

公共交通の効率的な輸送計画を作成するためのデジタルサービスとそれを支えるAI技術

Digital Services Employing AI Technologies to Support Efficient Scheduling of Public Transit Systems

井山 仁志 IYAMA Hitoshi 久保 英樹 KUBO Hideki 大槻 知史 OTSUKI Tomoshi

鉄道や、軌道、新交通、バスなどの公共交通システムの事業者は、需要変動に対応した輸送計画を作成するためにシステム化を図っているが、制約も多くいまだ熟練者のスキルに依存している。

東芝グループは、輸送計画の基本機能をパッケージ化した輸送計画ICT（情報通信技術）ソリューションTrueLine™を開発し、SaaS（Software as a Service）としての提供だけでなく、そのCPS（サイバーフィジカルシステム）技術を活用して輸送計画の作成を支援するサービスを、事業者を提供している。TrueLine™は、普遍的な数理モデルに基づく最適化AIを採用することで、路線ごとのモデルを構築しておけば運用の初日から利用することができ、運行改善と事業者の業務効率向上に貢献している。

Operators of public transit systems, including railway, light rail transit (LRT), new transit, and bus systems, are making efforts to improve the efficiency of transit scheduling in accordance with demand fluctuations through the introduction of digital systems. However, such transit scheduling faces a variety of constraints and still depends on a limited number of skilled workers.

The Toshiba Group has developed the TrueLine™ cloud-based transit scheduling system that integrates the basic functions of transit scheduling into one package, and has been providing it to operators of public transit systems not only as cloud-based software as a service (SaaS) applications but also as cyber-physical system (CPS) services to support efficient transit scheduling through the use of optimization artificial intelligence (AI). Because these optimization AI technologies are based on universal mathematical models, operators can easily use this system from the first day of implementation if models for each train route have been built in advance. TrueLine™ is contributing to the improvement of transit scheduling and enhanced business efficiency of public transit system operators.

1. まえがき

輸送計画は、輸送需要に基づいたダイヤの作成や、車両運用の計画、車両基地内での入れ換え計画・検査計画、乗務員運用の計画など、運行に関わる計画の総称である。各計画は日々の運行の最も基本的な計画となるため、この作成業務は事業者にとって欠かせない。現在、輸送計画の作成業務はシステム化が進んだが、計画者の業務の効率向上をサポートする役割が大きい。リソースや線路の配線など制約の多い中で、効率良く運行するための計画の検討は、今でも熟練者の経験に依存している。

東芝グループは、世界の鉄道や、軌道、新交通、バスなどの公共交通事業者の輸送計画作成業務をサポートするため、輸送計画の基本機能を一つのパッケージにした輸送計画ICTソリューションTrueLine™を開発した。TrueLine™では、SaaSとして輸送計画のデジタルサービスを提供するだけでなく、東芝グループ自身がCPS技術を活用して輸送計画作成を支援するなど、技術を幅広く提供している。更に、TrueLine™の機能を向上させるために、熟練者のノウ

ハウを数理モデル化して鉄道の運用改善に生かす汎用のAI技術を開発してきた。

ここでは、TrueLine™の概要とそれを支えるAI技術について述べる。

2. デジタルサービスの提供方法

TrueLine™は、データセンターに設置したサーバーから、各ユーザーにクラウドサービスで提供される。既に、我が国を含めたアジアとヨーロッパでサービスを開始しており、今後、世界展開を図るために、アジア、ヨーロッパ、北米の3拠点にデータセンターを開設する予定である。

SaaSとしてだけでなく、CPS技術の一つであるデジタルツイン技術を活用して、運行計画作成の支援も行っている。個別に管理されている線路設備や、車両性能、ダイヤ、電力設備、各種規程などをデジタルデータ化することで、サイバー空間上に現実の列車運行環境を再現し（デジタルツイン）、各種条件でのシミュレーションやAI技術による運行改善策の提案を行っている。

3. 輸送計画を支えるTrueLine™の特長

TrueLine™は、運転曲線の作成から、基本ダイヤ作成、車両運用作成、乗務員・車掌運用作成、車両割り当て、構内基本計画作成・構内作業管理までの基本的な輸送計画機能を網羅し、優れたユーザーインターフェースで業務の効率向上をサポートする(図1)。以下に、TrueLine™の各サービスの特長を述べる。

- (1) 運転曲線作成サービス 車両諸元と線路設備のデータを基に、各走行位置での速度と経過時間を計算した運転曲線を作成し、更に駅間の運転時間とエネルギー消費量も算出する。
- (2) 時隔曲線作成サービス 運転曲線と信号設備データを基に、列車時隔値(同一進行方向及び反対方向の列車間の安全な距離を満たした運行時間の間隔)を算出する。
- (3) 基本ダイヤ作成サービス ダイヤと車両運用を作成できる。番線競合、単線区間の同時在線、及び時隔値のエラーチェックを行いながら、運転時間や、停車時間、停車番線などを調整する。
- (4) 乗務員・車掌運用作成サービス 前述の(3)で作成した車両運用を乗務単位で分割し、乗務員・車掌の1日の勤務になるように接続しながら勤務時間や休憩時間を確認し、乗務区所ごとの乗務員仕業を作成する。
- (5) 検査計画作成・車両割り当て管理サービス 各車両区所に所属する車両の検査・作業計画と、車両

への運用割り当てを作成する。また、走行実績を登録し、管理する。

- (6) 構内基本計画作成・構内作業管理サービス 車両基地内の夜間留置や、車両入れ換え、日中の検査・作業による転線などを計画する。
- (7) GIS(地理情報システム)運行監視サービス GPS(全地球測位システム)を基に車両位置をリアルタイムで把握し、地図上に車両や運行に関する情報を表示して運行監視する。
- (8) 直流き電シミュレーションサービス 直流電気鉄道で列車をダイヤに従って走らせたときに、電力供給の様子をシミュレーションし、電圧降下や変電所電力量を画面上に表示する。シミュレーションプログラムは、学校法人工学院大学の高木 亮教授らが開発し提供している、き電特性シミュレーションプログラムRTSS(Railway Total System Simulator)を活用している⁽¹⁾。

4. TrueLine™を支えるAI技術

TrueLine™に適用したAIは、数理モデルに基づく最適化AIをベースに構築した。最適化AIは、普遍的な原理を制約条件として設定することが特長であり、学習用データの準備や学習プロセスは不要である。したがって、事前に路線ごとのモデルを構築しておけば、運用の初日から利用できる。これは、事前学習プロセスが必須となるディープラーニングなどの機械学習AIとは大きく異なる点であり、運用時の利便性向上につながる。

以下に、それぞれのAI技術による、TrueLine™の機能向上について述べる。

4.1 省エネ運転曲線作成AI

鉄道におけるエネルギー消費量は、家庭に比べて大きく、数%の削減でも大きな効果を生む。

運転曲線作成サービスでは、線路設備や、車両性能、駅間の運転時間といった事前に決められた条件の中で、複数の運転方法から、乗り心地に配慮しながらエネルギー消費量が少ない運転を探索し、省エネ運転曲線を作成できる。省エネ運転曲線を、運転士の指導や車上に設置された運転支援システムで使用することで、省エネ運転を実現できる。

4.2 車両運用作成AI

車両運用作成は、ダイヤを作成した後に、車両の使用スケジュールを決める作業である。この車両運用作成のために、列車スジ^(注1)を一つ一つつないでいくのは、多大な時間と労力が掛かる。

基本ダイヤ作成サービスでは、各列車スジの接続最小時間^(注1)ダイヤに引いてある、列車の運行を表す斜線。

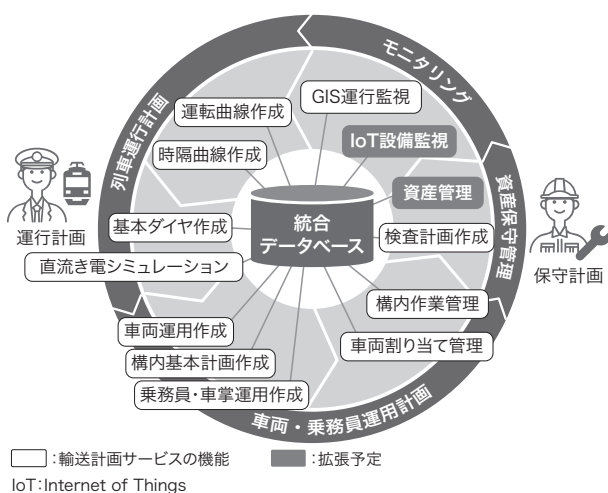


図1. 統合データベースによる輸送計画サービスの各機能の連携
 全ての機能が一つのデータベースに接続され、データが同期して動くことを示している。
 Collaboration of individual functions of transit scheduling services achieved by integrated database

間や、番線、車両形式などを考慮しながら、列車スジ間の接続時間を短くして予備車をより多く生み出すことで、運用効率の良い車両運用を作成できる。

4.3 遅延評価・予測AI

ダイヤのどこに問題が潜み、どこを改善したらよいかを考えることは難しい。

基本ダイヤ作成サービスでは、デジタルツインを活用して、列車の遅延をどこで回復できるかを確率で算出することで、ダイヤの頑強性を評価する。これにより、遅延が拡大する場所を推定して、その区間への対策を検討できる。

4.4 停車時間最適化AI

停車時間は、ドアの開閉や乗客の乗降に掛かる最低限必要な時間と、列車の遅れを吸収する余裕時間とに分けられる。遅延リスクを低減するためには、余裕時間の最適な配分が重要である。

基本ダイヤ作成サービスでは、列車の始点から終点までの運転時間は変更せず、停車時間の余裕時間を各駅に適切に再配分し、遅延リスクを低減したダイヤを作成できる。

4.5 列車間隔最適化AI

遅延リスクを低減するもう一つの手段として、適切な列車間隔を満たしたダイヤの作成がある。

基本ダイヤ作成サービスでは、停車時間や時隔値などの制約条件を基に、既にある時刻表を修正して、遅延が発生しにくいダイヤとなるように、列車の間隔を調整できる。

4.6 番線最適振り分けAI

複数路線が乗り入れ、多くの番線があるターミナル駅では、発着する列車の間隔を適切に確保するとともに、どの番線に列車を到着させるかを綿密に計画することにより、円滑な運行を実現できる。

基本ダイヤ作成サービスでは、各番線を発着する列車の組み合わせを全てデジタルツインで再現し、各列車間の影響や支障が少ない停車番線を決定し、効率的なターミナル駅運用を計画できる。

4.7 乗務員運用作成AI

乗務員運用計画は、車両運用を乗務単位で分割し、小さな乗務を組み合わせることで最適に接続すると効率の良い仕事を作れるが、この組み合わせを考えることは難しく、作業者の負担が大きい。

乗務員・車掌運用作成サービスでは、勤務時間や、休憩時間、連続乗務時間などの、各事業者で定められている乗務員のルールを基に、人の考えに沿って各乗務をつなぐことができ、効率の良い仕事を作成できる。

4.8 検査計画提案AI

車両の検査は、検査周期など各社の規程や法律で定められ

たルールを守り、車両基地のリソースが限られる中で実施するため、検査計画の作成は非常に手間が掛かる作業である。

検査計画作成・車両割り当て管理サービスでは、検査周期や各種作業の制約を守りながら、検査周期ができるだけ長くなるように検査を割り当てることができる。長周期化することで、検査の総実施回数を削減できる。また、周期のルールはないが、ある期間での実施回数や順番が重要な清掃などは、周期が均等になるように作業を割り当てられる。

4.9 配車計画提案AI

車両の配車計画は、車両基地への入出庫と検査が行いやすく、かつ車両の稼働率が高くなる日々の運用順序で車両を割り当てると、効率良く運用できる。しかし、日々の運用の中で、遅延や車両故障などで運用が乱れた場合、複数の制約があるため、効率の良い運用を再計画するには多大な時間が掛かる。

検査計画作成・車両割り当て管理サービスでは、運用の順序や検査、留置場所の日々の接続に基づいて、計画の作成や、運用が乱れた後に短時間で効率の良い運用を再計画できる。

4.10 構内作業の留置・転線提案AI

入場してきた車両を車両基地内のどの番線に留置させるかは、次の日に効率良く出場させるために重要である。

構内基本計画作成・構内作業管理サービスでは、出場／入場時に支障が起きない留置番線や転線を計画できる。あらかじめ決められた運用の順番を基に、円滑に、効率良く入出庫ができるような留置番線を提案する。

5. 最適化AIの適用例（検査計画提案AI）

最適化AIの適用例として、1か月分の列車検査計画を自動提案する場合の、モデル化と解法について述べる。

図2は、各編成に5日ごとに実施する場合の列車検査計画の例である。図2の各編成を横に見ると、所定の周期(例えば5日)ごとに列車検査を実施することが確認できる。

列車検査計画には、この基本条件のほか、下記のように、適用路線によって様々な制約条件がある。

- (1) 各日の列車検査の総量は、キャパシティー以下とする必要がある。このキャパシティーは、回数や作業合計時間の上限で設定され、この値は通常、平日／土曜／休日により異なる。
- (2) 清掃などほかの作業を実施する場合には、同じ日には列車検査を実施できないことがある。逆に、作業によっては、できるだけ同じ日に実施したい場合もある。
- (3) 月検査は上位の検査であるため、列車検査を実施したとみなされる。また、重要部検査の実施中は、列車

日付	月	4										
日	日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
キャパシティー		2	0	0	2	2	2	2	2	0	0	2
編成01	列						列					列
編成02					列			列	清掃			
編成03					月検				列			
編成04	重要部検査								列			
編成05	列						列					列

列：列車検査実施 月検：月検査実施

図2. 最適化AIで作成した列車検査計画の例

最適化AIは、周期やキャパシティーなどの制約条件を満たすように、提案する列車検査計画を自動作成する。

Example of inspection schedule for each trainset created using optimization AI

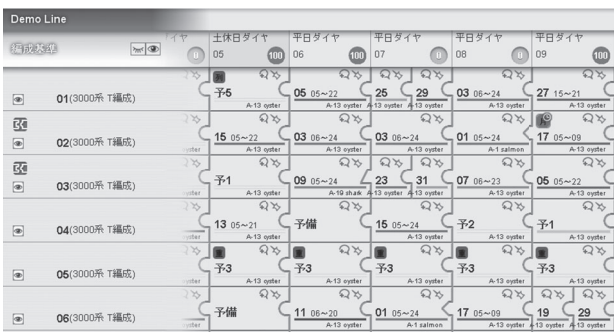


図3. TrueLine™の検査計画作成・車両割り当て管理サービスの画面例

各車両基地に所属する編成に対して、運用をパズルのピースと見立てて、日々の検査計画と配車計画を作成できる。

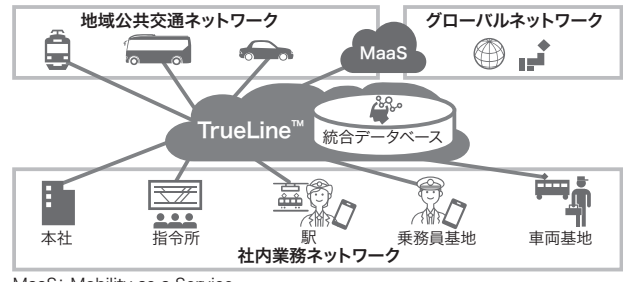
Example of inspection planning and trainset rostering service display of TrueLine™

検査は不要である。

また、適用路線により異なる評価基準として、次のように様々な運用の考え方があがるが、これらは目的関数を切り替えることで柔軟に設定可能である。

- (1) コスト削減の観点から、月間の検査実施回数を最小化したい
- (2) リスク削減の観点から、法定周期よりも短い周期で運用したい
- (3) 分かりやすさの観点から、月間の編成ごとの実施回数を固定したい

これらの制約条件や目的関数は、混合整数計画と呼ばれる数理モデルで表現でき、適用路線ごとに制約条件や目的関数を適切に設定しておくことにより、所望の計画を高速に自動提案できる。この最適化AIは、検査計画作成・車両割り当て管理サービスで利用できる(図3)。



MaaS: Mobility as a Service

図4. 公共交通システムの持続的な発展を支えるデジタルサービスの概要

地域を構成する複数の交通機関が連携し、最適な輸送計画を検討できるサービスを提供していく。

Overview of digital services provided by TrueLine™ to support sustainable development of public transit systems

6. あとがき

TrueLine™は、最適化AI技術を用いて従来の計画者の作業や業務の効率向上を行うだけではなく、デジタルツイン技術で運行改善を図るサービスも提供している。引き続きAI技術の精度を高めつつ、図1に拡張予定として示したIoT (Internet of Things) 設備監視や、資産管理、更には未踏の課題を解決できる技術の拡充を進めていく。

今後は、公共交通を取り巻く環境が急激に変化していることを踏まえて、今までは1事業者に対するサービス提供であったものを、地域を構成する複数の交通機関の連携により、全体のリソースを考慮した最適な輸送計画を検討できるサービス(図4)として提供することを目指す。これにより、地域の公共交通の持続的な発展に貢献していく。

文 献

- (1) 高木 亮, 曾根 悟. 直流式電システムの駅間走行時分一定化シミュレーション. 電気学会論文誌C, 1995, 115, 8, p.975-983.



井山 仁志 IYAMA Hitoshi
東芝インフラシステムズ(株)
鉄道システム事業部 鉄道システム技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



久保 英樹 KUBO Hideki
東芝デジタル&コンサルティング(株)
鉄道デジタルトランスフォーメーション推進部
技術士(情報工学部門)
Toshiba Digital & Consulting Corp.



大槻 知史 OTSUKI Tomoshi, Ph.D.
研究開発センター 知能化システム研究所 システムAIラボラトリー
博士(情報理工学)
日本オペレーションズ・リサーチ学会会員
System AI Lab.