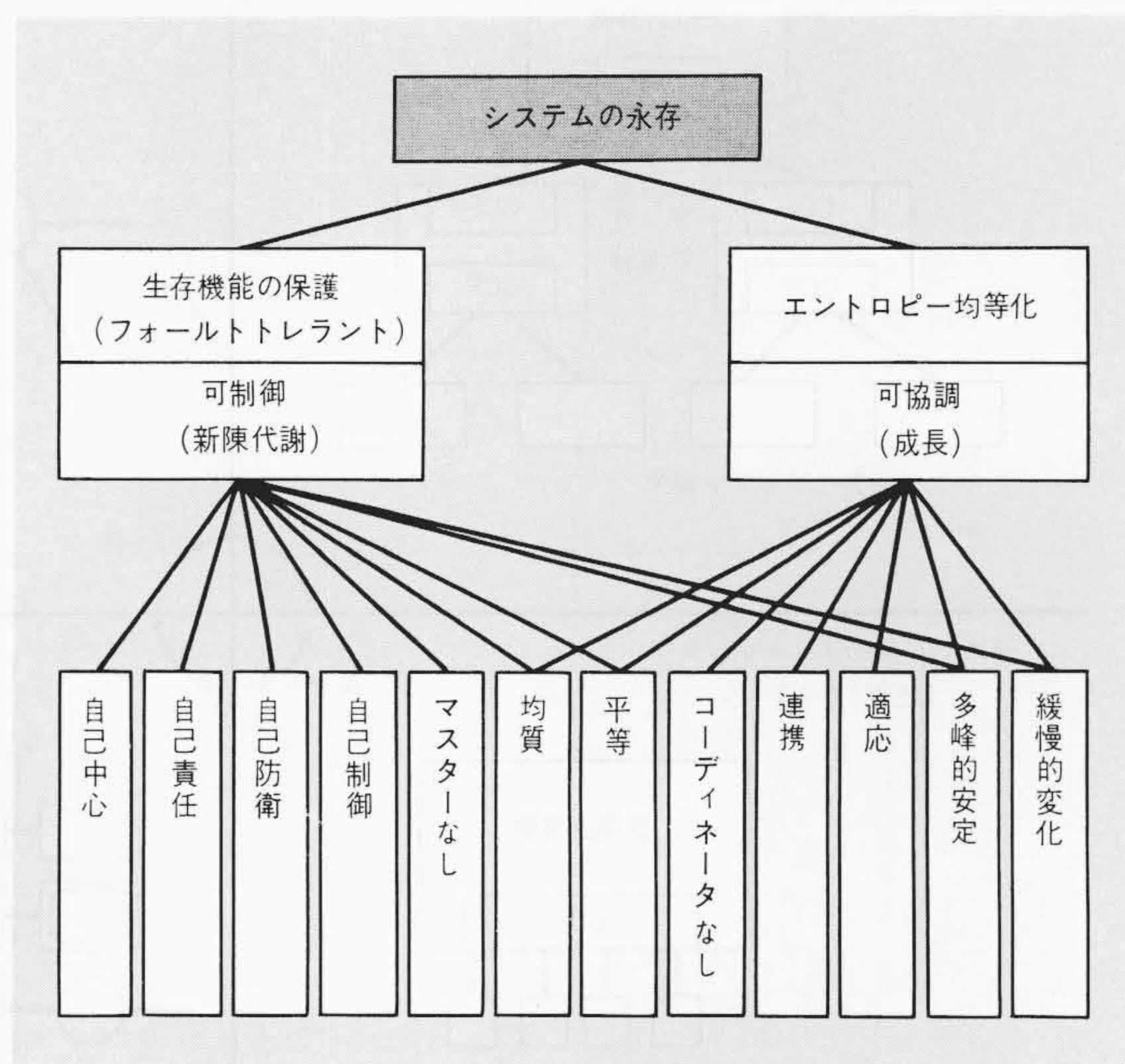


図1 自律分散システムの特性 自律分散システムは、生物体のシステムと類似な面をもつものとして特徴づけられ、その特性を列挙すれば図示のようになる。

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所水戸工場 *** 日立製作所機電事業本部 **** 日立製作所システム事業部

***** 日立製作所日立研究所 工学博士

能力をもつことになる。

以上述べたことをまとめたのが図1で、提案する自律分散システムは、各サブシステムが他のサブシステムの状態に関係なく、それ自身単独で与えられた機能を発揮することができ(自律可制御)、他のサブシステムと協調をとってシステムとしての目的を達する(自律可協調)ように分割されたサブシステムから成るシステムと定義する。

このようなシステムは、広い意味で高信頼性を実現することを目指す。すなわち、従来の信頼性理論に裏づけられた機器の稼働率でなく、システムの目的機能がどの程度達成されるかという指標(これを機能信頼性と呼ぶ。)がシステムの評価を表わすことになる。すなわち、ハードウェア、ソフトウェア、操作員、保守関係、システム環境などシステムの目的達成に参与するすべての資源を考慮した信頼性である。

3 自律分散システムの位置づけ

自律分散システムの位置づけを、システムの構成法と制御モデルの両面から簡単に述べる。

3.1 計算機システムの構成

計算機システムの構成法については、種々の分類が行なわれているが、システムのコストと信頼性を軸とした分類を試みると図2に示すようになる。

第3象限の集中システムは、Groshの唱えたコストパフォーマンスを追求したもので、多重系構造によりシステムの

故障状態を避ける。銀行システムや座席予約システムがこの例に当たる。

第2象限は、階層システムと言われるもので、分散システムとして分類されるが、各階層でのコストパフォーマンスを最大にする構成で、機能的には集中形である。各サブシステムを独立で動けるようにし、上下間の相互バックアップにより可制御性を保とうとしている。鉄鋼や生産工場での生産情報システムがその例である。

第4象限のシステムでは、各サブシステムは機能を分割して与えられており、それ自身単独で動くことはできないが、他との協調により与えられた機能を最大限に発揮する。機能の信頼性を挙げるため多重化の構造をとる。この例として、交換機システム、計算機システムがある。

さて、第1象限であるが、自律分散制御システムはここに位置する。フォールトトレラント性と機能の信頼性を重視した、インテリジェントなサブシステムの集合体である。

3.2 制御モデル表現³⁾

鉄道を制御対象の例として、制御モデルを考えると、二つの異なったモデルが導かれる。第1のモデルは各駅での列車の発車時刻を制御するように、各駅ごとに同一のコントローラをもち、各駅は同一の機能をもつ場合である。他は、全線にわたって安全保安を行なう信号系と電力供給制御を行なう電力系のように、同一の列車群を異なった目的で制御する場合である。前者をベクトル形と呼び、後者をマトリックス形

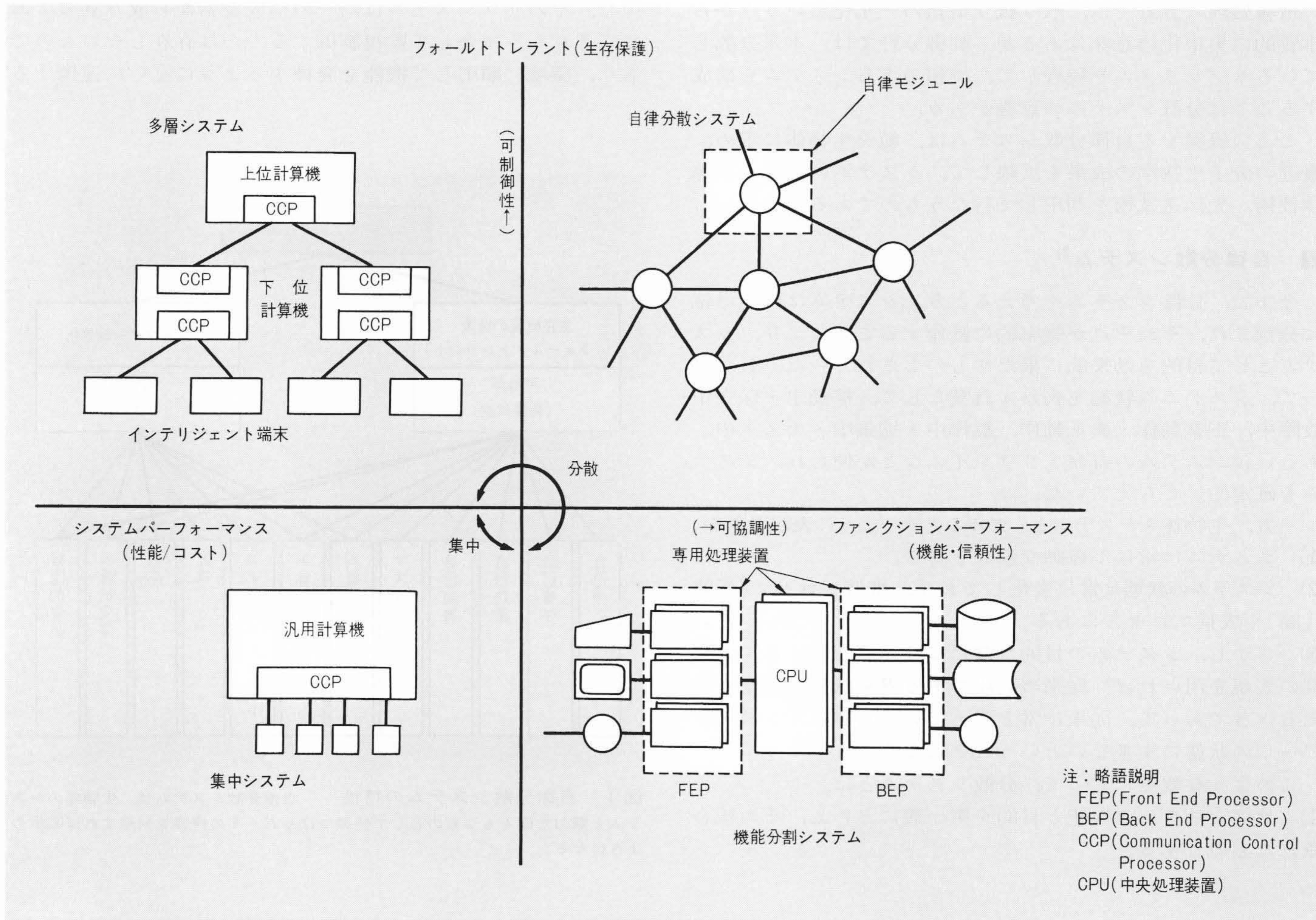


図2 自律分散システム構造の位置づけ

計算機システムを信頼性と性能の面から分類して、フォールトトレラントとファンクションパフォーマンスを重視するものを自律分散システムとした。

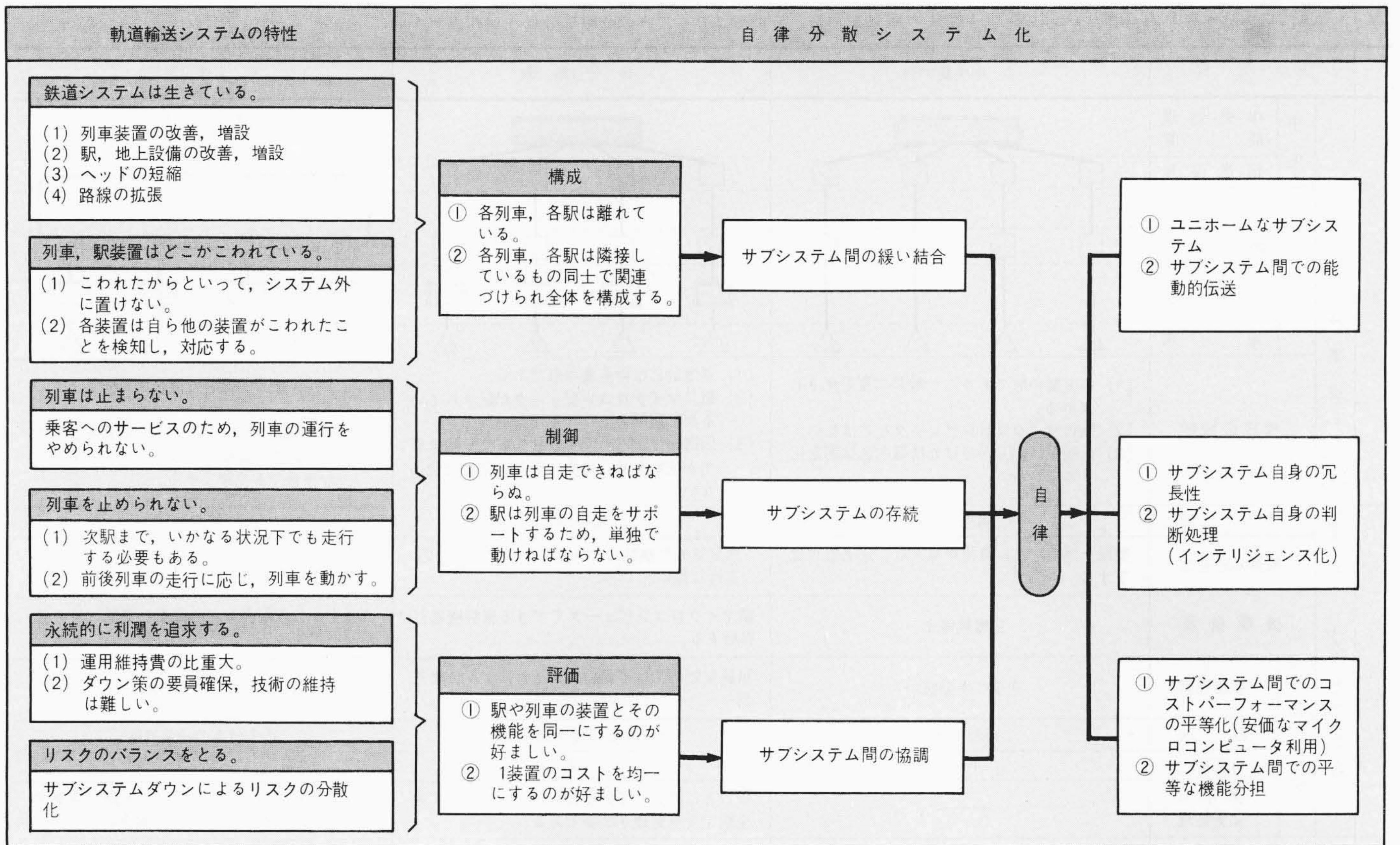


図3 軌道輸送システムの自律分散システム化 鉄道、地下鉄、新交通などの軌道輸送システムの特性から、自律分散システム化が必要となる。

と呼ぶ。

ベクトル形は対象を分割し各サブプロセスごとにコントローラを対応させる。このとき、各サブプロセス間の相互干渉はあるが、各コントローラが他のプロセスを直接制御することはできない。すなわち、二つのサブシステムの場合、

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, u_1) \\ f_2(x_1, x_2, u_2) \end{pmatrix}$$

ただし x_i はサブシステム i の状態、 u_i はサブシステム i への制御と表わされ、システムの評価関数は、

$$J_1 = g_1(x_1, u_1)$$

$$J_2 = g_2(x_2, u_2)$$

となり、分担したサブプロセス内の評価に限られる。

マトリックス形は、分割された機能にそれぞれコントローラを対応させる。したがって、コントローラ間で干渉が生じ、次のように記述される。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, u_1, u_2) \\ f_2(x_1, x_2, u_1, u_2) \end{pmatrix}$$

$$J_1 = g_1(x_1, x_2, u_1, u_2)$$

$$J_2 = g_2(x_1, x_2, u_1, u_2)$$

表現式の上からは、ベクトル形はマトリックス形の特例であるが、実システムでは異なった分割ルールをとる。自律分散システムの厳密な証明は割愛するが、以上の推論から次の結果を得る。

- (1) サブシステム間、コントローラ間の干渉が少ない。
- (2) 各コントローラのシステムへの影響が同じになるように機能分担している。すなわち、ユニフォーム構造をとる。

システム内の一部のコントローラが機能を発揮しなくなった場合、生存サブシステムは対象プロセス自身が持っている情報を使うことにより、可制御性と可協調性を保つ。すなわ

ち、生存サブシステムは、失われた情報をプロセス自体から取り込んだり、他のコントローラから取り込むことができる。また、脱落コントローラがシステムに復帰する際は、それ自身が対象とするプロセス自体から初期状態を取り込むことができる。

3.3 機能信頼性⁴⁾

自律分散システムの評価は広義の信頼度として表わすことができる。機能信頼度 R_f は次のように定義する。

$$R_f = \int_0^1 f dr = \sum_{i=1}^N f(S_i) \cdot P\{f(S_i)\}$$

$$\text{ただし } f(S_i) = \frac{\text{生存サブシステム } S_i \text{ の機能数}}{\text{全システムのもつ機能数}}$$

$$P\{f(S_i)\} = \text{生存サブシステムの信頼度}$$

$$\sum_{i=1}^N P\{f(S_i)\} = 1 \quad i=1, 2, \dots, N$$

4 軌道輸送システムへの適用

軌道輸送システムは、社会経済と密接な関係をもっており、人命を損なう事故は絶対に許されないと同時に、長期にわたる輸送機能のそう失も許されない。このような観点から、軌道輸送システムを眺めてみたものが図3である。

システム構成の基本方針を挙げると次のようになる。

(1) フォールトトレラント性

システムを構成する機器が故障の場合でも、システム全体がダウンすることなく、極力列車の運行を乱さないように、駅、変電所、信号所、車両基地などの機能を分散した構成をとり、故障の局所化を図る。

(2) 処理性

信号機、案内表示器、案内放送装置変電機器の制御、応答性を高めるために、駅や変電所、信号所ごとにインテリジェ

表1 運行管理システムの構成と比較 従来の中央集中形，分散形よりも，自律分散形のほうが利点が多い。

方 式			A 中央集中形	B 分散形	C 自律分散形	
1	シ ス テ ム 構 成	中 央				
		中 央 処 理 装 置				
		伝 送 装 置				
		伝 送 装 置				
		インテリジェント端末				
	端 末					
構 成 の 説 明		(1) 中央集中形であり，一般に二重系化されている。 (2) 駅にマイクロコンピュータなどはない。 (3) 伝送系はCTCと呼ばれ情報内容は固定化されている。	(1) 基本的には中央集中形である。 (2) 駅にマイクロコンピュータが配されているが，駅間のつながりはない。 (3) 伝送系はCTCが使用されており，伝送能力が低いため，中央～駅間の密な結合はない。	(1) 中央，駅が一体となり機能分担をしている。 (2) 中央，駅が独立しているが結合をしており，また伝送能力は高く，かつどのような情報でも交換できる。		
2	正 常 時	機 能	階層的	階層的	水平的	
		制御の応答性	機能を増すごとに負荷が増大し，応答性は低下する。	限定された機能につき駅で処理するため応答性は良い。	ほぼすべての機能が駅で処理され応答性が良い。	
	中 央 下 降 時 の フォールバック機能	機 能 概 要	主機能停止	駅マイクロコンピュータでできる単純機能だけ存続する。	ダイヤ乱れの回復などの高度な機能以外の機能は存続する。	
		具 体 例	進路制御	完全に手動扱い	単純な制御又は手動設定ダイヤによる自動制御	ダイヤに基づく自動制御
			放 送	接近のみ	行先なしの接近出発放送	行先付きの通常放送
			行先案内	不可	不可	可
ダ イ ヤ 変 更 処 理	——		駅ごとに独立しているため，一つの変更でも全駅で変更処理が必要である。	ループで結合されているため，一駅で変更処理すれば下流駅へ自動的に伝達される。		
3	路線延長に対する容易性		中央と延長駅間のケーブルを新たに布設	Aと同じ	延長駅部だけループを付け加えるだけ。	
4	保守データ収集能力		すべてCTCの伝送能力の制約を受け，情報量、種類及びデータ収集周期が抑えられる。	駅マイクロコンピュータで，きめの細かいデータ収集ができるが，中央との伝送系がCTCのため情報量の面で制約を受ける。	駅マイクロコンピュータで，きめの細かいデータ収集ができ，かつ中央との伝送能力が高いため，高い保守性が期待できる。	

注：略語説明 CTC(Centralized Traffic Control), LCU(Local Control Unit)

ントをもった制御装置を設置する。

(3) 保守性

電力系統，信号系統や乗客案内系統機器の監視，予防保守及び作業後の動作確認が遠隔地から行なえる。

(4) 安全性

人命にかかわるサブシステムは，多重化構成やフェイルセーフ論理を採用する。

(5) 拡張性

路線の延長，車両の相互乗り入れ，輸送力強化や駅防災及び売上げシステムなどの駅業務関連の機能追加が，システムの中断なく行なえるようにする。

5 自律分散形運行管理システム

自律分散形運行管理システムと従来の集中形システム，分散形システムの比較を表1に示す。中央集中形は，すべての機能と情報を1箇所に集め，列車の運行を制御するようにしたものである。しかし，このシステムはシステムが広範囲にわたり，複雑な機能をもつに従って，信頼性，応答性，拡張性及び保守性に問題が生じ，中央の処理を駅側で一部分担する分散方式に移行したが，分散の利点を生かしきれていない。

自律分散形システムは，ADL(Autonomous Decentralized Loop：自律分散ループ伝送)システムに中央処理装置，LCU(Local Control Unit：駅制御装置)が結合されている。LCUに当該駅の列車ダイヤをもたせ，それぞれの駅の列車追跡，進路制御，案内制御などの基本制御機能をLCUに行なわせる。中央制御装置は，ダイヤの管理や管理情報収集などの管

理機能を受け持つ。このように制御面ではLCUが自律的に制御を行ない，管理面を受け持つ管理処理装置も自律的に機能する。図4にシステム構成例を示す。

5.1 自律分散ループ伝送システム(ADLシステム)²⁾

ADLシステムは，自律分散形運行管理システムの中核的な神経系統であり，図5に示すように均質な伝送制御装置と逆方向二重ループ伝送路から構成されている。他の類似システムと比べ次のような特長をもつ。

- (1) マイクロコンピュータを中心としたNCP(伝送制御装置)は，すべて同一のハードウェア，ソフトウェア構成をとっており，従来のようなループ全体の伝送制御を行なう集中部分をもっていないため，異常が局所化でき，システムダウンが起りにくい。NCP間接続は光伝送方式とし，外部雑音や隣接NCPからの異常信号を受けにくくしている。
- (2) 図5に示すように，個々のNCPのもつ自律回復機能により，回線断が発生してもNCPは孤立することがなく，複数の障害が発生してもシステムダウンには至らない。またオンライン稼動時，保守や拡張工事のためNCPや回線を切り離すことができる。
- (3) 受信側アドレスを指定せず，データの内容を示す機能コードをデータに付け，HDLC(High level Data Link Control)方式で送出する。各NCPは，ホストコンピュータから要求されている必要なデータだけを選択受信する方式としているため，路線延長などデータの送出先が増しても，NCPのハードウェア，ソフトウェアを変える必要はなく，新機能追加も同様に可能である。システムの状態変化に伴う必要データ

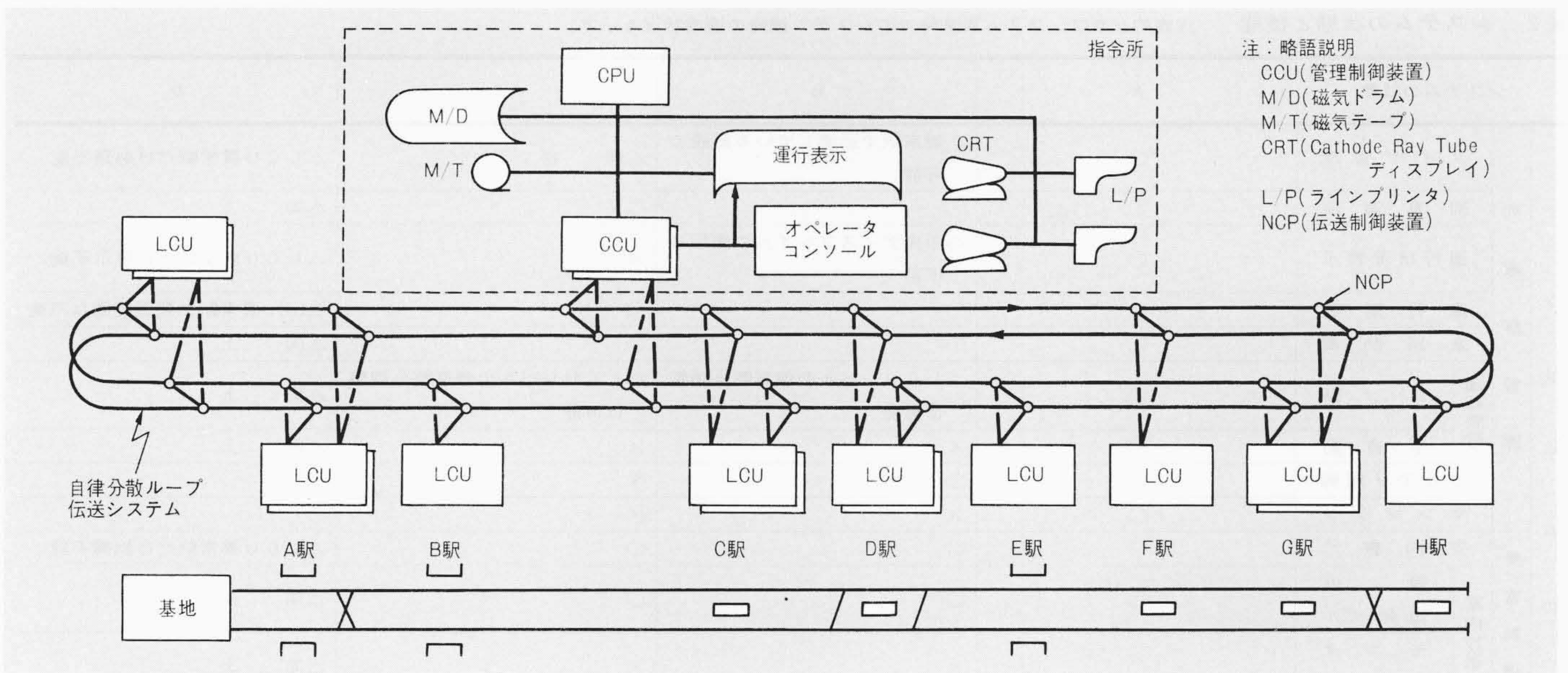


図4 自律分散形運行管理システム例 指令所に設置される管理機能をつかさどる計算機と各駅のLCUが、自律分散ループ伝送システムにより結合される。

の変化に対しても、ホストコンピュータが受信データの選択内容を変えることで対応できる。

- (4) 可変長伝送方式のため、比較的短い制御情報、長いダイヤなどの管理情報を効率的に伝送できる。また、二つのループを使い分けて、応答性を重視する制御情報伝送、高いスループットが必要な情報交換を同時に満足させることができる。
- (5) ループの接続、切断が任意にできるので、どのような場

所でもシステムのテストが可能となる。

また、ループ内に流される任意情報のモニタが任意の場所で行えるので、保守員はどこにいてもシステム全体の診断が可能となる。ハードウェア、ソフトウェアも同一であるため、保守が容易である。

5.2 駅制御装置

駅制御装置はNCPに結合し、中央及び他のLCUと情報を交換しながら、各種の制御機能を行なう。すなわち、管理処理装置からダイヤが与えられ、列車追跡を行ない進路制御、案内制御などの制御信号を機器に与える。また、自駅に関する情報を中央や隣接駅へ伝達する。LCUも同様に、マイクロコンピュータで二重系あるいは一重系システムが容易に組めるようになっている。LCUは伝送制御はすべてNCPに任せており、自身で発生した情報をNCPに渡し、自身が必要とする情報をNCPに伝え、それに従った情報をNCPから受け取る。図6に二重系の構成例を示す。

5.3 運行管理システムの状態

以上述べた構成の運行管理システムについて、各サブシステムの代表的な不稼動状態とそれに対応する機能をまとめたものが、表2である。

- (1) 一部の駅装置不稼動状態(表2 A欄に示す状態)

この状態は、すべてのサブシステムが正常であるか、一部の駅装置が不稼動の場合である。中央指令員は、運行表示盤とCRT(Cathode Ray Tube)ディスプレイにより全線の運転状況を把握し、ダイヤ変更などを行なう。不稼動駅装置は、あらかじめ与えられていたダイヤと進入する列車の状況により、自律的に動作するか駅員の補助を受ける。

- (2) 管理計算機不稼動状態(表2 B欄に示す状態)

A欄に示す状態から指令室の管理計算機がシステムから脱落した状態である。しかし、駅のLCUは相互に情報を交換し、ダイヤに従って制御を行なうことができる。指令員は指令室LCUから手動介入が可能である。

- (3) 指令室NCPの故障状態(表2 C欄に示す状態)

A欄に示す状態で指令室のNCPがシステムから脱落した場合である。指令室には情報の自動入力がないので、管理計

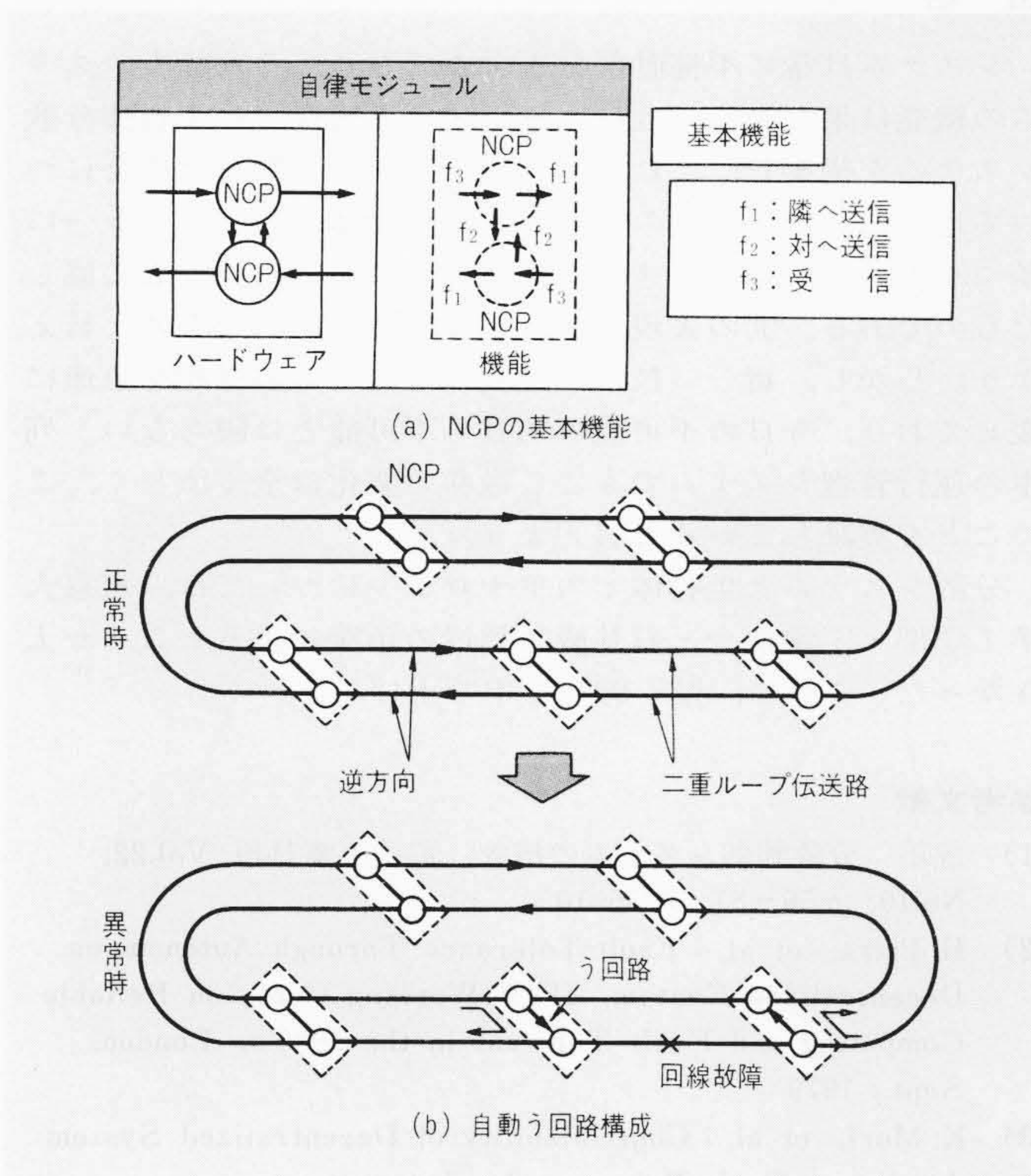


図5 自律分散ループ伝送システム 対をなす二つのNCPが自律モジュールを構成して伝送の制御を行なう。NCPはマイクロコンピュータにより成り、すべて同一仕様である。

表2 システムの状態と機能 代表的なサブシステム異常時でのシステム機能の達成状況を示す。

システムの状態			A	B	C	D	
システム の 機 能	列車 群 管 理	ダイヤ管理	○	△端末駅で記憶している範囲で可能	△同 左	△LCU異常駅だけ処理不能	
		列車追跡	○	○	○	△同 上	
		運行状況表示	○	△中央ディスプレイへの表示は不可	×	△LCU異常駅だけ表示不能	
		運行監視	○	○	○	△LCU異常駅の関連範囲は不能	
		進路制御	○	○	○	△同 上	
		運転 整理	自動	○	△LCUレベルの停車時分調整は可能	△LCUレベルの停車時分調整は可能	△同 上
			半自動	○	×	×	△同 上
		CCTV制御	○	○	×	○	
	マンマシン	○	×	×	○		
	乗客 誘導	案内表示	○	○	○	△LCU異常駅だけ制御不能	
		案内放送	接近 出発ベル	○	○	○	△同 上
			モニタ 放送抑止	○	×	×	△同 上
	集計記録	○	×	×	○		
	対駅運行 情報伝達	自駅データ表示	○	○	○	△LCU異常駅だけ表示不能	
		中央データ表示	○	×	×	△同 上	
	対列車運転情報伝達	○	○	○	△LCU異常駅の範囲で表示不能		
	防災・駅設備管理	○	△駅で制御できる範囲は可能	△同 左	△LCU異常駅だけ不能		
	オフライン処理	○	×	○	○		
	列車運行シミュレータ	○	×	×	×		

略語・記号説明：○（正常あるいは機能に支障がない。）、△（機能的、地域的に一部停止）、×（機能停止）、CCTV（Closed Circuit Television）

算機はその機能を発揮できないが、列車の運行は続行される。指令員は、列車無線や電話で運行状況を把握し、その情報を管理計算機に入力する。

(4) 駅LCUの脱落状態(表2 D欄に示す状態)

いずれかの駅のNCP又はLCUが不稼動状態の場合で、この駅の制御は駅員の制御に任される。しかし、他の駅はこ

の影響を最小限にするように対応する。ただし、LCUが健全である間は入場列車番号とダイヤにより、正常な運行制御を行なうことが可能である。

6 結 言

システムは常に不稼動部分を含んでおり、それでもシステムの機能は果たせるようにするシステム構造として自律分散システムを提案し、これを列車運行管理に応用した場合について述べた。自律分散の考え方は、生物体とのアナロジーに基づくもので、本稿に述べた例は多分に現実の技術と妥協したものである。別の表現では、現実的で経済的なものと言えよう。しかし、新しい技術の進展はシステムの様相を急激に変えており、今日の不可能は明日も不可能とは限らない。列車の運行管理システムでもここ数年の変化は全く激しく、このことを実証していると言えよう。

分散システムと生物体とのアナロジーについては、東京大学工学部・工学博士・石井威望教授の示唆によるところが大きかった。ここに、厚く御礼を申し上げる。

参考文献

1) 成田：分散制御システムの構成，電子工業月報，Vol.22，No.10，p.56～81（昭55-10）
2) H. Ihara, et al.：Fault-Tolerance Through Autonomous Decentralized System, IFIP Working Conf. on Reliable Computing and Fault Tolerant in the 1980's, London, Sept., 1979
3) K. Mori, et al.：Controllability of Decentralized System Aiming at Fault-Tolerance by Autonomy, IFAC 8th World Congress, Kyoto, Sept., 1981
4) 井原：地下鉄における計画と制御技術，電学誌，Vol.99，No.11，p.62～66（昭54-11）

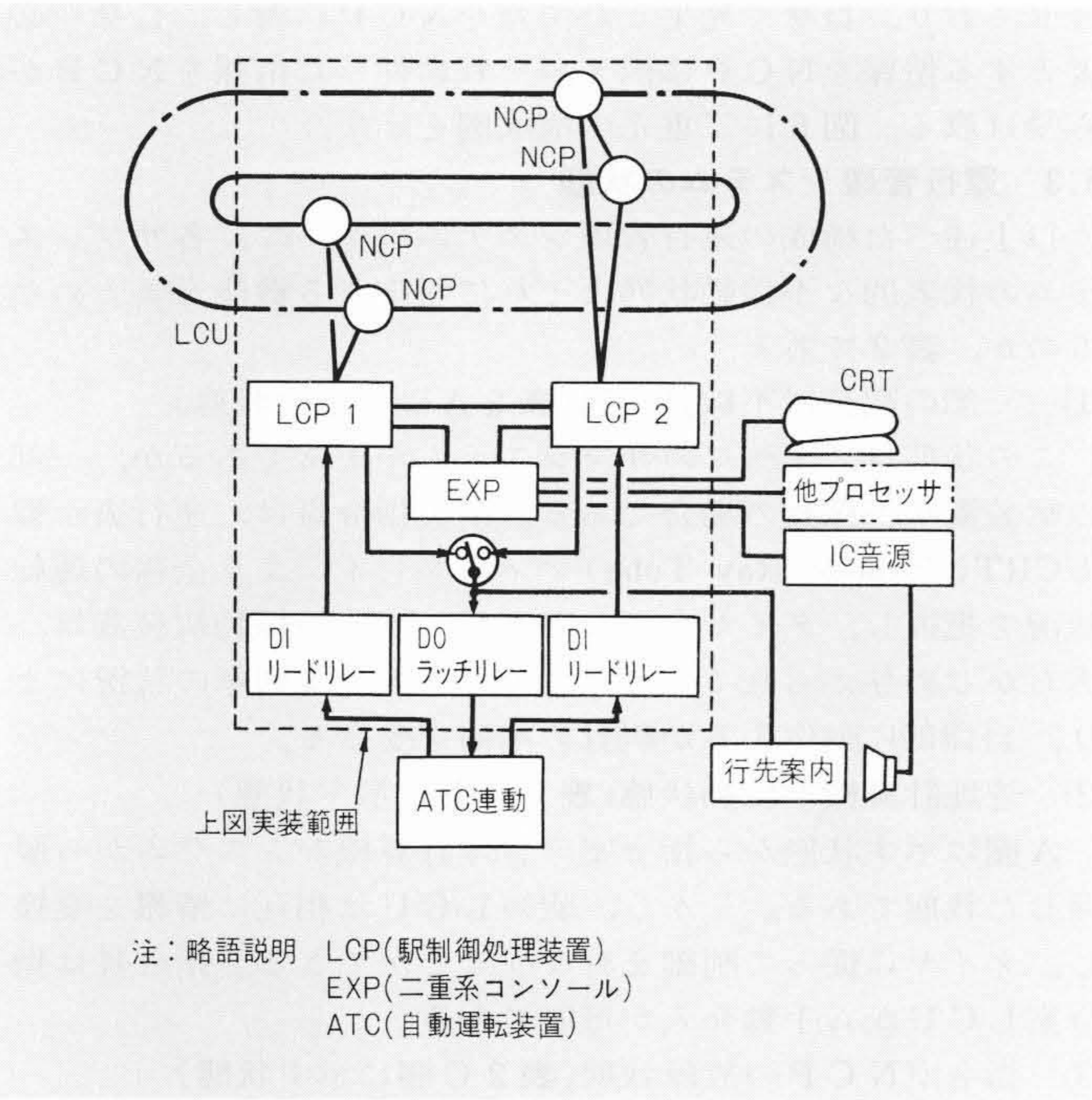


図6 駅制御処理装置 進路制御に図する部分は二重系を組み、高信頼化を図ることが可能な方式である。