第25回紙パルプ計装技術発表会・特別講演I

列車の自動運転制御

—エキスパートシステムの自動列車運転装置への適用—

三菱電機株式会社 系統変電・交通システム事業所 満 川 昌 彦

The Automatic Train Operation Equipment with Expert System

Masahiko Mitsukawa

TDTSC, Mitsubishi Electric Corporation

Recently, the subway which required one-man operation has come to be constructed. In the Automatic Train Operation system, it is important to operate the train accurately. But the improvement of riding comfort and the energy saving are attached to importance compared with before.

To achieve more highly developed operation, and to satisfy such a demand, we apply the expert system to the Automatic Train Operation system. In this discourse, Automatic train Operation Equipment with Expert system is described.

分類：V₁計装・制御システム一般，Y₁基礎科学一般

1. はじめに

近年、首都圏地下鉄路線をはじめ、新規に建設される鉄道路線では、ワンマン運転を前提とした路線が増えつつある。ワンマン運転の路線では、安全の確保、乗務員への負担をできるだけ少なくする工夫が必要となる。その中で、列車の運転の負担を軽減するために自動運転装置が導入されるケースが多い。

もともと、自動運転装置は、正確な列車の運転のみに重点がおかれてきたが、最近はその上に、“良い乗り心地”や省エネルギー等を加味した、より高度な運転方式の実現が重要視されてきた。こうした要求を満足し、しかも高い信頼性を持ったシステムとして、“エキスパートシステム”が自動運転装置に組み込まれ実用化されている。

以下、本文ではそのエキスパートシステムを適用した、列車の自動運転制御に関わる内容を紹介する。

2. 自動運転装置の導入の流れ

我が国で本格的に自動運転システムが採用されたのは、1981年に神戸の人工島であるポートアイランドへのアクセスラインとして建設された無人の新交通システム（ポートライナー）であった。その後、大阪の新交通システム（ニュートラム）など、主に無人システムの車両へと広がりをみせた。

近年、省エネ・省力化のニーズに伴い、新規に建設される地下鉄路線などは、はじめから、ワンマン運転を前提にしたシステムが計画され、その自動運転装置として需要がふえつつある。

また、駅プラットフォームでの乗客の車両への接触・

ホームからの転落事故を防止する対策として、ホームドア（営団南北線で採用）、ホーム可動柵（都営三田線で採用）を設置する動きがある。ホームドアを開閉するためには、一般的に停止目標の ± 50 cm の範囲に列車を確実に停車させる必要があり、乗務員の高度な運転技術が必要となり、乗務員の負担が増大することになる。この負担を軽減する目的にも自動運転装置が採用される方向にある。

3. 列車自動運転装置の分類

3.1 分類の定義

列車自動運転装置は、その機能から大きく3つのタイプに分類できる。以下にその分類を示す。

①ATO（※1）装置

出発のタイミングで列車を起動させ駅間走行を行い、定位置に自動的に停止させる機能を有する装置。新交通システムの無人運転車両、比較的新しく建設される地下鉄ではこの方式が採用されている。

②定速運転装置

目標速度を設定して、その速度を維持するように列車をコントロールする装置。一部のワンマンタイプの新交通システムの車両に採用されている。

③TASC（※2）装置

出発から駅間走行は乗務員が行なうが、駅停止制御のみ自動的に行なう装置。既設路線の運転支援装置として採用されている。

3.2 自動運転装置の採用例

表1に、主な自動運転装置の採用例を示す。

4. 列車の走行制御

4.1 自動運転対応車両の機器構成

図1にATO装置対応車両の機器構成の一例を示す。ATO装置は、ATC（※3）受信装置からの制限速度

信号に従い、力行（※4）、ブレーキをコントロールすることにより列車を走行・停止させる。列車の速度は、車輪軸等に設置された速度発電機の発生周波数を基に計算する。また、駅の所定停止位置に列車を停止させるために、ATO送受信装置から地点信号を受け、正確な列車の位置を検出することができる。マスコン（※5）は、乗務員が手動運転するときの力行、ブレーキの操作器である。

4.2 ATO装置による走行制御

ATO装置の基本機能である駅間の走行制御について述べる。ATO装置は、地上からの出発指令に従って走行制御を開始する。走行中は、常にATC装置による速度制限を受ける。この制限速度を越えて走行すると、ATC装置によって自動的にブレーキがかかり、制限速度以下まで列車の速度を低下させる。したがって、ATO装置はこの制限速度を越えない範囲で、できるだけ速く円滑に走行させようとする。駅に近づく減速を開始し、定められた停止点に停止させ、新交通等のシステムでは、ホームドアが設けられており、車両のドアとホームドアの位置がずれると開けることができない。このため、目標停止点に対しては正確に停止させる必要がある。図2に一般的な駅間走行の例を示す。

5. エキスパートシステムによる列車の自動運転

5.1 自動運転エキスパートシステム

“自動運転エキスパートシステム”は、熟練運転士のように柔軟かつ的確な判断による列車の運転を目指すもので、運転制御に関するきめ細かな知識を蓄えた“知識ベース”と、走行状態に応じて知識を選択し、前向き推論によって制御指令を決定する“推論エンジン”を中核として構成される。従来の自動運転では困難であった特殊条件下での制御も、対応する知

表1 自動運転装置の採用例

タイプ	採用路線	
ATO装置	無人	横浜シーサイドライン、神戸ポートライナー、神戸六甲ライナー、大阪ニュートラム、ゆりかもめ
	有人	仙台市交南北線、営団南北線、都営三田線、都営大江戸線、埼玉高速線、名古屋市交桜通線、京都市交東西線、大阪市交鶴見緑地線、神戸市交山手線、神戸市交海岸線、北神急行、京阪電鉄東西線、福岡市交空港線
定速運転装置	桃花台新交通、広島高速交通	
TASC装置	営団銀座線、営団丸ノ内線、東急目黒線、東急池上線

図1 車両機器構成図

図2 駅間走行パターン

識を追加することでうまく適合し、あらゆる局面において最適な運転制御方式が選択できる。このシステムは、神戸新交通六甲アイランド線向けATO装置に適用され、それ以降、弊社のATOで採用されている。従来方式の列車に比べ、乗り心地の向上等に高い評価を得ている。

5.2 走行制御に適した制御方式

列車の運転操作としては、マスコン力行ノッチあるいはブレーキハンドルの扱いが主であり、さほど複雑

な操作ではない。しかしながら運転士は、運転状況に応じて“的確に”操作することで、列車をより速くしかも乗り心地良く運転している。熟練運転士ほど判断が確で無駄な動作が少ない。但し、操作は、“1秒間に等間隔で3ノッチ進段させる”といった機械的正確さは必要とされない。すなわち列車の運転では、操作の厳密さよりも状況判断能力がより重要な要素であるといえる。また、自動制御をするにあたって、単一のPID制御（比例・微分・積分制御）によって速度

追隨制御を行おうとすれば、過渡期にオーバーシュートやアンダーシュートが発生してしまう（図3）。これに対し、制御区間を「立ち上がり（加速）区間」、「過渡区間」、「定速（速度維持）区間」に分割し、各区間ごとに制御方式を変えれば比較的容易に円滑な追隨制御が実現できる（図4）。すなわち、すべてのケースに適用できる万能で複雑な制御方程式を解いて制御していくよりも、制御の条件を細分化し、その状況に適合した単純な制御方式を選択していく方がうまく制御できる。以上のことから、列車の走行制御についていえば、高度な制御演算能力よりも、状況判断能力に優れ、状況に応じた操作が的確に選択できる方式がより有効であるといえる。

5.3 エキスパートシステムによる走行制御

「状況判断によって操作方法を選択していく」といった人工知能的手法に適した方式として、ルールベース型のエキスパートシステムがある。運転士は、“速度が出過ぎたのでノッチを少し戻そう。”といった判断操作を行っている。ルールベース型システムでは、こうした判断操作を「IF（制御条件）THEN（制御手順）」のように一般化されたルールの形で表すことができる。“速度が出過ぎた”が制御条件に、“ノッチを少し戻す”が制御手順に相当する。操作が運転士の合理的な判断に基づく以上、すべての判断操作をルールの形で表現することができる。的確な判断を行なうということは、制御条件で示される状況認識にちょうど適合するものが存在するということである。また、

図3 単一制御方式による応答

図4 区間識別制御による応答

ルール次第で制御条件は十分にきめ細かく規定できる。状況認識が細分化されれば制御すべき状況が限定でき、制御手順をより単純化することができる。このシステムでは、すべての運転操作をルールの形で知識として蓄えておき、この知識に基づいた状況判断によって列車を運転していく。したがって、システムの成否はいかに有効な知識が獲得できるかにかかっている。

6. 知識ベースの生成

6.1 走行モードの分類

知識を作成する前提として、まず、走行制御の内容を時系列的に分析し、走行状態に応じた幾つかの走行モードに分割する。例えば、図4において、出発後の立ち上がり区間を“加速モード”，過渡区間を“加速緩和モード”，一定速度で走行する“定速モード”等である。各走行モードが基本的な制御単位となり、知識は走行モードごとにまとめて作成される。制御方式をできるだけ単純化するために、複雑な走行モードがあれば更に分割していく。

6.2 知識のルール化

走行モードごとに順次運転状況を想定し、そこで行われる判断処理をルール化していく。例えば、“定速モード”の中で“目標速度をやや超過し、しかもまだ加速中であれば、ノッチを少し戻す。”という運転操作があれば、これをルールの形で次のようにまとめる。

- ・ IF（条件 A かつ条件 B）THEN（手順 A）
- ・ 条件 A：速度が目標速度以上かつ目標速度+V 以下である。
- ・ 条件 B：加速度が $A1 \leq a < A2$ の範囲にある。
- ・ 手順 A：ノッチを n ステップ戻す。

判断操作が必要な制御条件はすべて洗い出し、ルール化する。通常の運転操作のみでなく、考えうる異常ケースも可能な限りルール化しておく。例えば、“急激な減速度検知は滑走（※6）発生とみなし、ノッチをやや戻す。”等である。これにより、通常は発生しない大きな外乱（例えば、一瞬非常ブレーキ（※7）が動作）により、制御が乱された場合でも、あらかじめ想定しておけば状況に応じた適切な回復操作を行うことができる。

6.3 判断ロジック

獲得されたルールは、走行モードごとに判断ロジックの形にまとめる。判断ロジックは、制御条件の各要素と制御手順との関係を論理記号によって示したもので、ルールが客観的な図形として表現される。論理記号としては、積・和・否定・分配の四つの基本記号を用いる。一つの走行モード内にあるすべてのルールは、

図 5 判断ロジックの例

一つの判断ロジックとしてまとめる。6.2 節の例では、条件 A と条件 B が論理積で結合され、手順 A に接続される。これを他のルールと組み合わせて判断ロジックにした例を図 5 に示す。同一走行モード内であれば運転状況は似通っており、ルール間で条件項目及び手順項目の内容が共通に現れる場合がある。判断ロジック上では、同一項目は共通にまとめるため、全体として無駄のないコンパクト形になる。

判断ロジックができた段階で論理に矛盾や漏れがないかを点検する。すべての制御条件において、一つの走行モード内では、ただ一つの手順が選択されるか、いずれの手順も選択されないかのどちらかであり、複数の手順が同時に選択されることのないように論理を点検する。走行モードごとにまとめられた判断ロジックが、知識データとして知識ベースに記憶される。

7. 自動運転エキスパートシステムの動作

7.1 エキスパートシステムの構成

ATO 装置内で走行制御を実行する“自動運転エキスパートシステム”部の機能ブロックを図 6 に示す。全体は、走行管理部とエキスパートシステム部（以下“エキスパート部”という。）とに分かれる。走行管理部は、装置の外部環境とエキスパート部との間に位置し、これらの境界を取り持つ。

走行管理部は外界の情報を入力し、エキスパート部

図 6 自動運転エキスパートシステム機能ブロック

が認識できる形に加工して渡す。また、走行管理部は走行状態を常に監視しており、その時点での走行モード種別をエキスパート部に通知している。走行モードが遷移した段階で、直ちに新たな走行モードをエキスパート部に通知する。エキスパート部は、指定された走行モード内の知識に基づいて推論を実行すればよいので応答が速く、実時間制御に十分対応することがができる。エキスパート部は、推論結果を制御手順として走行管理部に通知する。走行管理部は、指定された制御手順を実行することで、実際の走行制御出力が行われる。

エキスパート部は、推論エンジン知識ベース、検査

プログラム、作業メモリで構成される。推論エンジンが推論を実行する中心機能部である。知識ベースには、走行モードごとの判断ロジックが記憶されている。推論エンジンは、列車の走行状態に基づき判断ロジックの内容を評価し、結果を作業メモリに記憶する。判断ロジックで規定される制御条件については、条件の判定を検査プログラムを用いて行っている。検査プログラムは、走行管理部から実時間で列車の状態情報を入力し、指定された制御条件の判定を行う。例えば“列車の減速度が $A1 \leq \beta < A2$ の範囲にある。”といった制御条件に対し、列車の実際の検知減速度を走行管理部から取り出し、条件を満たせば“真”を、満たさなければ“偽”を値として返す。作業メモリには、推論の途中経過及び推論結果が記憶される。したがって、走行管理部は推論結果を作業メモリ経由で取り出す。

7.2 推論の実行

推論の実行は、判断ロジックを評価することで行われ判断ロジックは、スタート・論理積・和・否定・分配・ゴールの6つの要素からなる。スタートが個別の制御条件要素に相当し、ゴールが制御手順に相当する。推論の実行によってスタート要素から順に、ゴールに至るすべての要素が評価されていく。実際の推論は、要素間の値の伝播という形で実行される。スタート要素の値は、検査プログラムにより与えられ、次の接続要素に値を伝播する。値は、“真”か“偽”のいずれかである。各要素は、入力端子に値が伝播されてくると論理演算を行い自身の値を得る。得た値は、さらに次に接続される要素に伝播される。値が常に先に伝播していくことから、前向き推論といえる。走行制御は、その時点の状態に応じた実時間制御であり、高速応答が得られる前向き推論が適している。

判断ロジック上のすべての要素の値が確定した時が推論の終了となる。1回の推論に要する時間は50ms以下であり、十分に実時間制御を実施することができる。推論の成果は、唯一真となったゴールによって制御手順が決定することである。判断ロジックは唯一のゴールだけが真となるように論理構成されており、真となったゴールの制御手順が実行される。複数のゴールが真となることはないが、すべてのゴールが偽となることはある。この場合は、いずれの制御手順も実行されず、結果としては前推論サイクルの制御状態が維持されることになる。

7.3 走行制御の実施例

走行間制御は、詳細なルールの組み合わせであり、これを端的に表現することは難しいが、定速走行区間での制御例を図7に示す。

8. システム導入の効果

1) 駅間走行制御

定位置停止制御（TASC）区間では、四つの走行モードに分割し、モードごとにきめ細かな制御を行なったため、とくに相反する事項である乗り心地と停止精度の向上が合わせて実現できた。また、急勾配での制御もうまくこなしている。従来方式では、こうした最急勾配に対応できるように調整すれば、通常区間では制御ゲインが高すぎて乗り心地を害するといった結果になりがちであった。また、外乱によって通常制御範囲を外れた場合は、外れ方に合わせた制御手順を適用しているため、異常時の回復機能が大幅に改善された。

定速走行区間では、路線に応じた均衡ノッチの出力が適切に行われるため、ノッチの変化が非常に少ない走行が実現できた。

図7 定速走行の制御例

2) 試験調整期間の短縮

以下に示す効果により、現車での試験調整期間が短縮できた。

- ・知識が客観的に表現されているため変更箇所を的確に把握することができる。
- ・知識の変更はデータの変更となり、プログラム手順に比べ、変更が容易であるばかりでなく、間違いの入る余地が少ない。
- ・制御条件が限定されているため、不具合部分のみを独立して変更することができ、他の制御への副作用が出ない。

9. む す び

以上、エキスパートシステムを適用したATO装置の概略を述べた。エキスパートシステムでは、制御知識をいかに獲得するかがポイントとなる。はじめは、運転を想定したシミュレーション、運転士の操作の観察、などから蓄積するしかなかったが、現在では、これまでのシステム開発で培ったノウハウを十分活用で

きるようになってきた。このため、新規路線の開発においても、短期間でベテラン運転士に近い運転が実現できるようになってきた。

(注)

※1: Automatic Train Control (自動列車制御)

※2: Train Automatic Stop Control (定位置停止制御)

※3: Automatic Train Control (自動列車制御)
(制減速度を列車速度が超えた場合、ブレーキを出力する)

※4: 車両に加速トルクを与える指令 (自動車のアクセルに相当する)

※5: Master Controller

※6: 車輪がロックし、過大な減速度を検知する状況

※7: 緊急時に動作する空気ブレーキ

参 考 文 献

三菱電機技報 VOL.64・No 10・1990