

列車運転小乱れ時の旅客流動解析に基づく旅客損失の計算と 運転整理案の評価・提示

Automatic generation and quality evaluation of train reschedules based on calculation of passenger loss time at a small irregularity of train operation

古関隆章
東京大学大学院情報理工学系研究科

Takafumi Koseki
School of Information Science and Technology
The University of Tokyo
takafumikoseki@ieee.org

原 和弘 熊沢 一将
東京大学大学院工学系研究科

Kazuhiro Hara & Kazumasa Kumazawa
School of Engineering
The University of Tokyo
hara/kumazawa@koseki.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract This paper introduces an idea to evaluate the goodness of a train reschedule from passengers' point view. Concretely, passengers' flow is estimated based on a graph theory, and total passengers' loss time is calculated as summation of waiting time, boarding time and transfer as well as congestion penalties. This method for proposing a train rescheduled plan has an advantage of a straightforward criteria for evaluating goodness of a train schedule, but it needs much more computing time than the conventional train-based rescheduling method. The advantage and disadvantage are discussed in detail.

1. はじめに

鉄道は百年以上の安定した輸送の実績を持ち、安全で高速性と環境適合性に優れた大量輸送に向く公共交通手段として、日本特に大都市圏において重要な役割を果たしている。一方、乗換えが不便であり、一度事故がおきて運転が乱れると、その影響が大きい点は本質の問題で、いかに運転の乱れを防ぐか、何らかの運転の支障があった際にその影響を小さく抑えるような再スケジュールリングを行うか、は非常に重要な技術的課題である。この運転の乱れを戻す一連の業務は運転整理と呼ばれている。

現代では、基本的な運転曲線の計算や、指示の伝達などは電子化、電算機による自動化が進んでいる。一方、運転整理手法の選択や重要な判断は人間が行っている。そこで、ここでは電算機による指令員の指令業務を支援することを模索する。そのための基礎として、運転整理の客観的な評価指標を導入することを考えてみよう。

2. 運転整理の典型的な手法と問題点

鉄道システムでは、その歴史の初期から伝統的に様々な分野における電子通信技術の応用が進められ、従来複雑で自動化が難しいといわれてきた運転に関わる電算機応用、システム化も

最近では行われている。しかし、運転整理業務は、運転を支障する原因が多様であるのに加え、路線や場所固有の事情も多岐にわたり、列車運行のみならず車両や従業員の運用なども考慮する必要があるため、機械による判断、完全な自動化は不可能であると考えられている。したがって、前節で述べた客観的な評価指標がうまく定義され、その指標を基準とした最適化手法が確立されたとしても、それに基づくブラックボックスとしての運転整理案全自動生成システムは有用でない。ある運転整理案に対して、評価指標を随時計算し、そのときに各列車や駅で起こりうる問題点を迅速に表示し、指令員の判断を仰ぎながら、整理案の選択や、マニュアル操作による整理案微修正と、それに伴う状況・評価指標の再計算・表示を高速に行い、指令員の運転指令業務を支援する、そして、必要な記録をログとして自動的に残せる、システムの実現が望まれている。

伝統的には、将棋や碁における定石のように、人間にとって分かりやすい手法の分類が各事業者ごとに行われており、実務においてはそれらを適切なタイミングでどのような順序で組み合わせるかがプロの大局的な判断に基づき行われていると聞く。この運転整理手法¹⁾の主要例を以下に説明する。

(1) 運転抑止 事故列車の周囲の列車を駅などで停止させ、事故発生個所への他の列車の進入を防ぎ併発事故を防止する。事故によって立ち往生した列車の後続列車を手前の駅で停車させ、後続列車が事故列車に続いて駅間で停止してしまうことを防ぐ効果もある。

(2) 時隔調整 都市部の通勤時間帯では時隔が数分の高頻度運転が行なわれている。このような線区の多くの乗客は、事前に時刻表を調べ乗車する列車を決めることはせずに、自分が駅に到着してから最初に来た列車に乗車する。このような状況下では、列車の定時制を保つよりも列車の頻度を保つの方が乗客にとって利益が大きい。各列車の乗客数のバランスを保つには列車の運転間隔をなるべく等しくすることが重要となる。列車に遅延が発生したときに列車の等間隔性を保つため、遅延列車の前を走行している列車を意図的に遅らせることを時隔調整と呼ぶ。

(3) 順序変更 各駅間を走行する列車の順序は運転計画で綿密に決められている。しかし列車運行に遅延が発生した場合に、あらかじめ決められた順序に従って列車を運行すると、遅延列車の後続列車にも遅延が波及する。これを防ぐため、本来の後続列車を遅延列車よりも先に運転するように列車の順序を変更することを順序変更と呼ぶ。

(4) 着発線変更 各列車が各駅において使用する着発線は運転計画で定められている。しかし前項で述べた順序変更が実行される際には、一般に、列車の待避を行なう駅が変更されるため、本来待避するはずであった駅や、新たに待避を行なうことになった駅において、着発線の変更が行なわれる。また列車が遅延した場合に、遅延列車と同じ着発線とその列車の後に使用する列車へ遅延が伝播するのを防ぐために、どちらかの列車の着発線が変更されることもある。

(5) 運転線路変更 単線や複線の線区ではある駅から隣接駅まで列車を運転する際に駅間で列車が走行する線路は1本しか存在しないが、複々線や単線並列の線区では隣接駅までの線路が複数存在する。このような場合、各列車が走行すべき線路はあらかじめ定められている。しかし、事故により本来走行すべき線路が不通になって

しまったときや、運行の乱れにより多数の列車が1本の線路に集中してしまう場合は、駅間で列車が走行する線路の変更を行なう。これを運転線路変更と呼ぶ。

(6) 運用変更 列車の運転時刻や運転時刻、使用する線路などは列車ダイヤによって定められている。これに対し、各列車がどの車両を使用して運転され、またある列車に使用された車両が次にどの列車に使用されるかなどを定めたものを車両運用ダイヤと呼ぶ。鉄道車両は、列車の終着駅で折り返し新しい列車として運転されるなど、連続して複数の列車に使用されることが多い。この場合、列車が遅延するとその列車に使用されている車両を次に使用する列車にも遅延が波及してしまう。これを防止するために、列車に充当する車両の変更が行なわれる。これを運用変更と呼ぶ。

(7) 運転休止 列車の運転休止はその列車の乗客に迷惑をかけることになる。しかし、昼間の乗客需要の少ない時間帯にダイヤが乱れた場合は、多少の列車を運転休止しても十分な輸送力が確保できることが多い。このような場合、混乱を早期に收拾して夕方のラッシュ時間帯までにダイヤを復帰することの方が重要であるため、運転休止が行なわれる。たとえば、車両基地の併設されている駅において、遅延列車の運転を打ち切る。その代わりに車両基地にある車両を使用して、遅延列車の計画ダイヤどおりにその駅から先に別の列車を運転させる。これは運転休止の中でも特に「取り込み・特発」と呼ばれる手法で、これを行った駅から先の列車運行には遅延の影響が及ぶ事を防ぐことができる。

実際の運転整理は混乱した状況、十分な情報が得られず部分的な情報と新たな状況変化が時々々々与えられる中で、局所的な様々な制約条件と関係するかなり広い範囲の鉄道ネットワークにおける影響の数時間先までの伝達を考慮しながら、しかも、非常に短い時間で判断し、関係する運転士や駅職員に具体的指示を出すという、難しい業務である。計算機で運転整理案を自動生成する場合、人にとってわかりやすい上記分類が、計算機アルゴリズム上の具体的処理の分類と一致するとはいえず、上記手法を基本に実装することは効率的ではなく、より直接的な最適化手法を考えるべきであるという考え方もあ

る。しかし、ここではシステムの目標として、指令員との対話型支援システムを目指すので、実務における論理的分かりやすさを優先する必要がある。したがって、運転整理案最適化においては、上記の手法の適用箇所、適用順序を様々に変えながら、列車運転上の制約を守れる解のみを残し、さらに、後述の評価指標が最も小さくなるものを選択する、という考え方をとっている。図1にこのような運転整理案生成の基本的考え方を示す。

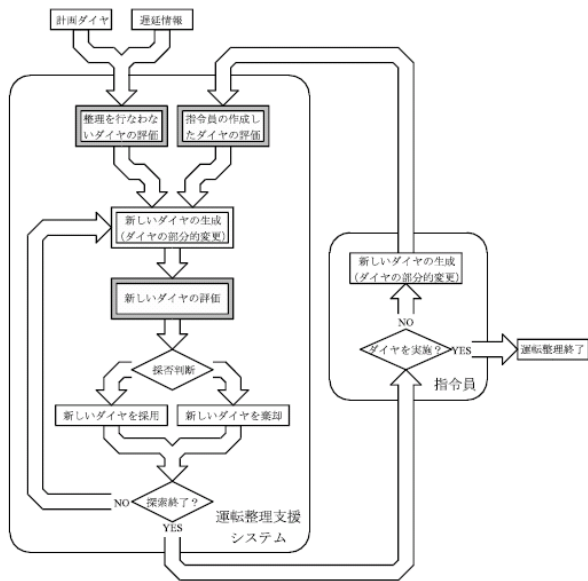


図1 運転整理支援システム全体の流れ

また、このようにして作成された整理案が、結果的に良いものであったのかどうか後で評価することも実務上大切とのことだが、何が良いかを判別するための客観的評価指標が確立しているわけではない。この評価指標が定義され簡単に算出できるだけでも、研究の意義は大きいとされている。

伝統的によく用いられる考え方は、正常な運転計画にいかにか早く復帰させるかを見るという考え方で、列車の遅延時間の総計を評価指標とすることであろう。これは、基本的に筋と呼ばれる列車の動きの記録から算出できるので、考え方が単純で計算量も小さくてすむ。基本的に事業者側のリソース活用の円滑さと損失の総量を計算するという、鉄道会社の観点から見た評価量であるといえる。一方、鉄道事業が旅客に対する高速な輸送サービスを円滑かつ安定して供給するという基本に立ち返って考えるならば、運転整理の良し悪しも乗客の立場から見た評価

がなされるべきである。これは以下に見るとおり技術的困難を伴う作業を要する考え方であり、実務に近い立場からはその考え方自体に賛否が分かれるところだが、以下では、大学を中心とした研究として過去数年進めてきた旅客の立場から見た乗客損失の評価方法²⁾について説明する。

3. 乗客の立場から見た運転整理案の評価

上記の旅客の立場から見た列車運行の評価のためには、各列車の各区間ごとの乗客数を推定し、乗客の「損失」を合計するという考え方を採る。ここで、旅客の損失とは、理想的な専用のお召し列車、すなわち、ある乗客にとって、「待ち時間がゼロで乗車でき、目的駅に乗り換えなしで移動時間ゼロで直行し、車内の混雑もない」仮想の列車に対して、実際の列車運行がどれだけ差があるのか、を計算することにする。また、乗客の行動仮定として、主として列車運行頻度の高い都市における都市圏内における移動を想定し、乗客は出発駅に任意の時刻に現れ、出発駅における乗客の発生が時間軸方向に一様分布しているとし、個々の乗客は最も合理的な行動をとる、すなわち、これから議論する「損失」を最小化する選択行動をとるとする。

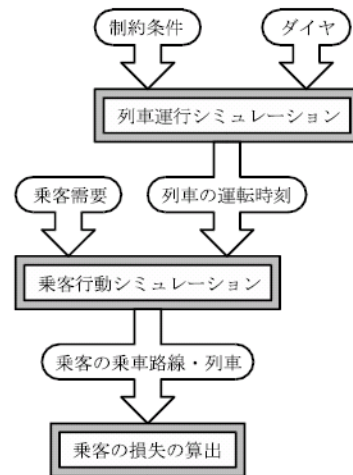


図2 乗客損失算出の流れ

ここでは、乗客が受ける損失として以下の3項目を考える。

1. 所要時間
2. 乗り換え
3. 列車の混雑

これらは基本的に次元の異なる量であるため、「乗り換え」と「列車の混雑」による損失は時間の次元に変換して取り扱う。例えば、〇〇駅の□番線から△番線への乗り換えは、ペナルティとして百秒に相当する損失、などとする。先の理想のお召し列車との差分を議論するので、列車が正常に運行されている状態であっても、所要時間、乗り換え、列車の混雑は発生し、評価量はゼロにならない。以下に、これらの損失についての詳細を述べる。

(1) 所要時間による損失 出発駅から目的駅までの所要時間は乗客にとっての主要な関心事であると考えられる。ここでは、この、出発駅における待ち時間と実際の乗車時間の和を所要時間による損失として扱う。

(2) 乗り換えによる損失 列車の乗り換えは、ホームの移動や階段の昇り降りなどを伴い、それに要する時間以上に乗客にとって苦痛となる。そこで、所要時間を損失として評価する他に乗り換え自体も損失として取り扱う。乗り換えによる損失は移動距離や階段の有無などにより異なると考えられるので、本システムでは、1回の乗り換えにより発生する損失は乗り換え元ホームと乗り換え先ホームの組ごとに設定される。

(3) 列車の混雑 列車の混雑は、乗客のストレスや疲労の原因となる。そのため、これを損失として評価する。混雑の評価は、混雑時に乗客が感じる単位時間あたりの不効用を時間に換算し混雑するほどペナルティを大きくする非線形関数を用いる。

これらを合計し、乗客損失は、所要時間+乗り換え損失+混雑ペナルティとして算出する。本節の旅客の立場から見た列車運行の評価のためには、各列車の各区分ごとの乗客数を推定し、乗客の「損失」を合計するという考え方を採る。既述のとおり、個々の乗客は最も合理的な行動をとる、すなわち、ここで議論している「損失」を最小化する選択行動をとるとする。したがって、本章で論じる評価量である損失は、乗客流の推定の際と、全体的な評価量算出の際に、基本的に2回使用される。図2に、図1の流れの中で乗客流推定と評価量をどのように算出するかを示す。

4. 乗客流の解析—ダイクストラ法の適用とその長所

上記の評価値を計算するため、乗客流推定を行う必要があるが、そのために、前述の通り個々の乗客の取り得る行動に対してこの損失を計算し、乗客が最も合理的な判断として損失を最小にする経路を選択するという論理を前提としている。この乗客流推定の際には、しかしながら、前節で説明した損失量をそのまま用いることは困難である。なぜなら、混雑ペナルティは論理的に、すべての乗客行動が決定した後でしか算出できないからである。そこで、本研究では論理を不必要に複雑化することを回避するため、各乗客の意思決定を推定する際の評価量としては、所要時間及び乗り換えの損失のみを算出し、それを最小化する経路選択を行うという仮定をおいている。

この乗客流推定を行うために、当初は小さな問題について手計算で具体的アルゴリズムを考え、全数検索に近い方法論をとったが、1回の乗客流推定のための計算量が大きすぎて、運転整理の実務的要求に応えられる評価システムとすることは困難と思われた。その後、ダイクストラ法に基づく最短経路探索問題として経路探索の本質的高速化を行うことで、運転整理案探索の下位のアルゴリズムとして、乗客流推定と評価量算出を実用的な計算時間で行うことが可能となった。

ダイクストラ法は、グラフ理論の一種であるここでは、図3に示すように、各駅における列車の到着、出発をノードとし、列車の運行及び乗り換えをリンクとして表現する。そして、所要時間、乗り換え損失、混雑損失をこのリンクに対する重みとして与え、最短経路探索を行う。そのため、各区分各列車における乗客数や乗り換え人数もリンクに与える数値として表現ができる。

このことにより、乗客流推定の結果、どの駅で2つの列車間にどれだけの乗り換えが発生しているか、どの区間のどの列車で混雑が発生しており、各々の列車/区間でどれだけの乗客がいるかということグラフ上で表現できる。すなわち、ここでは、グラフ理論の応用で、乗客流推定のための経路探索が効率化されるのみならず、対話型運転整理業務支援システムとしての分かりやすさを考え、状態をリアルタイムで容易に可視化するという機能を持たせるために

も、その長所を生かすことができる^[2]。

アルゴリズムのさらなる高速化を考えたときには、乗り換えリンクの削減が鍵になる。そこで、列車運行の周期性を仮定した上で、図3のリンクの絞込みを行っている。

このように高速化を施しても、乗客流推定とそれに基づく乗客損失の積み上げは負荷の大きい計算である。そこで、時隔調整量の最適化や順序変更の判断などの細かな整理案変更検討のたびに、この大きな計算を行うことは賢明ではない。最終的評価は乗客流損失を用いて行う思想を残しながら、不必要な場合には乗客流推定を行わずに済ます方法論の検討も重要である^[3]。

5. 因果律の考慮——運転計画と運転整理における乗客流解析の相違

前節で述べたとおり、ここまでの検討は基本的に列車運行の周期性を仮定し乗客流の推定を行ってきた。これは、基本的に計画の通り列車運行がなされている際に、乗客が最も合理的な行動をとった際の流れを推定することを意味する。しかし、この考え方を、運転整理の問題にそのまま持ち込んでしまうと、本質的矛盾を生じる。実際には、当初の正常運転時に正常な計画に基づく最も合理的な経路選択をしていた乗客が、事故や運転支障に遭遇し、状況の変化が

あり、その後の再スケジュールが示された後に、改めてその時点／場所からあらためて合理的な経路探索を行うことになる。しかし、これまで説明したアルゴリズムではこの因果律が考慮されておらず、文献[2]で詳述した初期のプログラムでは、事故前から事故の発生とその後の列車運行の変更をあたかも予見していたかのような奇妙な乗客行動が算出されることが見られた。この問題を解決するには、事故発生、事故原因の判明、それに基づく再スケジュールリング案の提示、変更後の列車運行情報の伝達という複数のイベントを時間軸に沿ってトレースし、各時点の状況を初期値として乗客流推定をやり直すことが必要となる。その実装は現時点で完全にはできていないが、その基礎となる具体的検討を本シンポジウムへの投稿論文^[4]で原が詳しく論じている。

6. 運転整理案の最適化へのアプローチ——永遠の課題？

本稿では詳述しないが、上記の乗客流推定と並行し、列車運行そのものの計算をし、基準運転時分、最小停車時間、列車順序、着発線を使用できる列車数、駅間の線路を走行できる列車数の制約、車両運用の条件、駅構内の線路配置に起因する時隔の条件、などの列車運行上の制

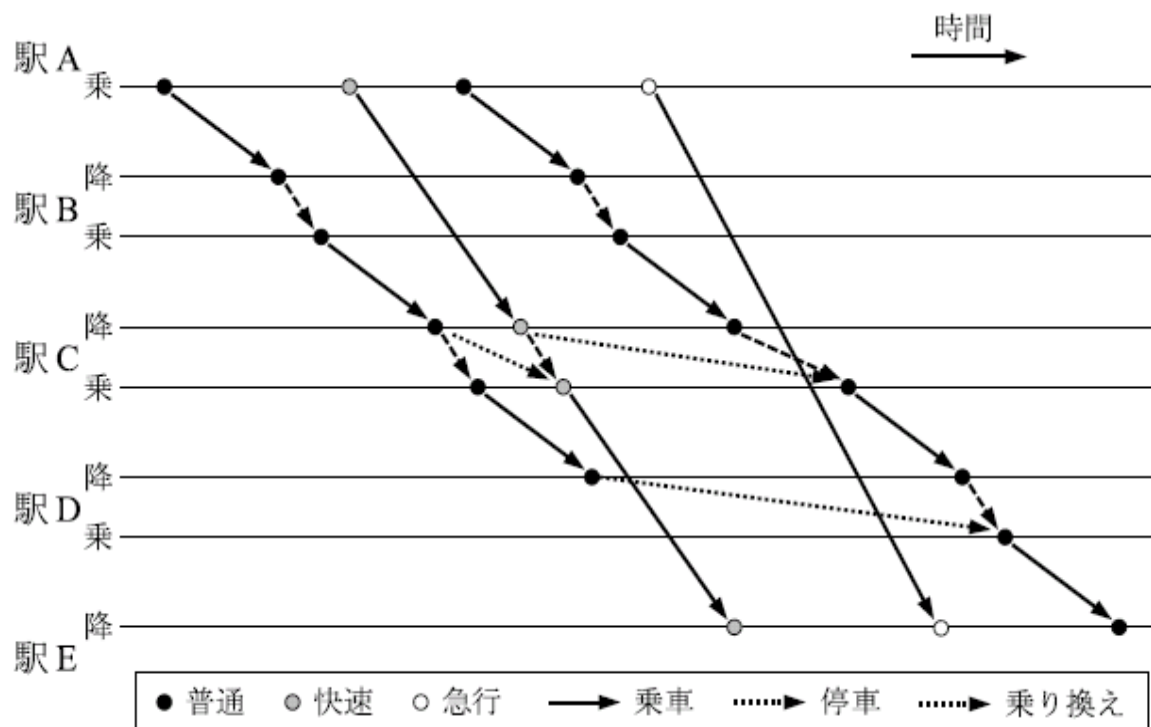


図3 乗客流解析に用いる乗客行動グラフ

約がきちんと満たされていることを、自動判別する必要がある。このため、本研究では、前記の乗客行動グラフとともに、同じく各列車の各駅での到着／出発をノードとして、前述の列車運転上の各種制約を有向ノードの重みとして与え、Program Evaluation and Review Technique (PERT) に基づく最長経路探索を用いて列車の運行のシミュレーションを行ない、各駅における実現可能な着発時刻の決定を行っている¹⁾。

本稿では、運転整理の場面で列車運行スケジュール案が与えられた際の、乗客から見た評価の考え方や乗客流および評価量としての損失計算手法を中心に記述してきたが、これらの上位アルゴリズムである、運転整理案の変更・最適化の方法は、十分に検討されていない。すでに、小さな運行支障に起因する小さな乱れ時に、2節で紹介した基本的手法を指令員が事故発生点に近いところから、順次適応していく直線的なアルゴリズムをまねた論理で、比較的良い結果が得られることは確認されている。しかし、本来は文献[1]に解説されているように、運転整理は複雑な組み合わせ最適化問題であり、今後の関係者の精力的な継続研究が望まれる。この関係の研究は、本シンポジウムで発表されている、千葉工大、工学院大などの大学、鉄道総合技術研究所、事業者、関係メーカーで行われていることに加え、海外では、チューリッヒ工科大学とスイス連邦鉄道との共同研究として効率的な列車運行への精力的取り組み²⁾がなされている。そのような検討を経て作られる運転整理業務支援システムには、真の最適解が理論的に必ずしも得られなくて良いので、実用可能な計算量の範囲で、指令員が納得しながら実務的に複数の「良さそうな」案を選択でき、その結果生じる乗客流と評価量予測値をリアルタイムに可視化できる機能が望まれる。

7. おわりに：今後の取り組み

現在指令員が行なっている運転整理には数多くのパターンが存在するが、運転整理支援システムに関するこれまでの研究では、その中のごく一部の手法が計算機上で実装されているだけである。実用的なシステムを構築する際には現段階では未実装の多くの運転整理手法をシステム内に取り入れる必要がある。また6節の最後に言及したとおり、様々な整理手法をどのよう

に組み合わせるかという論理も重要な課題である。今後はこの方面の研究をさらに進めることが必要である。

本稿で述べた検討においては、すべての計算が、事前に静的に与えられている輸送需要のデータに基づいており、運転整理支援システムは計算機中の世界で完結していた。しかし、実際にシステムを運用する際には、支援システムの計算と同時に現実世界の列車や乗客も動きつけており、乗客流推定と現実世界間の動的な連携が重要となる。すなわち、実在の列車や乗客情報を現代制御理論における状態観測器のように推定結果にリアルタイムに反映することができれば、より現実的に実用性の高い支援システムができる。例えば、乗客流の情報は駅の自動改札機や車両の重量計から得ることができる。これらの機器から情報を収集し運転整理支援システムに適切に提供する情報システムの実務レベルでの開発も重要であろう。

参考文献

- [1] 鉄道総合技術研究所運転システム研究室編：「鉄道のスケジューリングアルゴリズム—コンピュータで運行計画をつくる」出版社 エヌ・ティー・エス 2006年02月
- [2] 長崎祐作, 高野求, 古関隆章: “グラフ理論に基づく乗客経路決定機能を持つ運転整理評価・支援システム”, 電気学会システム・制御研究会, SC-04-11, pp.25-29, Mar.2004
- [3] 原 和弘, 熊沢 一将, 古関 隆章: "乗客流解析に基づく運転整理支援システムにおける整理案の効率的評価・最適化法," 電気学会産業応用部門全国大会, 3-29 (6 pages), 2007
- [4] 原 和弘, 熊沢 一将, 古関 隆章: "運転整理計算機支援のための列車運転乱れ時の因果律を考慮した旅客流動推定法," スケジューリング学会スケジューリングシンポジウム (to be published in 6 pages), 2007
- [5] Laube, F., S. Roos, R. Wuest, M. Luethi und U. Weidmann (2007) PULS 90 -- Ein systemumfassender Ansatz zur Leistungssteigerung von Eisenbahnnetzen, Eisenbahntechnische Rundschau, 56 (3) pp. 104 - 107