

三吉 京
M. Miyoshi

入内島 健
K. Iriuchijima

藤原 裕二
Y. Fujiwara

輸送力の増強が鉄道システムの一つの課題になっており、列車ダイヤ高密度化のための制御方式最適化をはじめ地上設備、車両、運行方式などのさまざまな面から検討が進められている。実システムによる検証の難しい鉄道分野では、シミュレーションの重要性が高い。ここでは、設備および制御システムを実システムにできる限り近くモデリングし、各列車のマイクロな動きまで精密に再現することを目的とした連続方式と、列車群の動きをマクロにモデリングし、演算時間の短縮を図った離散事象方式のシミュレータを紹介する。

これらのシミュレータは、実際の列車運行システムの改良検討に用いられ、その有効性を発揮している。

The augmentation of carrying capacity is a serious problem in railway systems. Railway companies have been making every effort to solve this problem from various standpoints such as the optimization of railway signaling and the use of train control systems to shorten headway. Since it is difficult to verify newly developed systems in an actual railway system, simulations play an important role.

This paper describes two types of simulators: a continuous train traffic simulator which aims to simulate the movements of each train in a system as precisely as possible, and a discrete type simulator which models the movements of trains in a macroscopic manner. The efficiency of these simulators has been confirmed through their practical application to the evaluation of signaling and traffic control systems.

1 まえがき

鉄道は、社会基盤としての輸送サービスを供給しており、快適で効率的な社会機能を実現するために、安全性、定時性、高速性、さらに安定かつ十分な輸送力などが求められている。長い歴史の過程で、これらのニーズを満たすよう開発・改良が行われ、現在の鉄道は、比較的満足度の高いサービスを提供している。しかし、大都市における通勤混雑の問題は深刻化しており、輸送力の増強がさまざまな視点および機関で検討されている。

輸送力増強の有力手段である運行ダイヤの高密度化など列車運行の最適化を検討する場合、列車運行システムの解析が必要となる。列車運行システムは、線路、駅、信号、車両、運行管理、電力といったさまざまな要素で構成されるため、対象システムと同等の設備を設けて実験を行うことは経済的に無理があり、また、実際の路線を使用した検証は、営業運転時間外の夜間に限られるなど制約が多い。特に高密度化については、通勤時間帯の過密ダイヤや旅客流動におけるダイナミックな状態を対象とするため、実路線による検証は非常に困難である。

このような状況から、当社でもシミュレータの整備と適用を推進している。そのなかで、ここでは、列車の物理特性と

制御機能をできる限り実際に近い形でモデル化し、個々の列車の動作を連続時間で表現した列車制御シミュレータ UTRAS (Universal TRAIIn Simulator) と、ある地域内の列車群の運行特性を分析する、多数の列車の運行を高速にシミュレートできる列車群離散事象シミュレータ SIGROOT (Simulator for GROUp Of Trains) を紹介する。

2 列車制御シミュレータ UTRAS

2.1 UTRAS の機能

図1に列車制御シミュレータ UTRAS^{(1),(2),(3),(4)}の機能構成を示す。UTRASでは、列車の運行を制御する機能として、運行管理機能、分岐器制御機能、信号制御機能と、列車の位置を検知する軌道回路を模擬している。各列車は、これらの機能による制御を速度制限信号という形で受けながら、あらかじめ計画された列車ダイヤと標準運転速度にできる限り沿って走行する。

2.1.1 運行管理模擬機能 列車の発生・消滅(車両基地からの出入りなど)をはじめ、列車ダイヤに基づいて駅の到着番線などを制御する進路制御機能を模擬する。また、駅からの発車・停車・通過などの運転士の機能および折返し処理、列車ダイヤと標準運転速度とに基づく目標速度の設定などを

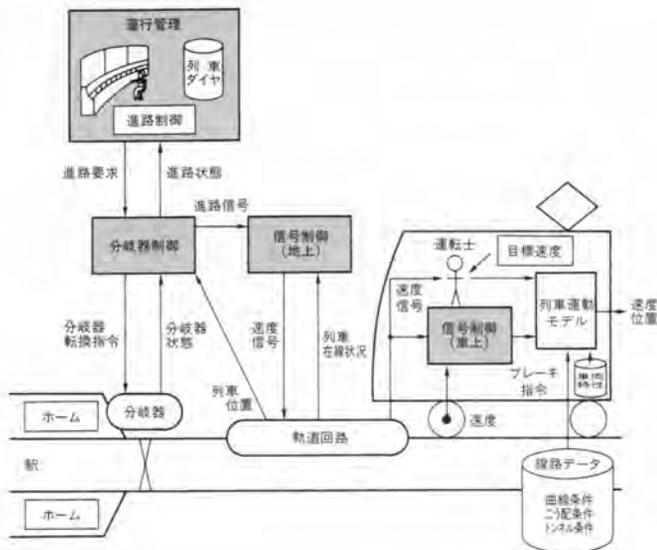


図1. UTRASの機能構成 UTRASでは、列車制御システムとして、運行管理機能、分岐器制御機能、信号制御機能を模擬する。

Functional configuration of UTRAS

行う。

2.1.2 分岐器制御模擬機能 分岐器の転換、信号機の制御などを模擬する。高密度化を検討するうえで必要な制御タイミングを、精度良く模擬するために、実際の現場機器で使用している条件やアルゴリズムを詳細に模擬している。

2.1.3 信号制御模擬機能 列車間の衝突を防止するために、列車の間隔を制御する信号保安機能を模擬するものである。最近では、ATC (Automatic Train Control: 自動列車制御装置) 方式と呼ばれる信号保安方式が多く採用されている。UTRASでは、信号保安方式としてATC方式をはじめ、改良型ATC方式、移動閉そく式などの方式が組み込まれており、さらに今後新しい方式を開発するうえで、対応しやすい構造となっている。

ATC方式では、先行する列車の位置や分岐器の状態により、列車に送信する速度信号を決定する。列車側では、この信号に従って列車速度の制御を行う。

2.2 列車制御システム検討への適用と成果

列車ダイヤの高密度化などを目的として、新しい方式である改良型ATC方式、移動閉そく方式の比較検討を行った。

図2は、ある駅における列車の発車および通過を、30分間抑止する(見合わせる)という外乱を与え、抑止解除後に抑止を受けた列車の後続列車が、抑止の影響を速度制限という形で受けながら走行するようすを表したものである。横軸は位置であり、縦軸は列車走行速度および速度信号である。

UTRASでは、このほか、運転間隔をどのぐらい詰められるかを表す指標(最小運転時隔)を算出する機能など、列車運行制御方式の評価だけでなく、ダイヤ作成などの運行計画の評価機能ももっている。

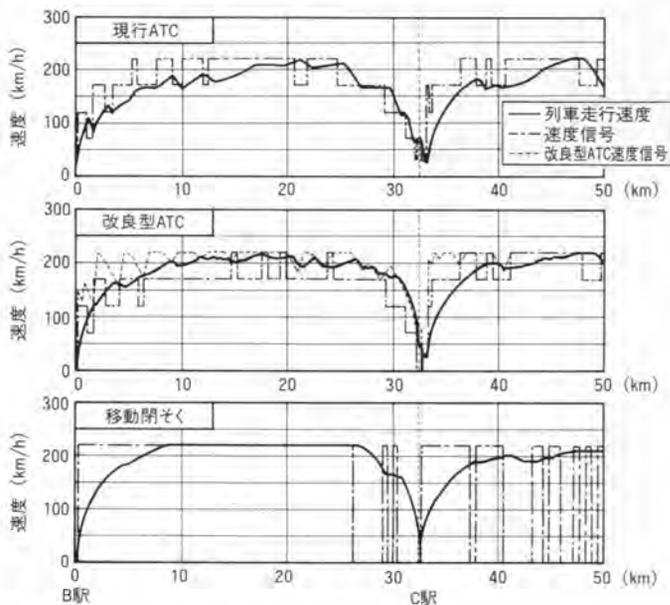


図2. 信号制御方式の違いによる運転曲線の比較 現行ATC、ATC-P(改良型ATC)、移動閉そく方式といった信号制御方式の違いにより、後続列車の走行が異なる。

Difference of run curve

3 列車群離散事象シミュレータ SIGROOT

路線上を走行する多数の列車の挙動を高速に調べるために、列車群離散事象シミュレータSIGROOTを開発した。各列車のシミュレーションを精密な連続時間モデルで行う場合、多数の列車の挙動を調べるシミュレーションでは計算時間が長くなる。しかし、離散事象として近似的にモデル化することで、シミュレーション時間を短縮することができる^{(5),(6)}。

3.1 待ち行列モデル

SIGROOTは、路線を待ち行列の接続によって表現する。

図3は、片方向の路線を一列車が運転している状況を時系列的に示したものである。ここに示す以外に、分岐器や駅構内の側線などをすべて待ち行列表現することが可能であり、路線上の全列車の挙動を閉じた系として再現することができる。

3.2 列車の走行に関する事象

SIGROOTでは、列車の走行を待ち行列間の移動によって表現する。図3の(a)~(c)は、それぞれ列車の状態を表しており、図中の●印が列車を表す。(a)から(b)、(b)から(c)それぞれの間で、状態変化を示す“事象”が生起する。(a)から(b)では列車がB駅に到着する事象、(b)から(c)では列車がB駅から完全に抜け出す事象(後続の列車がB駅に進入できるようになる)が生起し、列車を表す●印が待ち行列間で移動している。

3.3 連続シミュレーションとの接続

UTRASとSIGROOTでシミュレーション結果を接続することで、効率的なシミュレーション分析が行える。SIGROOTによるシミュレーションに先立ち、続行する二列車間の関係を前述の連続時間シミュレータUTRASを用いて条件を変化

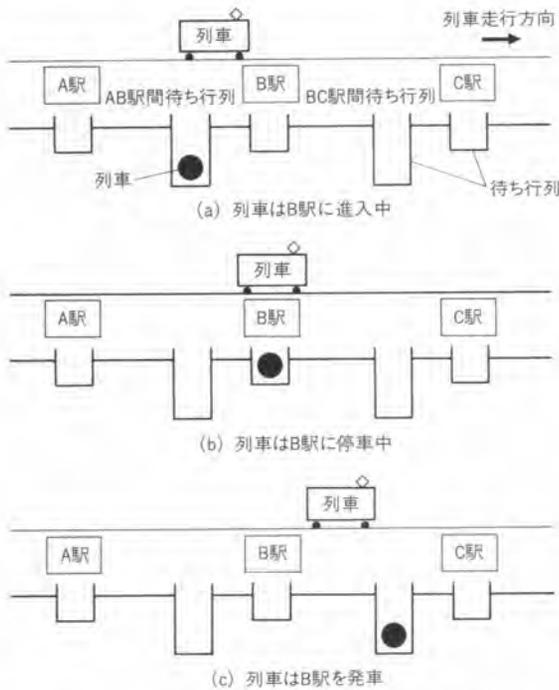


図3. 待ち行列による路線の表現(片方向) SIGROOTでは、路線を待ち行列の接続で表現し、列車の走行は待ち行列間の移動で表現する。
Single line modeled as successive queues

させて調べ、定式化しておく。SIGROOTによって多数列車の走行を調べるシミュレーションでは、事象間の経過時間すなわち列車の走行時間を先行列車との相対時間によって変えることで、連続シミュレーションの結果を反映させている。このような方法により、計算時間を大幅に短縮できる。

3.4 シミュレーション結果例

図4にSIGROOTによるシミュレーションの結果例を示す。ある都市鉄道で朝のラッシュ時に特定駅で大きな遅延が発生しているため、列車運行制御によって軽減できないかどうか調べたものである。停車時間の実測値をシミュレーションデータとして使用している。横軸は着日駅の列車ダイヤ上の到

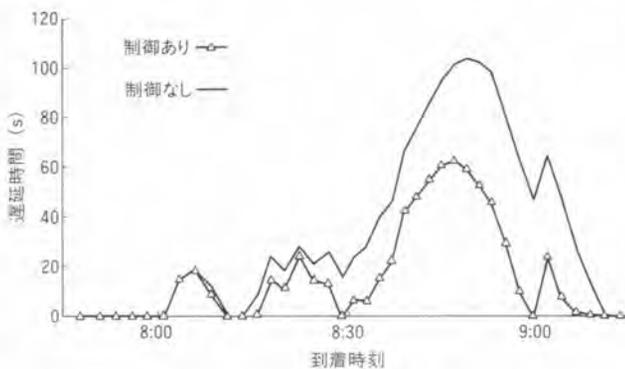


図4. シミュレーション結果例 ラッシュ時の特定駅における遅れを、列車運行制御により軽減した例(△印の実線が制御を行った場合)である。
Simulation results

着時刻であり、縦軸は実際の到着時刻の遅延量である。実線は制御を行わなかった場合のシミュレーション結果、△を付した実線は制御を行った場合の結果である。

この結果を得るために、この路線全体(約25駅)について、3時間分(約150列車)のシミュレーションを行った。計算時間は当社のエンジニアリングワークステーションAS4075(SPARC 40 MHz, SPECint92 21.8)で約30秒であり、連続シミュレーションに比べて大幅な時間短縮となっている。

4 あとがき

列車運行システム最適化のためのシミュレーション技術として、連続型と離散事象型の二つの手法を紹介した。

今後も、シミュレーション技術の向上を通じ、鉄道システム開発の一翼を担っていく所存である。

謝辞

列車制御ダイナミックシミュレータUTRASは、(財)鉄道総合技術研究所と共同開発したものである。開発にあたり、多大のご指導ご協力をいただいた関係各位に感謝する。

文献

- (1) 三吉 京, 他: 列車制御シミュレータ(UTRAS)(第2報), 第29回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, pp.154-158 (1993)
- (2) 小山敏博, 他: 列車制御総合シミュレータ, 計測と制御, 32, 7, pp.582-585 (1993)
- (3) 林 美恵子, 他: 列車制御シミュレータUTRASの開発(第4報) - 移動閉そく方式のシミュレーション評価 -, 平成7年電気学会全国大会予稿集, pp.4-371-372 (1995)
- (4) 平尾裕司, 他: 列車制御シミュレータUTRASの開発と信号方式の評価, 鉄道総研報告, 9, 1, pp.55-60 (1995)
- (5) 前田 豊, 他: 大阪市地下鉄1号線(御堂筋線)の列車群シミュレーション, 平成5年電気学会産業応用部門全国大会, No.118, pp.499-504 (1993)
- (6) 入内島健, 他: 大阪地下鉄御堂筋線における列車群の挙動の離散シミュレーション, 第13回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス, No. 2-1, pp.79-82 (1994)



三吉 京 Miyako Miyoshi

1982年入社。鉄道およびプロセス制御システムの研究・開発に従事。現在、重電技術研究所システム技術開発部主務。Heavy Apparatus Engineering Lab.



入内島 健 Ken Iriuchijima, D.Eng.

1991年入社。シミュレーション技術の研究・開発に従事。現在、研究開発センターシステム・ソフトウェア生産技術研究所, 工博。Systems & Software Engineering Lab.



藤原 裕二 Yūji Fujiwara

1979年入社、鉄道向け輸送情報システムのエンジニアリング業務に従事。現在、交通事業部交通システム開発部課長。Transportation Equipment Div.