

地下鉄における列車制御システム

Train and Traffic Control System of Subway

従来、列車の自動制御は個々の列車の制御を中心に論じられてきたが、制御技術の面では、ほぼ達成された観がある。一方、地上で列車群の制御を行なう運行管理システムも次々と実用化されており、これら地上システムと車上システムとを情報伝送系を経て結合させ、地上又は車上の各システム単独では到達できない効率的な新しい列車制御システムの実用化が世界的に進められつつある。

本稿は、地上の運行管理システムを超短波無線により車両に情報伝送を行ない、列車の自動運転を採用した札幌市交通局東西線のシステムを例にとり、最近の自動列車制御システムの動向と内容について述べる。

石田周二*	Ishida Shuji
高岡 征*	Takaoka Tadashi
大島弘安**	Ôshima Hiroyasu
刈谷志津郎***	Kariya Shizuo
能見 誠****	Noumi Makoto
海老名忠夫*****	Ebina Tadao

1 緒 言

大都市内の交通量の増大とレベルアップに対する手段として、地下鉄の採用は有力な方法であり、既に地下鉄を持つ都市では、その拡張が積極的に行なわれ、また多くの都市では新しく地下鉄を建設することが決定されている。

この傾向は海外でも同様であり、ここ数年の間に、フィラデルフィア、サンフランシスコ、ワシントン、トロントなどが新機軸を盛り込んで開業しており、香港、カラカスなどでも建設が始められようとしている。

これらの新しい地下鉄に見られることは、車両に新しい技術を取り入れるほか、列車の運転、運行管理、電力管理、自動出改札、自動放送など新しいシステムを導入して、それらの機能を統合し、輸送システムとしての機能の向上と乗客へのサービスの拡大を図っていることであり、いわゆるトータルシステム化への傾向は急速に進展する状況にある。

本稿のテーマである「列車制御の自動化」は、鉄道トータルシステムの大きな部分を占めている列車の自動運転と運行管理を中心とするものである。従来のハードウェア的分類からは、車両に搭載した機器〔ATC (Automatic Train Control ; 地上の信号系より指示された速度より過速になるとブレーキをかけ、指定以下の速度にもどす装置)、自動運転装置〕と地上に設備された機器(ATC地上装置、信号機器、運行管理システム)がこれに属する。

従来、自動運転装置は、文字どおり個々の列車運転の自動化を第一の目的として開発され、技術的には十分実用可能なレベルにまで到達していたが、単に本装置を車両に搭載するだけでは、必ずしも十分な効果を得られるとは考えられぬため、その実用化は見送られていた。一方、最近に至って計算機制御の列車群制御システムとして、運行管理システムの導入が図られるに至った。この群管理機能を向上させていく過程で、自動運転装置に運行管理システムとの情報授受の機能を付加すれば、全体システムの合理的自動化が完成されるとして、従来の自動運転装置と運行管理システムを一体化した列車制御システムの採用が考えられるに至った。

そのほか、車両故障診断、故障状況の記憶など、各種の新機能が付加されて、自動運転装置は真の実用化の段階に到達した。以下、自動運転装置を中心として、列車制御システム

に必要な機能、システム設計上考慮すべき点、実施例などについて述べる。

2 列車制御システムに必要な機能と最近の動向

列車制御システムの機能は、列車の衝突がないように防護しながら、所定の速度で運転することであるが、その機能は、次のような項目で評価される。

- (1) 安全が保たれること。
- (2) 列車の運転時間間隔を小さくできること。
- (3) ダイヤの乱れを早く解消できること。
- (4) 各列車の運転時間間隔・混雑度にアンバランスのないこと。
- (5) 列車の加減速のひん度を少なくし、乗心地を良くすること。

列車制御システム導入による自動化は、これらを向上するために有効な手段である。

前章に述べたように、列車制御システムは種々のサブシステムの集まりであり、その中には新しい技術もあり、また歴史を持つ技術もある。これらを含むシステムを構成する場合には、各サブシステムがその機能、信頼度、フェイルセーフ性などについてバランスがとれているか、よく検討されねばならない。

輸送手段について、最も重要なのは保安であることは言うまでもない。従来から鉄道に対し広く用いられている固定閉そく方式の信号装置は、不連続制御であること、位置だけの情報による制御であることなどの理由で、連続的制御で位置と速度の情報により制御される移動閉そく方式に比べると制御性に限度がある。しかし、現在のところ他の方式でこれに優る保安性を得ることは難しく、また実用上、十分な制御性を持っているので、列車衝突防止については、このような実績のある方式を基本として考えるべきである。何れにせよ、すべてのサブシステムが電子技術により急速な進歩をとげ、また機能の有効な分担を行なうことにより高度なシステムへ発展することが期待される。

列車制御システムの各機能に対し、各々のサブシステムは、どのような点に注意して設計されなければならないかを表1に示す。太わくで囲んだものは特に重要な項目である。全体のシステムのレベルを上げるためには、これらの事項に注意

* 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技術本部 **** 日立製作所システム開発研究所
***** 日立電子株式会社

表1 各サブシステム設計上の注意事項 合理的な列車制御システムを構成するために、各サブシステムには表記のような検討が必要となる。

サブシステム 機能	車 両	A T C	A T O	信 号 装 置	情 報 伝 送 装 置	運 行 管 理 シ ス テ ム
列 車 保 安	電空ブレーキ能力 機械ブレーキ能力	フェイルセーフ性， 信頼度	信頼度	フェイルセーフ性， 信頼度	———	ソフトウェア信頼度
乗 心 地 制 御	機械ブレーキと電気 ブレーキのラップ	ATCブレーキ時の減速 度の検討	制御方式	———	———	ATCにひっかからぬよ うな群制御
定 位 置 停 止 制 御	ブレーキとATOのイン タフェース，ブレーキの 応答	———	最適のパターン追跡 制御	ATC指令と定位置停止 パターンの関係，信頼度	位置情報の車両への 伝達	———
定 速 運 転 制 御	ATOとのインタフェース	速度割付け	指示速度急変に対する 考慮	———	ブロック情報の車両 への伝達	走行モード(F,N,S)の 指令
車 両 機 器 モ ニ タ	適切な異常検出	———	モニタ機能	———	地上への情報伝送内 容と地点	情報の処理
列 車 進 路 制 御	———	———	———	優先論理	信頼性	優先論理，制御性，ソフ トウェア信頼性
列 車 群 制 御	———	———	走行モードに追従した 制御機能	———	車両への適切な伝達	列車群制御機能
乗 客 サ ー ビ ス	客設備の向上	———	車内での案内	———	案内放送表示設備	放送表示の適切さ
運 転 時 間 間 隔 の 短 縮	高加速高減速	———	信号への速応性と高精 度な追従	適切なブロック分割	送受信の場所と方法	端末駅などの制御

表2 サブシステムの関連 列車制御システムを構成する各サブシステム間の協調と、機能の分担は特に重要である。

サブシステム 機能	車 両	A T C	A T O	信号装置	情報伝送	運行管理
A T C	ブレーキ時の乗心地	———	———	———	———	———
A T O	チョップ ブレーキと のインタフェース， 運転台機器	ATC信号下位変化時 の制御	———	———	———	———
信号装置	誘導障害	フェイルセーフ性， 冗長性の検討	ブロック分割と定位置 停止の関係	———	———	———
情報伝送	アンテナの配置	フェイルセーフ方式 の伝送系	適切な信頼度を持つ 伝送系と方法	フェイルセーフ方式 信頼性	———	———
運行管理	———	———	機能の分担	情報インタフェース の方法と冗長系	適切なデータフォー マットと伝送速度	———
列車無線	———	———	———	———	情報分担の検討	司令員の判断内容の 決定

し、他のサブシステムとの関連に留意して計画されることが必要である。その関連事項を表2に示す。

日立製作所は、信号装置を除く他のサブシステムについて、従来より精力的に開発を進め、多くの実績を持つに至っている。これらのうち、列車制御システムを中心とする自動運転装置については、昭和35年に名古屋市交通局に納入した装置により試験に成功したのをはじめ、各種の試験を経て、昭和45年には大阪万国博覧会のモノレールで実用化するに至った。

その後、車両用主制御器としてサイリスタ チョップが導入され、きめ細かく応答の速い制御が可能になったこと、またデジタル技術の発展により安定した速度制御技術が得られるようになったこともあり、技術レベルは更に向上しつつある。特に最近では、その信頼性、自動運転の定位置停止精度と乗心地について、後述するように十分の研究が重ねられており、列車の運転制御の自動化については、問題は解決されたと考えている。

次章にこれらの成果を採り入れた新しい列車制御システムの例として、札幌市交通局東西線用のシステムについて述べる。

3 札幌市交通局東西線用列車制御システム

3.1 概要

札幌地下鉄は既に昭和46年より南北線が営業中である。本地下鉄は各種の新しいシステムを導入した画期的なものであったが、このたび開業した東西線は、更に新しい技術的成果

を採り入れ、特に列車制御システムは、自動運転を採用し、それと地上の運行管理システムとを超短波無線(Very High Frequency, 以下VHFと略す)により結合した方式とした。

このシステムの機器の関連図を図1に、ブロック図を図2に示す。

VHF無線の伝送媒体である漏洩同軸ケーブルは、駅付近に線路に沿って設備されている。これにより表3に示すような情報の伝達を行ない、列車制御機能上の効果を得ている。

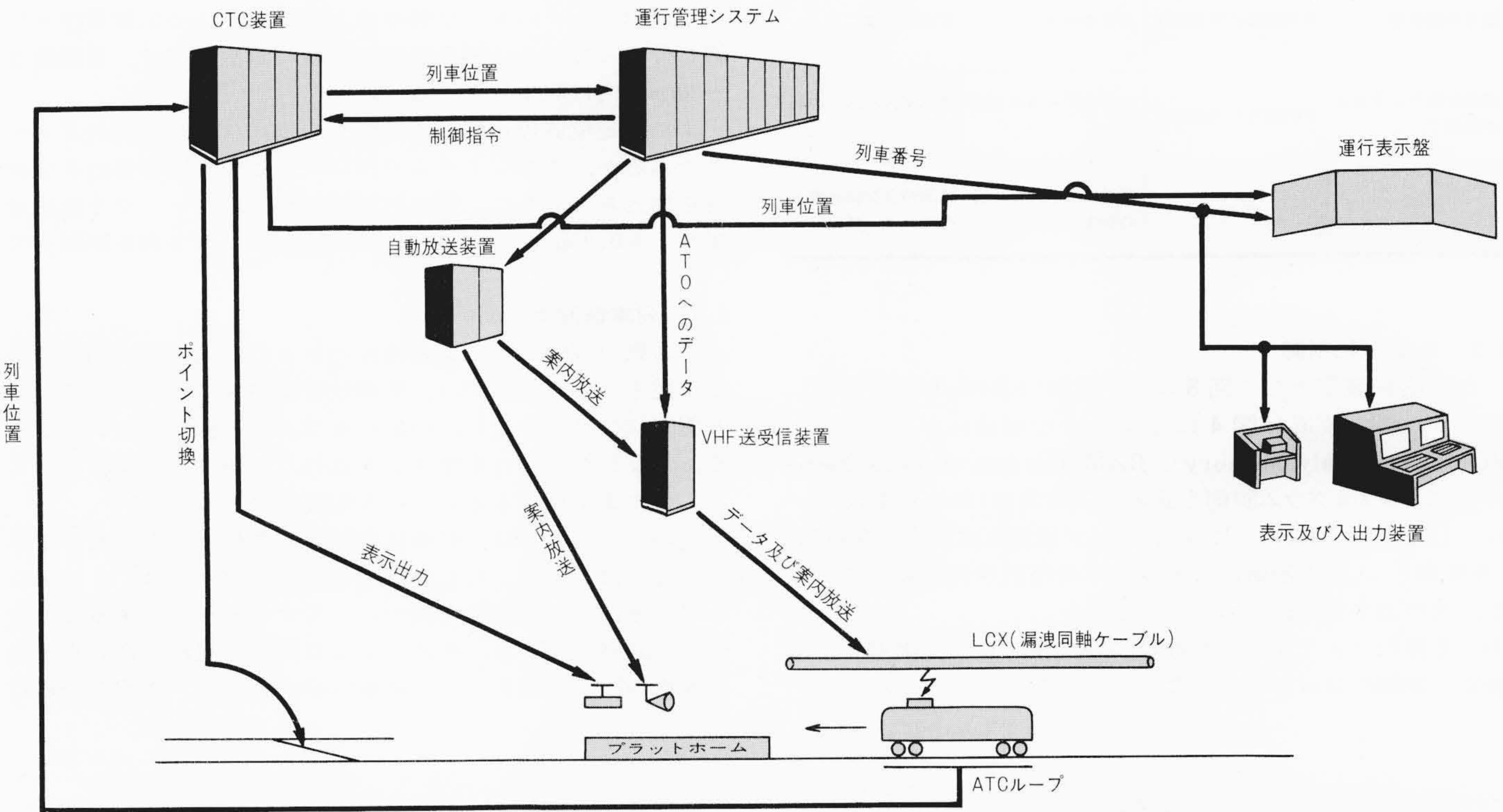
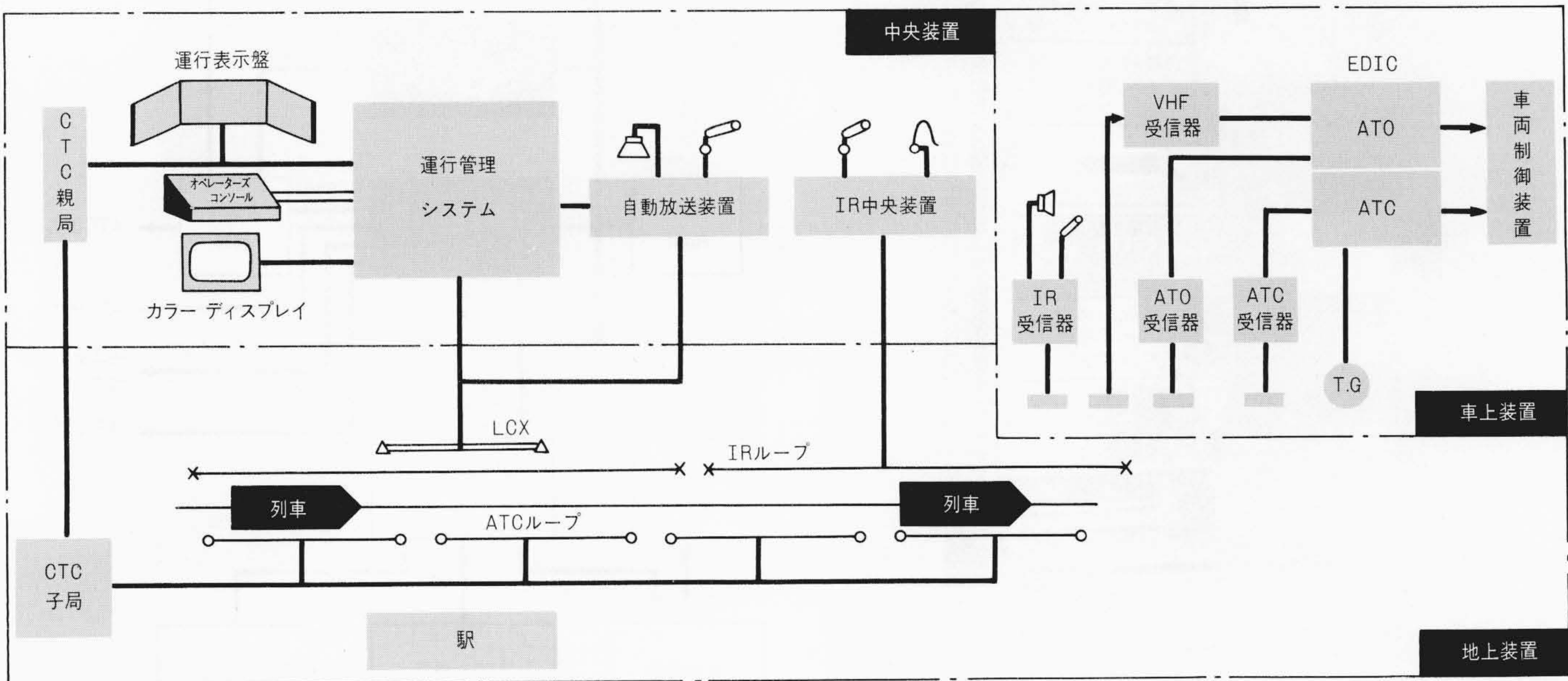


図1 列車制御システム構成図 地上の中央装置と車上装置は伝送系を経由し有機的に結合されている。



注：IR=誘導無線 T.G=速度発電機 EDIC=自動運転装置

図2 システムブロック図 簡易で高信頼度なシステムを構成するには、各サブシステムの機能分担に十分な配慮を要する。

表3 列車～中央間の通信内容 中央の指令センターと各列車は情報伝送系を経由し、クローズド ループ化されている。

列車 → 地上		地上 → 列車	
通信内容	目的	通信内容	目的
運行番号	1. 確実な列車追跡 2. システムの立上り時の制御が容易	運行番号	1. 確実な列車追跡 2. システムの立上り時の制御が容易
編成番号	車両保守	残停車時分	運転士への情報供給
運行不能情報	車両故障の早期対策	走行モード	列車群制御
機器故障モニタリング情報	車両修理の迅速化	音声とデータの判別指令	車内案内放送への利用
—	—	返送モード及び内容の指定	入庫時自動試験機へのモニター情報提供

3.2 自動運転制御

自動運転装置として図3に示す装置(EDIC-102)を搭載している。この装置は図4に示すような構成になっており、ROM(Read Only Memory)、RAM(Random Access Memory)によるプログラム制御方式の論理演算部(Basic Processor Unit、以下BPUと略す)、リング演算方式によるATC部(多重系)、入出力制御部より成る車両用汎用制御装置であって、次のような特長をもっている。

(1) 各部のフェイルセーフ性について検討し、車両用として保安上問題のないようにした。

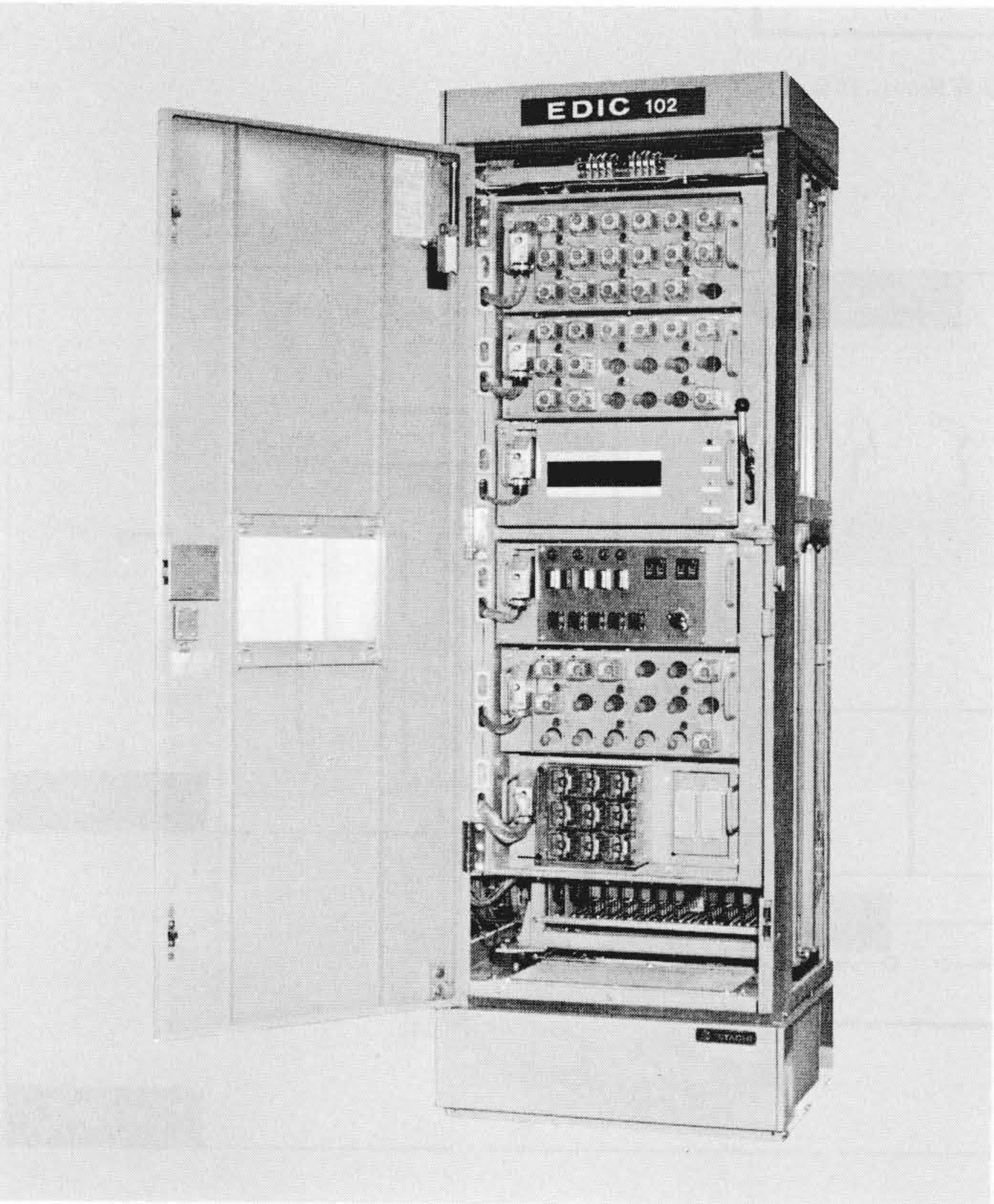


図3 札幌市交通局ATO装置(EDIC-102) ATC機能ほかもこの中に含まれている(全デジタル式)。

- (2) BPUはフェイルセーフ性をできるだけ上げるとともに、故障検知回路を強化し、通常のプロセッサよりも格段に保安性を向上させた。
- (3) ATC部とBPUの組み合わせにより、機能と装置の重複をなくした。
- (4) 伝送装置と接続し、地上との交信を可能にした。
- (5) 車両機器の故障情報モニタ機能を備えた。

この装置の機能とその説明を表4に示す。

図5に定速運転によって、駅間を走行したときの走行曲線の例を示す。駅間はATCの制限速度指示に追随して走行し、駅では車上パターンと2個の地上子補正による定位置停止制御を行なっている。図6は停止精度の試験結果で、目標精度±50cm以内に収まっている。

また、定位置停止制御で重要なのは、ブレーキ時のジャークであるが、このシステムではブレーキの制御特性に十分検討を加えると同時に、停止の瞬間におけるジャークを加減速度時とも0.25g/s以下に抑えるようにブレーキ力を制御している。

3.3 列車群制御

この列車制御システムの特長のひとつは列車群の制御である。従来の手動運転では、列車は等時隔ダイヤを持っていたとしても実際には乱れを生じ、いわゆるだんご運転になることがある。すなわち、乱れを生ずると遅れた列車に更に乗客が増えて、ますます乱れるという不安定要素があった。

このシステムでは、列車は自動運転されるから、大きな早着や遅延はないが、もしある列車が遅れたときは、その乱れを早く解消し、混雑度を均一にしてダイヤを回復するよう中央より制御している。その方法は自列車の遅れと自列車と後続列車の遅れの差により、停車時分の調整と、次駅間の走行

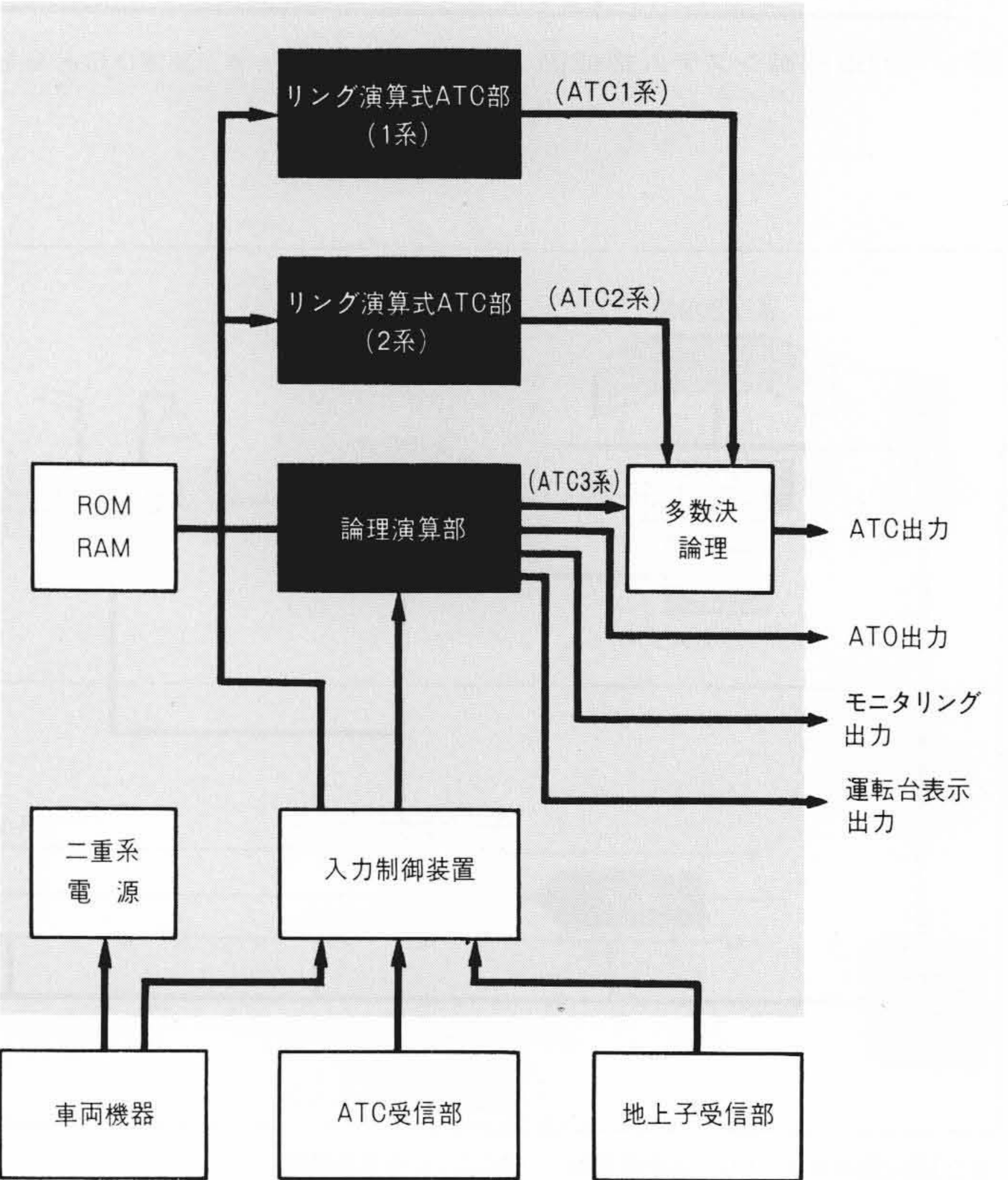


図4 自動運転装置の構成 自動運転装置は、ATC用リング演算装置2系と、ATO及びATC用論理演算部1系を持っている。

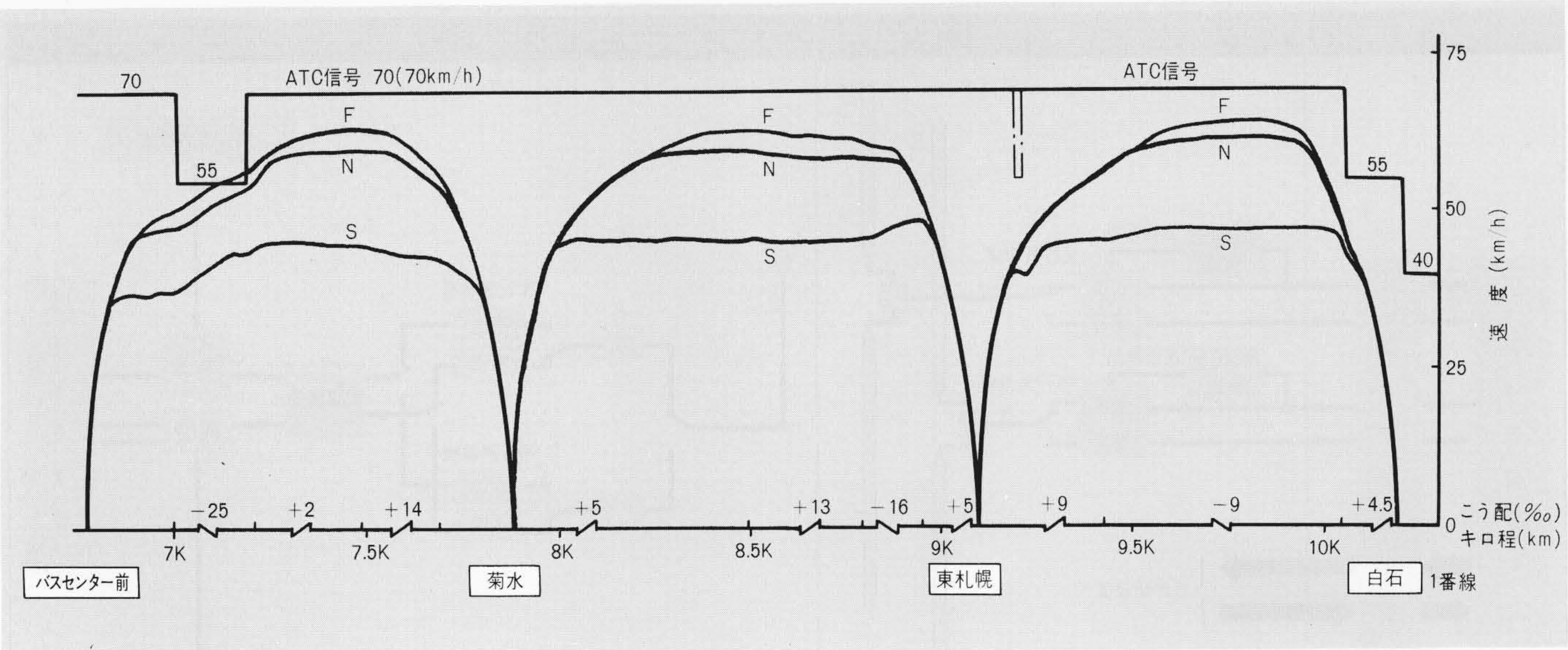


図 5 走行曲線の一部 駅間走行はF、N、Sの3レベルの指定を運行管理システムより受け、制御される。

表 4 自動運転装置の機能 自動運転装置の機能は、大別して保安のためのATC機能と、運転の自動化・高効率化のためのATO機能とで構成される。

機 能	内 容
定 速 運 転	発車押しボタンを押すことにより、ATC信号と走行モードから目標速度を自動的に設定し、駅間を走行制御する。
A T C	ATC制限速度指令以上に過速したときは、常用最大ブレーキで制限速度以下に減速させる。持っている制限速度段は、0P、0A、25、40、55、70の6段階である。
定位置停止	停止駅に近づくと地上より地点情報を受け、これにより追従パターンを発生させる。比例制御と微分制御の併用により、高減速度で乗心地のよい定位置停止が可能である。
伝 送	高信頼度を要求されるATO用データ伝送と車内案内放送は、VHF帯を使用した情報伝送系より与えられ、自動運転装置は伝送系とのデータ授受を行なう。
機器モニタ	車両の主要機器(チョップ装置、ブレーキ装置、インバータほか)や架線電圧などの状況を監視し、故障発生時には、それらの記憶とそのときの列車状況(車速、ATC信号、力行、ブレーキノッチなど)を記憶し、入庫後自動試験機に伝送する。また運行不能時には、ただちに運行管理システムへその旨連絡を行なう。
速 度 修 飾	列車群管理のため3段階(F：高速、N：標準、S：低速)の目標速度設定のための速度修飾機能を持っている。

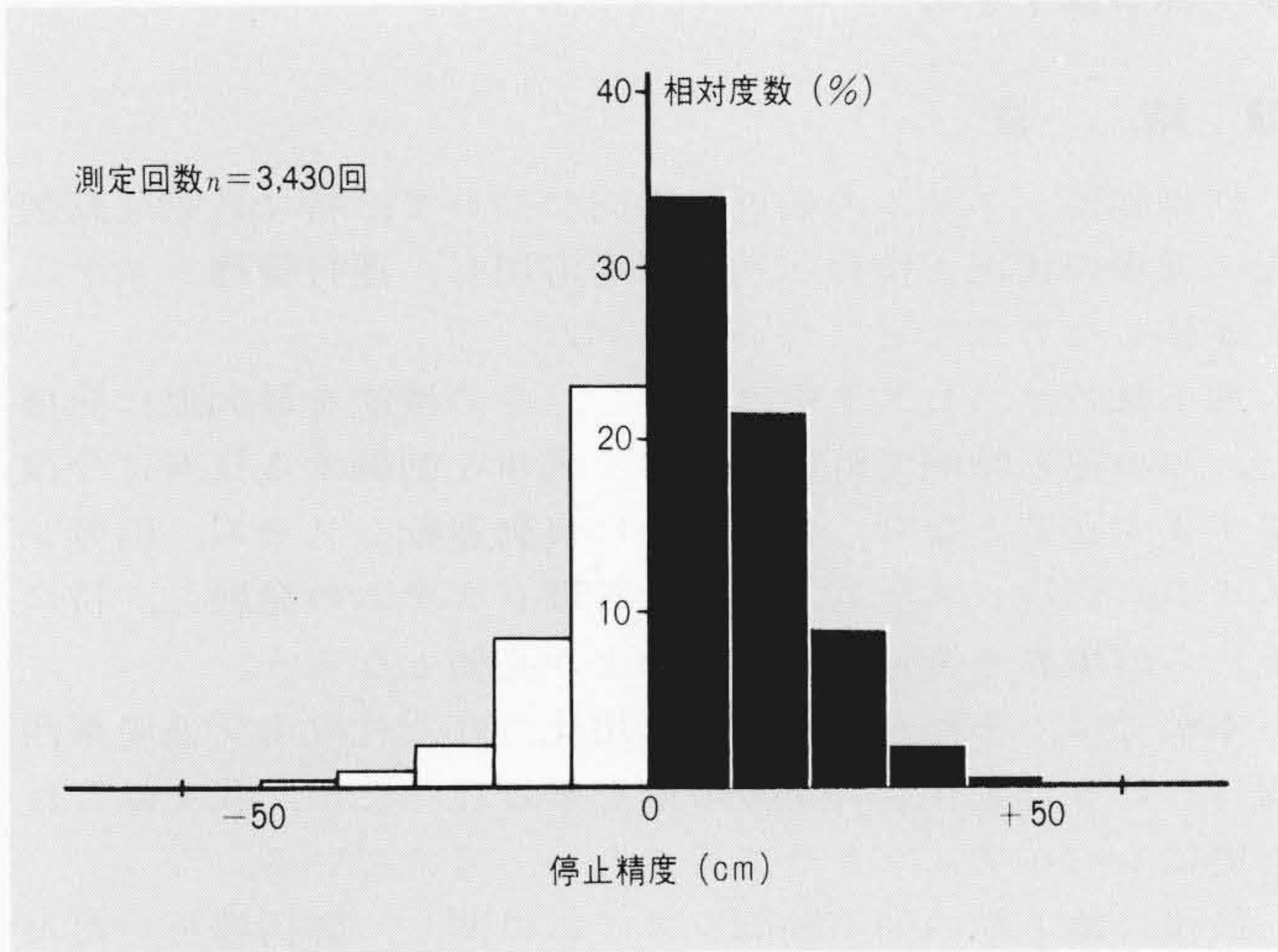


図 6 停車精度の一例(全駅の集計) 駅による停車中心点のずれを含めて±50cm以内の精度である。

速度レベル(F、N、S、すなわちFは高速、Nは標準、Sは低速)の撰択を行なって制御するものである。制御定数は中央コンピュータにより決定され、発車ブザーの制御と列車へのF、N、S信号の伝送とにより、自動運転装置の速度を自動修正することで行なわれるようになっている。中央コンピュータ システムの詳細については、「列車運行管理システム」と題しこの特集の別論文で述べている。

3.4 車両機器モニタと故障情報

車両の故障はダイヤを乱す大きな原因であり、これを早期に中央へ知らせ、必要に応じ入庫し、早く正規の状態に復帰させることが必要である。

このシステムでは、車両の機器故障のうち運転不能につながる情報は自動運転装置に集められている。この情報は地上へ伝送するデータの中に含まれ、最寄りの地点で地上へ伝送され、指令員に警報を与える。また、故障の内容は入庫時、ただちに地上へ伝送され、不良箇所を迅速に発見することができるようになっている。

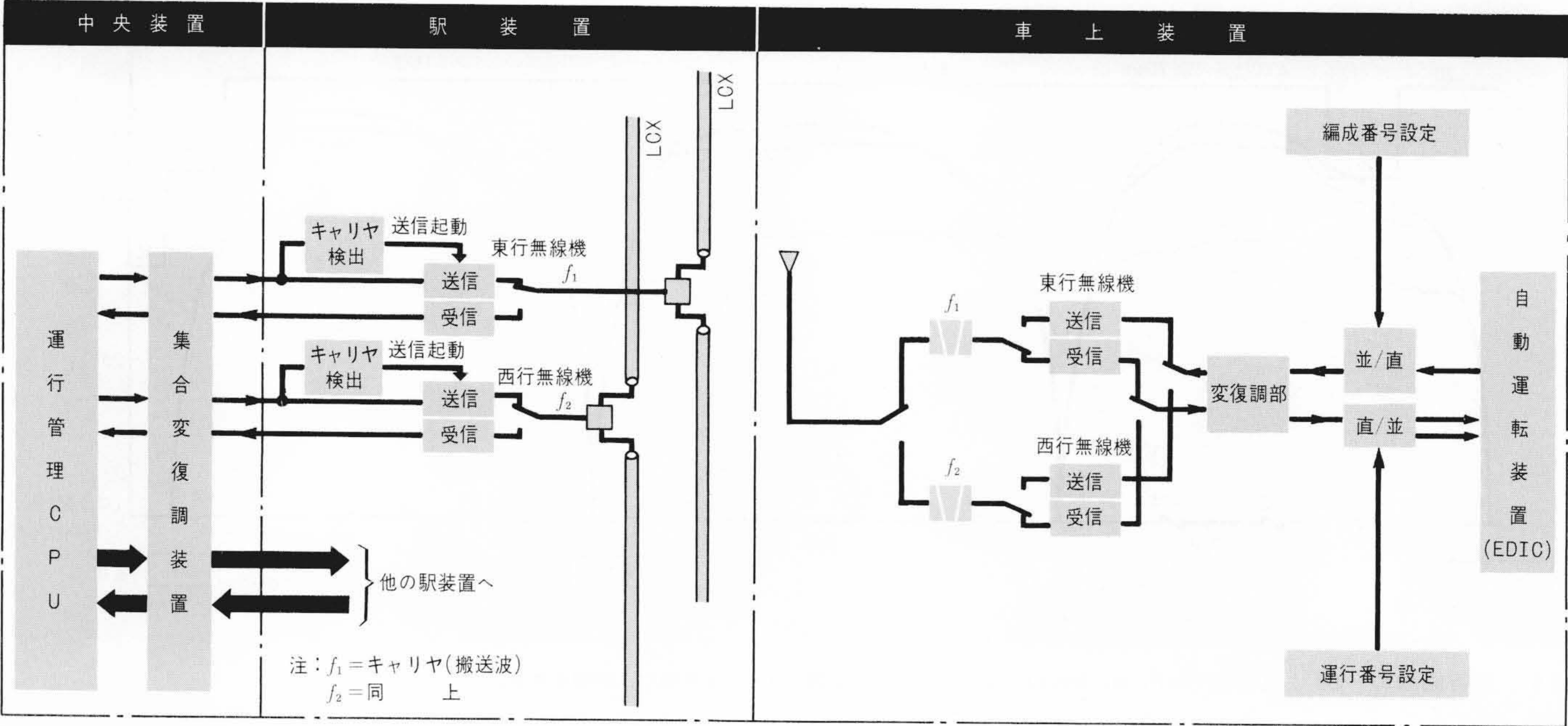


図7 対列車情報伝送システム構成図 地上装置と車上装置は、駅周辺に設備されたLCXを経由してデータ伝送を行なう。

3.5 運転士席ディスプレイ

地上からの指令により制御される部分が多くなると、運転士へはその情報を何らかの形で伝達することが必要である。もし情報がないと運転士の心理上、あるいは運転操作上も好ましくない。このシステムでは伝送系を利用し、車上に情報を送り、残停車時分、出発の抑止及び走行速度レベルに関する情報を表示している。

3.6 対列車情報伝送装置

この伝送装置で伝送する情報の内容は、すでに述べたとおりであるが、それらに将来の増加分も含め、情報量としては地上→車上、車上→地上とも32bitとした。また伝送速度は伝送に要する時間、雑音による妨害などを考慮し200bit/sとした。

これらの情報を無線伝送する場合、一般に無線周波数としては誘導無線帯(10～250kHz)又はVHF若しくはUltra High

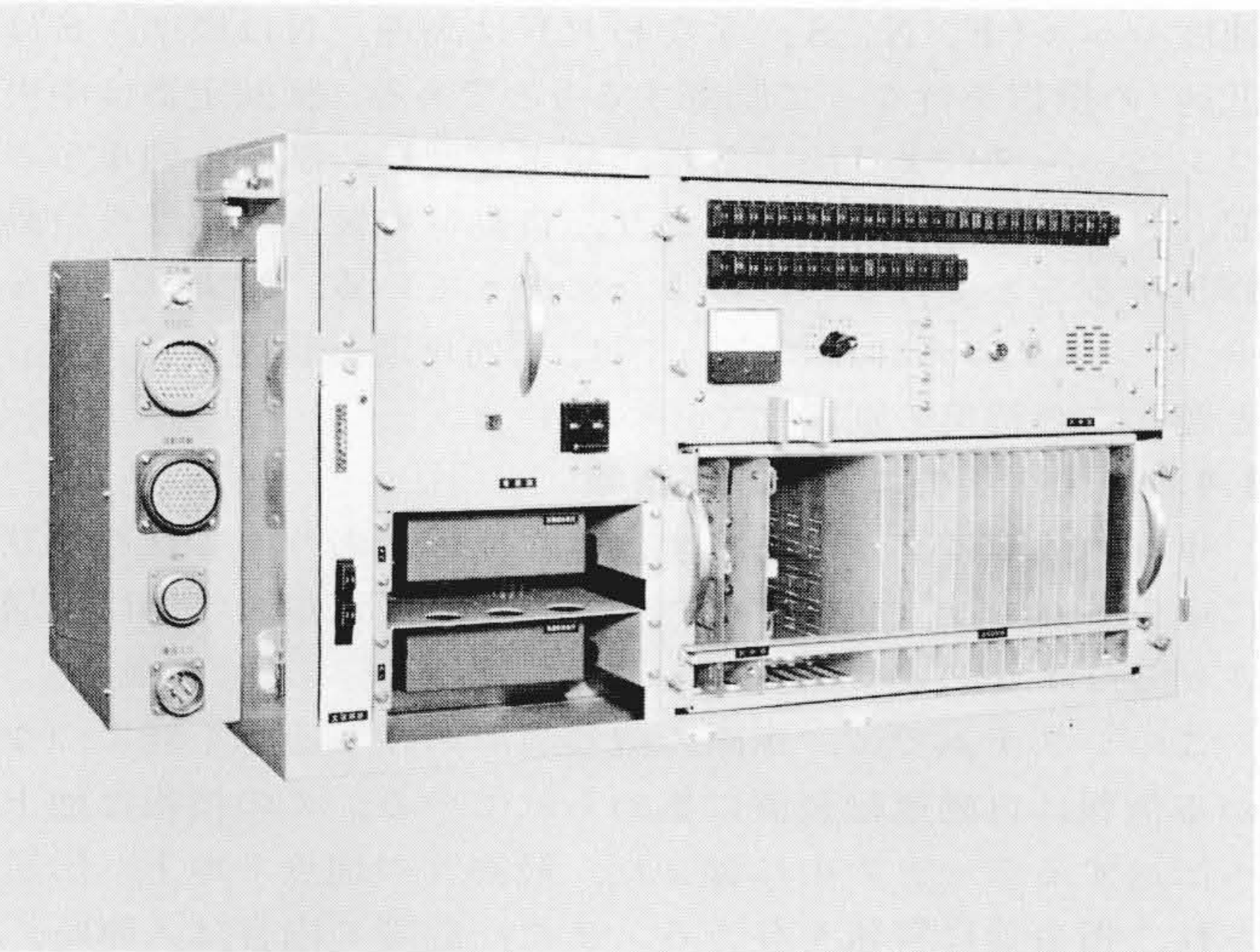


図8 データ伝送車上装置 地上より車上に伝送された情報を受け、自動運転装置に内容を渡す。

Frequency(以下UHFと略す)を使用することが考えられる。今回はチョップパ制御を使用した車両を採用しているので雑音による妨害について考慮する必要があり、またトンネル内の電波の減衰がUHFよりVHFが多く、隣接駅の妨害を受けにくいことを考え、VHFを使用することにした。

本システムの構成図を図7に、車上伝送装置の外観を図8に示す。

中央と各駅の間の情報伝送は、多心ケーブルによる実回線で結ばれており、漏洩同軸ケーブルは東行、西行を独立に布設することとした。布設長は将来の情報量の増加を考慮し、一駅、一方向当たり約600mとした。無線機は駅、車上とも常時待受け状態で、中央の運行管理コンピュータからの起動により駅無線機の送信を立ち上げ、車上にデータを送出する。車上では受信データの運行番号を運行番号設定盤の番号と照合し、一致すれば受信データを自動運転装置に送出する。一方、車上でデータを正常に受信すると、地上に対して返送データを送出し、中央の運行管理コンピュータで受信し、データ伝送を終了する。

4 結 言

列車制御システムの最近の動向について、特に自動運転装置の進歩の状況と情報伝送装置を応用し、運行管理システムと連結した方式などについて述べた。

地下鉄のサービスを更に向上し、その機能を最大限に発揮し、短い運転時隔で乱れを少なく列車を制御する技術は今後ますます必要となり、このために自動運転システム、信号システム、伝送システム及び運行管理システムの発展と、特にそれらの境界を含んだ総合技術とが必要となろう。

本稿では、それらの傾向と実用化された札幌市交通局東西線における自動化システムの例を挙げ述べたが、我々はこれを更にレベルアップさせて行きたいと考えている。

最後に地下鉄の列車制御システムに関し、御指導をいただいた札幌市交通局及び各都市地下鉄の関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。