

製造、サービス分野 と人工知能技術

03

櫻井茂明 ((株)東芝研究開発センターシステム技術ラボラトリー) : shigeaki.sakurai@toshiba.co.jp

愛須英之 ((株)東芝研究開発センターシステム技術ラボラトリー) : hideyuki.aisu@toshiba.co.jp

本稿では、産業界における人工知能技術の進展を見るために、製造、サービス（特に鉄道サービス）分野における人工知能技術を利用した5つの応用システムを紹介する。製造サービス分野からは、欠陥の有無を診断する検査プログラムを生成する検査プログラム自動生成システム、生産スケジューリングタスク向けのシェルに基づいた生産計画システムを紹介する。一方、サービス分野からは、列車ダイヤの乱れを回復する運転整理システム、車両基地における構内作業計画を作成する構内作業計画システム、状況変化に応じて運行計画をリアルタイムに修正する運行管理システムを紹介する。また、これらシステムの紹介を踏まえた上で、今後の人工知能技術の展望について述べる。

はじめに

人工知能技術は一時のブームは去ったものの、その技術は着実に浸透している。産業界においても、人工知能技術そのものが喧伝されることはないとしても、人工知能技術は多くの分野における基盤技術として活用されており、さらに、新しい取り組みがなされている。しかし、人工知能技術は、産業界における実際の利用状況が見えにくくなっており、その存在意義を示す上では、産業界における応用例を示すことは意義あることと考えられる。そこで、本稿では、人工知能技術が利用されている分野のうち、製造、サービス（特に鉄道サービス）分野に焦点をあてて、その利用状況を紹介する。以下の章では、製造分野の応用例として、検査プログラム自動生成システム、生産計画システム、サービス分野の応用例として、運転整理システム、構内作業計画システム、運行管理システムを紹介する。

検査プログラム自動生成システム

検査プログラム自動生成システム⁵⁾は、製品の画像データを入力することにより、当該製品における欠陥の有無を判定する検査プログラムを自動生成するシステムである。従来、このような検査プログラムは、専門の技術者によって、試行錯誤を通して開発が行われていた。製品の開発サイクルの短縮化や専門の技術者の減少に伴って、検査プログラムの自動生成が期待されるように

なっており、人工知能技術に基づいた検査プログラム自動生成システムの構築が行われた。

本システムは、多点探索法の1つである遺伝的アルゴリズムを用いて、複数の検査プログラムを生成する。遺伝的アルゴリズムは、良い親を組み合わせることにより、より良い子供ができるという生物学的知見を工学分野に持ち込んだアルゴリズムである。本システムは、生成された検査プログラムを用いて、サンプル画像に対応する複数の特徴量を計算し、欠陥の有無を判定する。ただし、特徴量に基づいた欠陥の有無の判定には、木構造形式で記述されたファジィルールを利用している。本ファジィルールは、機械学習技術を利用することにより検査プログラムごとに自動的に獲得される。また、サンプル画像にあらかじめ人手で付与されている欠陥の有無と判定結果を比較することにより、検査プログラムの良し悪しを表す適合度を計算する。遺伝的アルゴリズムは、この適合度に基づいて算出される確率に従って、現在の検査プログラムの集合から親となる検査プログラムを選択し、選択した2つの検査プログラムの一部のプログラムを交換する交差、選択した検査プログラムの一部の画像処理関数やパラメータの値をランダムに変更する突然変異といった操作を実施することにより、親となる検査プログラムの一部を変形した、新たな検査プログラムを複数生成する。本システムは、この解の生成と評価を逐次繰り返すことにより、適合度の高い準最適な検査プログラムを探索する。

本システムは、[図-1](#)に示す遺伝子コーディング部、

03

製造、サービス分野と人工知能技術

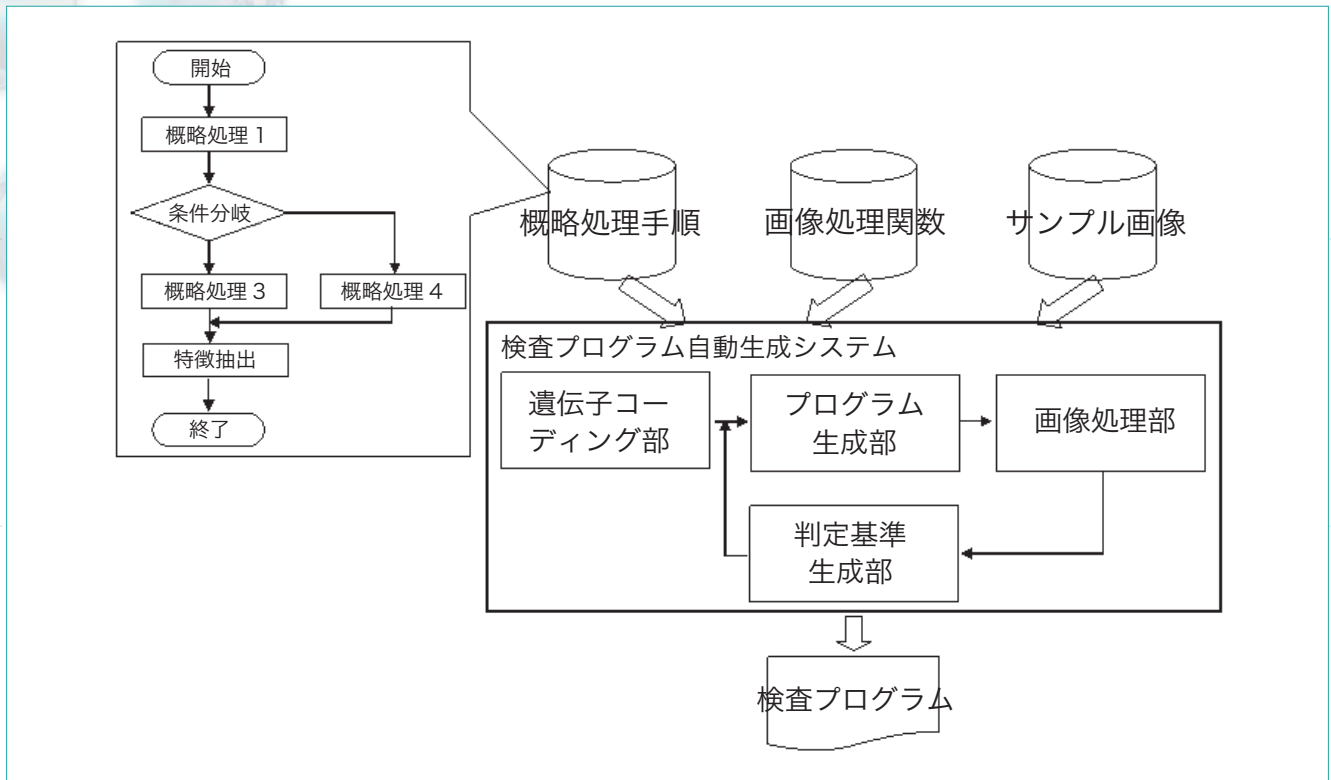


図-1 検査プログラム自動生成システムの構成

プログラム生成部、画像処理部、判定基準生成部から構成されている。本システムに対して、概略処理手順、画像処理関数、サンプル画像を入力として与えることにより、準最適な検査プログラムを自動生成する。ここで、概略処理手順とは、検査プログラムのおおまかな処理の流れを、登録されている概略処理を組み合わせで記述したものであり、検査プログラムを開発する専門の技術者によって記述される。概略処理の中には、概略処理を実現する画像処理関数の候補が指定されており、特定の画像処理関数や二値化、エッジ処理といった類似の処理をまとめた画像処理関数のクラスが指定されている。

本システムは、検査プログラムを開発する専門の技術者が概略処理手順を簡便に記述できるように、概略処理手順を記述するエディタを用意している。専門の技術者は、登録されている概略処理の中から必要な概略処理を選択し、エディタ上に配置して、概略処理間を線で結ぶことにより、概略処理手順を記述することができる。また、新たな概略処理を登録したり、概略処理に含まれる画像処理関数を追加、変更したりすることもできる。このため、専門の技術者は柔軟かつ容易に概略処理手順を記述することができる。

本システムはICパッケージの不良品検査、製品表面の色むら検査などの検査プログラムの自動生成に適用され、その検査プログラムの開発の効率化に貢献した。

生産計画システム

人工知能技術の産業応用として、スケジューリング関連は最も大きな成果を挙げた分野の1つである。1980年代から1990年代にかけて、熟練者の作成する計画を自動的に再現することを目的としたエキスパートシステムの研究開発が数多く行われた。その後、ルールベース型のシステムは大規模な問題の解決には不向きであることが明らかになり、人工知能の手法が単独で用いられることは少なくなった。しかしながら、現実のスケジューリング問題は、定式化が困難なため数理最適化手法の適用には限界がある場合も多く、熟練者の豊富なスキルを計画の自動化に取り込む手段として、依然として人工知能技術は有力な手段である。熟練者の知識を抽出する際の最大の問題点としては、汎用エキスパートシステムで扱える知識表現の抽象度のレベルと、人間の持つ知識表現の抽象度のレベルが一致しないことが挙げられる。このため、知識の実装に時間を必要とする。タスク特化シェルARES/SCH²⁾では、生産スケジューリング問題に適用ドメインを特化することで、知識獲得を効率化しており、対象問題を定義するためのスケジューリングモデルと、手続き的な記述であるスケジューリング手順を容易に記述することを可能としている。ARES/SCHでは、スケジューリング手順は、基本的な操作単位を示す基本タスクを組み合わせで一種のフローチャートとして記述する。

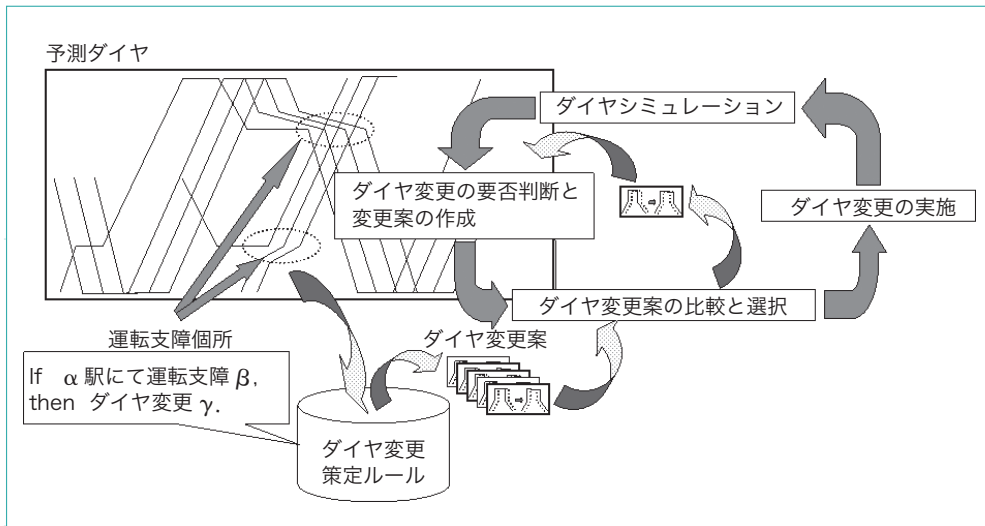


図-2 運転整理の意思決定モデル

基本タスクは、スケジューリングモデルからジョブやリソースなどの操作対象を選択するタスク、ジョブ配置や挿入、入れ替えなどの操作自体を表現するタスク、条件分岐などスケジューリング手順を制御するためのタスクから構成されている。それぞれのタスクは、実行のための条件を、自然言語表現に準じた論理式として記述することが可能である。このため、タスクをプロダクションルールのような宣言的な知識として記述することと、フローチャートの一部として手続き的に記述することの両方が可能であり、さまざまな抽象度の知識を柔軟に記述することができる。

ARES/SCH は、変圧器のコイル巻き工程の計画システム、プリント基板のメモリモジュールのマウント工程の計画システム、鋳造部品の製造プロセスの計画システムなど、数多くの生産システムのスケジューリングに適用されており、その効率化に貢献した。知識ベース構築環境を充実させたことにより、熟練者と対話を行いながらその場で知識の再構築と検証を行うことが可能になり、知識獲得に要する期間を短縮することができた。

運転整理システム

運転整理システム³⁾は、車両故障、事故、悪天候などの運転支障の発生によりダイヤに乱れが生じた際に、ダイヤを修正し、正常なダイヤに速やかに戻すためのシステムである。ダイヤの高速化や高密度化に伴って、速やかにダイヤを修正することが困難になってきており、計算機による運転整理業務の支援が望まれていた。紹介する運転整理システムは、図-2に示す運転整理の意思決定モデルに基づいて、運転整理を実現している。本システムは、運転指令員の過去の運転整理事例をルール化することにより、運転整理を実現するエキスパートシス

テムとして構成されており、以下において、本システムの基礎となるマンマシン協調型運転整理モデルの概要を紹介する。

マンマシン協調型運転整理モデルにおいては、運転整理における意思決定プロセスを「ダイヤシミュレーション」、「ダイヤ変更の要否判断と変更案の作成」、「ダイヤ変更案の比較と選択」、「ダイヤ変更の実施」の4つのステップに分解し、これらステップを巡回的に実行することにより、運転整理業務を表現している。本システムでは各ステップを実現するために、「ダイヤシミュレーション手法」、「ダイヤ変更策定ルール」、「ダイヤ変更案の比較選択基準」に関する知識をそれぞれ利用している。ダイヤシミュレーション手法は、数時間先までの運行予測を正確かつ高速に行う予測方式である。本方式では、駅への列車の着あるいは発を事象としてとらえることにより、発生時刻順に後方に事象をたどるかたちで各列車の着発時刻を決定している。ダイヤ変更策定ルールは、ダイヤ変更が同一のダイヤ変更事例をデータベースから収集し、システム開発者が手動で一般化することによって作成している。本ルールは、「If α 駅で運転支障 β, then ダイヤ変更 γ.」といった IF-THEN 形式で記述されており、該当駅での該当する運転支障が発生した列車に対して、該当するダイヤ変更を実施することを可能としている。たとえば、列車 X が後続列車 Y を駅 α で待避する予定になっている場合に、「駅 α で列車 Y の到着が一定時間以上遅れたならば、列車 X の当駅での待避を中止する」という待避中止ルールをダイヤ変更策定ルールとして作成する。また、ダイヤ変更案の比較選択基準としては、処理時刻の早いダイヤ変更案を優先するというヒューリスティックを採用している。このため、たとえば 9:00 と 9:30 の 2 カ所において、待避中止ルールを適用可能である場合には、処理時刻の早い 9:00 に

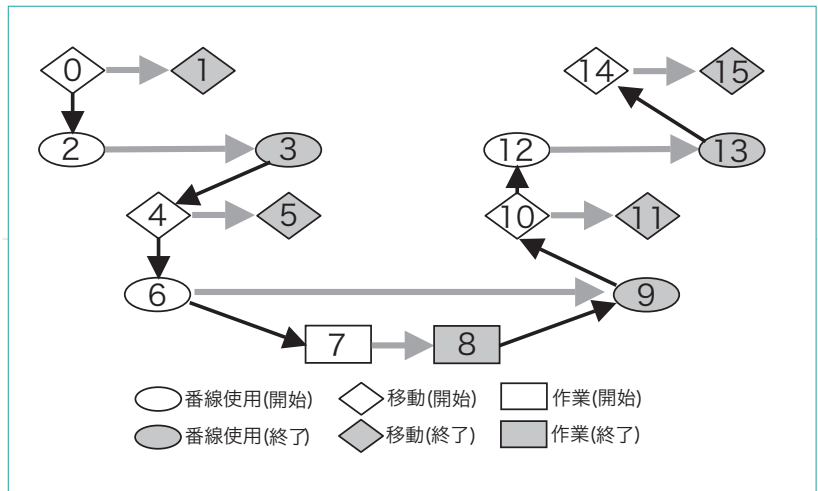
対応する待避中止ルールを優先的に採用する。

本システムは、各ステップを独立に起動するモードや4つのステップを指定した回数や指定した予測範囲内で繰り返し実行して運転整理案を自動作成するモードを提供している。運転整理を自動作成するモードにおいては、処理時刻の早い順にダイヤ変更案を選択して、自動的にダイヤ変更を実施する。システムは当該運転支障を解消して、ダイヤ変更後のダイヤを再予測する。一方、各ステップを独立に起動するモードにおいては、処理時刻の早い順にダイヤ変更案を運転指令員に順に提示する。運転指令員はいずれかのダイヤ変更案を選択するか、まったく新たなダイヤ変更案を作成することにより、運転支障を解消する。システムは、実施されたダイヤ変更に従ってダイヤ変更後のダイヤを再予測する。本システムはこのようなダイヤシミュレーションと運転支障の解消をすべての運転支障がなくなるまで繰り返すか、一定時間先までのダイヤを決定するまで繰り返すことにより運転整理を実現する。本システムでは、運転指令員は手動によるダイヤ変更とシステム側の自律的な運転整理機能を併用することができるため、システムと運転指令員が協調的に運転整理業務を実施することができる。

紹介したマンマシン協調型運転整理モデルに基づいた運転整理システムは、GUI環境が整備されるとともに特定の鉄道会社向けのカスタマイズが行われることにより、実際の運転整理システムの開発に活用されている。

構内作業計画システム

鉄道システムの構内作業計画とは、車両基地において、検査・点検・清掃といった各種メンテナンス作業を実施するための、車両編成の移動と留置に関する計画である。考慮しなければならない制約条件の種類が多様多様であり、状況によっては他部門と協調して制約条件を調整する必要があるなど、定式化が非常に難しい問題である。このため、先に述べた運転整理システムなどに比べても自動化への取り組みが遅れている。さまざまな種類の制約条件を扱いつつ性能を向上させるためには、計画作成担当者の考え方を参考にすることが必要である。生産スケジューリング同様、本システムにおいても、熟練者のノウハウを計画の自動化に取り込む手段として人工知能技術は有力な手段となり得る。人工知能技術の適用例としては、制約プログラミングによる研究事例⁴⁾や、駅構内の入換計画作成にメタヒューリスティクスを活用し



た研究事例⁶⁾などが知られている。これらの方法に対し、筆者らは、計画作成担当者の考える典型的な作業の流れをノウハウとして迅速に取り入れることを最重要視し、汎用性と大規模な問題への対応能力を両立することを旨とした構内作業計画システムを検討している。

構内作業計画は、生産スケジューリングとの類似点が多く、特に、複数のプロジェクト間で限られた資源を競合する条件の下でスケジュールを作成するタイプの問題との共通項が多い。このため、本システムでは、プロジェクト管理分野で実績があるPERT (Program Evaluation and Review Technique) を知識表現手段として利用している。各車両編成が車両基地に到着してからメンテナンス作業を済ませて発車するまでを、知識表現の単位と見なす。そして、各車両編成の移動・留置や点検の開始・終了時点を示すノードを実行順に連結することで、各車両編成の典型的な作業工程の流れを表現し、要求される時間的な制約条件を埋め込む。なお、時間的な制約条件を表現しやすくするため、PERTに独自の改良を加えて、最大時隔や固定時隔をも扱うことを可能にした。図-3に、PERT形式で表現した作業工程の例を示す。このような基本的な作業の流れを、各車両編成のタイプと関連付けて事前に登録しておき、スケジューリングの際には、線路や車庫、検査設備、運転員・作業員などを、業務を実施するために必要な資源と見なして、資源を競合する各作業工程を互いに適切な順序で並べ連結しながら、全体を1つの作業計画として統合する。

生産スケジューリングでは、各プロジェクトの工程の流れはあらかじめ決まっておき、各工程で利用可能な資源もおおむね指定されていることが多い。これに対して、構内作業計画では、10種類以上もの作業工程の流れの候補がある中から選択が可能であり、さらに各工程で利用可能な資源も数種類の選択が可能である。このよ

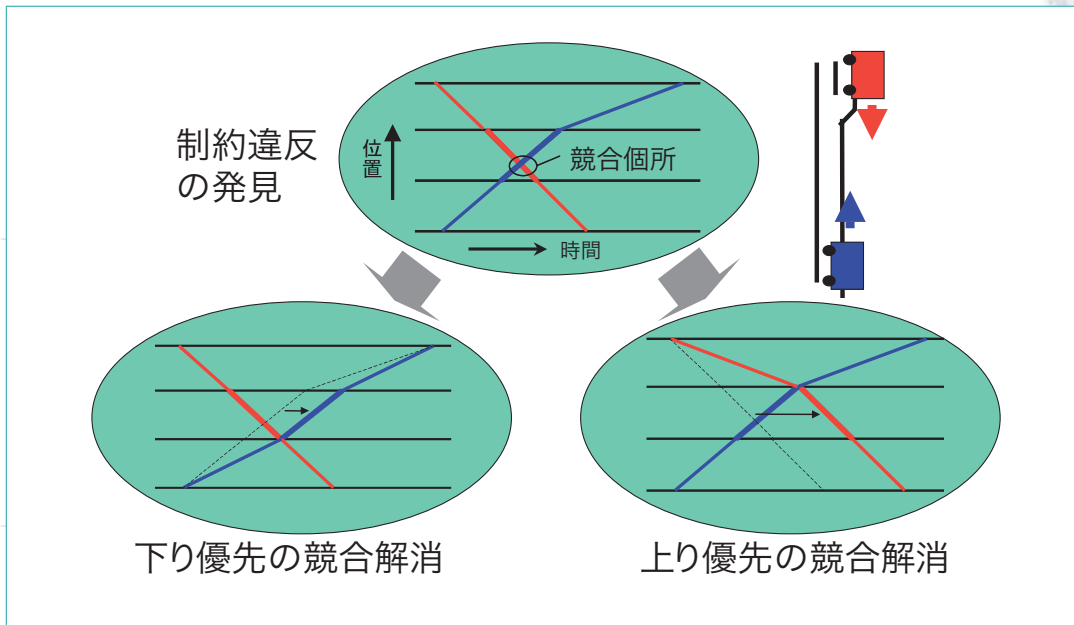


図-4 競合解消適用手順の探索

うな前提は、一見、自由度が大きくなりスケジューリングが容易になるように見えるが、すべての時間制約を満足する組合せはごく一部であり、逆に山積み/山崩し法といった単純なヒューリスティクスの適用を困難にしている。このため、本システムでは、探索を2段階に分けることなどで効率化を図っている。まず、ボトルネックとなる資源の利用状況がなるべく均等になるよう、それぞれの車両編成で使う作業工程の候補の組合せを大まかに決定する。その後、PERT演算によりすべての時間的制約を守ることを確認しながら、スケジュールに各編成の作業工程を逐次的に追加合成了り入れ替えたりすることを、すべての編成の追加に成功するまで反復する。現在、本方式のプロトタイプを実装し、車両基地の実際のダイヤデータをサンプルとして、提案方式の有効性を検証している。今後は、当日の計画の乱れをリアルタイムに反映することを目指し、さらに研究開発を進める予定である。

運行管理システム

人工知能分野から発展したプランニング技術やスケジューリング技術は、対象のモデルが動的に変化することに対応し難いことが、産業応用を妨げる1つの要因となってきた。実環境においては、インタラクティブに情報を得ながらモデルの精度を高める必要があることに加え、対象自体の特性が事前に予測不可能なほど変化することが多い。このため、これらリアルタイム性の問題を解決する方法として、即応的なルールに基づき判断することを反復するリアクティブプランニングや、局所的なプランニングと実行を交互に実行するインターリー

ブプランニングといった試みがなされてきた。本章では、その1例として、デュアルモード交通システムのための運行管理システム¹⁾を紹介する。

デュアルモード交通システムとは、一般道ではバスとして運転手が走行を行い、専用軌道上の走行では、自動走行を行うという、2種類の走行形態を有する交通システムである。一般道ではきめ細かい面的な交通サービスを提供でき、専用軌道上では信号機や渋滞などによって走行を妨げられることなく高速性、定時性を確保することができる。最近実現された例としては、愛・地球博の会場内輸送システムとして活躍したIMTS (Intelligent Multimode Transit System) が知られている。デュアルモード交通システムは、一般道走行時に渋滞などの予測不可能な現象の影響を頻繁に受けるため、専用軌道上においても鉄道のような固定ダイヤによる運行管理はできない。このため、筆者らは、走行中に状況に合わせてリアルタイムで走行ダイヤを変更する運行管理システムを検討した。本システムでは、現在のダイヤ路線の競合個所を発見し、最も時間的に早く発生する競合から順次発見、解消することを、競合が完全になくなるか制限時間に達するまで反復する。このとき、1つの競合解消の手続きには何通りもあり、さらに適用された競合解消手続きが次の競合発生に影響するため、それぞれの競合についてどの競合解消手続きを適用するかをプランニングにより求める。図-4に、反対方向に進む車両が単路に同時進入している場合を例として示す。本例では、上り方向に進行する車両が時間調整する場合と、下り方向の車両が時間調整する場合の、2通りの競合解消方法が選択可能である。また、インターリーブプランニングの考え方に基づき、プランニングに演算制限

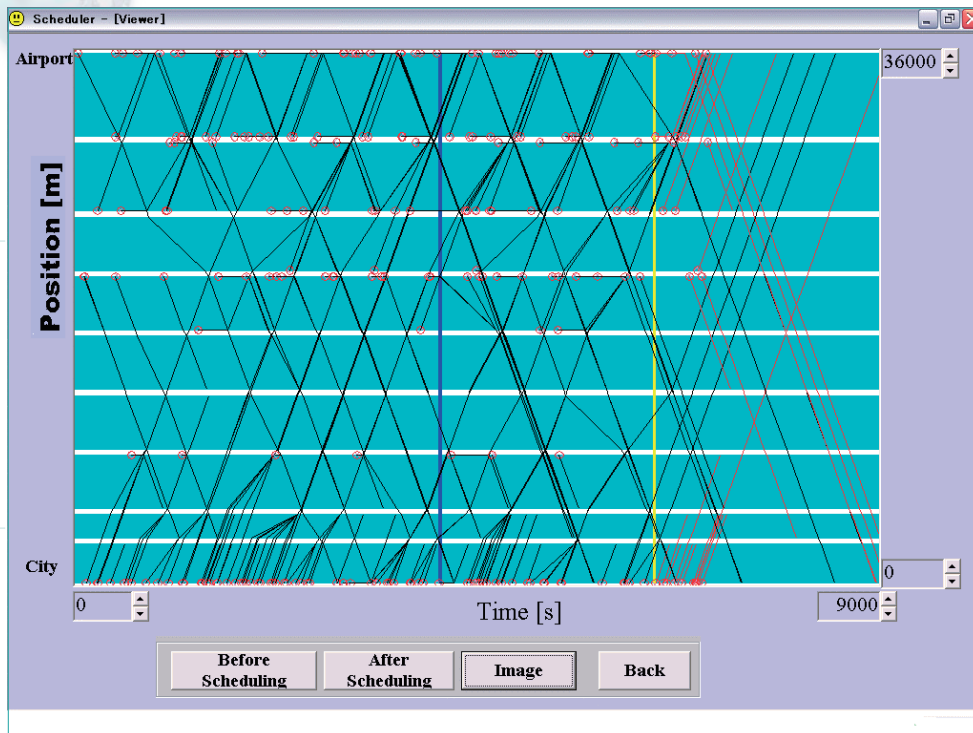


図-5 ダイヤの例

時間を設け、走行ダイヤの時間的に早く利用される手前の部分から優先的に生成し、演算制限時間がきたらダイヤに従って走行することを繰り返している。本システムでは、プランニング問題として扱いやすくなるよう、時間的に手前のダイヤになるべく影響が伝播しない競合解消手続きを用いるなどの工夫が行われている。

プランニングの探索手法としては、人工知能分野における代表的な探索手法の1つであるA探索手法を利用した。A探索手法は、暫定解のコストと、暫定解の未完成な部分のコスト推定値に基づき、さらに探索すべき暫定解の優先度を定める。このため、暫定解のコストの推定値がある程度妥当であれば、探索の途中段階で打ち切っても暫定解の質がある程度保証され、実行解として利用しやすい利点があり、リアルタイムでのプランニングに適している。図-5に、本システムによって作成されたダイヤの1例を示す。本例は単線を中心とした路線であるが、プランニングによる先読みを行うことで、局所的なルールにより優先順序を場当たりに決定するのに比べ、効率的な運行を実現している。

今後は、車両の動特性や保安系までを考慮した精密な走行シミュレータを利用して、実適用の可能性を検討する予定である。

おわりに

本稿では、産業界における人工知能技術の応用例として、人工知能技術を利用した製造、サービス分野にお

ける応用システムを紹介した。人工知能技術は、計算機パワーの問題や計算機に与えるデータや知識の問題などにより、実世界における活用が難しい時期が続いていた。しかしながら、近年の計算機パワーの飛躍的な向上や、Web環境の発展に伴うデータや知識の収集障害の低下といった要因により、従来の問題を打破する光明が見えてきている。また、近年注目を集めているベイジアンネットワークやSupport Vector Machineなどをはじめとする着実な研究成果の積み上げにより、問題解決能力そのものの底上げが図られてきている。このため、製造、サービス分野に限らず、多くの分野において人工知能技術を基盤としたシステムが今後開発され、人工知能技術がより身近なものになると考えられる。

参考文献

- 1) 愛須英之、鳥居健太郎、田中俊明、大場義和、中沢新一郎：デュアルモード交通システムのためのリアルタイム運行スケジューリング、情処研報、Vol.99, No.ITS-4, pp.17-23 (2000).
- 2) 荒木 大、成松克己、三條水奈子、小島昌一：スケジューリング問題向けタスク特化シェルにおける専門家モデルの表現、人工知能学会全国大会予稿集、pp.365-368 (1993).
- 3) 荒木 大、櫻井茂明、小川真一郎、篠原正憲：マンマシン協調モデルに基づく運転整理エキスパートシステム、電気学会論文誌C、Vol.115, No.5, pp.672-680 (1995).
- 4) 佐藤達広、角本喜紀、奥田和章：鉄道車両基地における構内入換計画スケジューリング方式の開発、電気学会産業応用部門大会予稿集、pp.92-94 (2005).
- 5) 末田直道、櫻井茂明、島田 毅、當田遂充、渡辺貞一：事例ベース推論を用いた画像処理プログラム自動合成システム、電気学会論文誌C、Vol.121, No.4, pp.742-747 (2001).
- 6) 富井規雄、福村直登、坂口 隆、平井 力：鉄道のスケジューリングアルゴリズム、エヌ・ティ・エス (2005).

(平成 18 年 6 月 5 日受付)