

都市圏鉄道における遅延の原因検出アルゴリズム

稲川 真範 菅野 涼太 ○[電]富井 規雄 (千葉工業大学)

Identification of Primary Causes of Delays in Urban Railways

Masanori INAGAWA, Ryota KANNNO, ○Norio TOMII (Chiba Institute of Technology)

In urban railway lines, it is usually observed that once a small delay happens, it is widely propagated to other trains. There is a compelling need to identify small delays that very often happen and influence widely and to take an effective countermeasure to decrease those delays by adjusting timetables for example. In this paper, we introduce an algorithm to identify delays that very often happen and influence widely from daily train traffic record data. The key idea of the algorithm is to seek for the causes of delays by tracking a critical path on a PERT network constructed from train traffic record data. We show the details of the algorithm together with our experience of its application to real world data.

キーワード：遅延，都市圏鉄道，PERT，列車運行実績

Keywords：Delay, Urban railways, PERT, Train Traffic Records

1 はじめに

近年，都市圏のラッシュ時において，小規模の遅延が慢性的に発生することに対して注目が集まっている。実際，国土交通省の調査[1]によると，三大都市圏において平成 19 年度には，支障時間が 10 分未満の輸送トラブルが，2000 件近く発生していること，および，全輸送トラブルの 60% 以上を占めていることが報告されている。また，10 分未満のトラブルの原因としては，急病人の救護，踏切支障，線路内への人の立ち入り，混雑などであることも示されている。

都市圏のラッシュ時間帯においては，多数の列車が稠密に運転されており，いったん発生した遅延は，後続の列車や直通先の線区の列車に伝播し，結果として広範囲のダイヤ乱れを引き起こすことがある。ここで，最初に発生した遅延を初期遅延 (primary delay) と言い，それによって引き起こされた遅延を二次遅延 (secondary delay) と呼ぶ。また，二次遅延のうちでも，先行列車の影響を受けて後続列車に発生した遅延を knock on delay と言う。

広範囲に遅延が及ぶことを防止する対策としては，一次遅延の発生を防止する対策，二次遅延の発生を防止する対策の 2 つがありうる。

二次遅延の発生を防止するためには，列車間隔，列車の運転時分，列車の停車時分等に余裕を持たせることが考えられる。ただし，余裕のつけすぎは，利用者にとって利便性の低下をまねくことや，必要な編成や乗務員の数が増加してコスト増となることがあるため，安易に余裕をつけることは避けるべきである。

また，停車時分等に関して列車ダイヤを精密に調整することによって二次遅延の発生を劇的に減少させた例が報告されており[2]，今後は，この手法の一般化が期待される[3]。

一方，一次遅延については，その性格上，その発生を皆無にすることは困難であると考えられる。しかし，一次遅延のうちでも，停車時分の不足，直通列車の慢性的な遅延などによって発生しているものについては，ダイヤの調整，列車の停止位置の変更，駅要員の増強，直通元線区・会社のダイヤの調整等によって，その発生を軽減できる可能性がある。しかし，一次遅延全般に対して対策を行なうのは困難であることから，効果的な対策を実施するためには，一次遅延のうちでも，頻繁に発生し，かつ，広範囲に影響を与えているものを選別し，それらに対して重点的に対策を行なうことが必要である。そのためには，「頻繁に発生し，広範囲に影響を与えている一次遅延」を検出することが望まれる。本稿では，列車の運行実績データから，このような一次遅延を見出すアルゴリズムとその適用結果について述べる。

2 遅延の原因検出—基本的考え方

2.1 遅延の原因の特定

都市圏の鉄道においては，小規模な初期遅延が徐々に拡大して大きな遅れになる現象が観測される。これは，主として，列車の間隔の拡大による乗車客数の増加による乗降時分の増加，それによって停車時分が拡大することによる後続列車の機外停止にともなう列車間隔の拡大，列車の遅延による他の列車との進路の競合（特に，折り返し列車との進路競合）などによる。

本稿では、問題となる値以上となった二次遅延に注目し（以下、「注目する二次遅延」）、それを引き起こした一次遅延（以下、「原因となっている一次遅延」）を特定するアルゴリズム（アルゴリズム 1）を導入する。アルゴリズム 1 は、ある 1 日の列車運行実績データに対して適用される。

さらに、アルゴリズム 1 を長期間の列車運行実績データに対して適用し、その期間において発生している問題となる値以上の二次遅延すべてに対して、その原因となっている一次遅延を検出する（アルゴリズム 2）。アルゴリズム 2 の結果を集計し、発生頻度の高い一次遅延を出力する。これにより、「頻繁に発生し、かつ、広範囲に影響を与えている遅延」を特定することが可能になる。

2.2 遅延の原因検出-前提とする考え方

一般に、列車が遅延した時には、次の考え方にそって列車の運行が行なわれる。

回復運転の実施：駅間の走行時分については、列車が遅延している場合、制限速度内で遅延を取り戻すような運転が行なわれる。すなわち、計画ダイヤ上の運転時分に余裕が含まれていた場合、計画ダイヤ上の運転時分を下回って運転されることがありうる。

列車の間隔、折り返し時分、停車時分についても、列車が遅延している場合には、同様に、計画ダイヤで定められている値を下回ることがありうる。

2.3 因果関係の推定についての考え方

遅延からその原因を探索するためには、因果関係の推定方法を検討する必要がある。本稿では、駅間運転時分の増大、列車間隔の拡大、停車時分の増大、折り返し時分の増大の各ケースについて、次の考え方によって因果関係を推定していく。

ケース 1：駅間運転時分が増大している場合

- (a) 当該列車自身に原因があり、駅間運転時分が増大した。この場合、それ以上さかのぼって因果関係を推定する必要はない。
- (b) 先行列車の発が遅延し、同一番線を用いる当該列車が遅延した。この場合、先行列車の発事象に向かって因果関係を推定する必要がある。

ケース 2：列車間隔（交差支障関係にある列車を含む）が拡大している場合

- (a) 当該列車自身に原因があり、列車間隔が拡大した。この場合、その方向に因果関係を推定する必要はない。
- (b) 当該列車の停車時分の増大によって、後続列車が機外停止し、列車間隔が拡大した。この場合、後続列車の着方向に向かって因果関係を推定する必要がある。

ケース 3：停車時分が増大している場合

- (a) 停車中に何らかの事象が発生し、停車時分が増大した。この場合、それ以上因果関係を推定する必要はない。
- (b) 到着が遅延したために、乗降時間が増大し、停車時分が増大した。この場合、当該列車の発から当該列車に着に向けて因果関係を推定する必要がある。

- (c) 後続列車が遅延しているために、間隔調整が行なわれ、そのために当該列車の停車時分が増大した。
- (d) 接続列車が遅延しているために、接続待ちが行なわれ、当該列車の停車時分が増大した。

ケース 4：折り返し時分が増大している場合

- (a) その列車自身に原因があり、折り返し時分が増大した。この場合、それ以上因果関係を推定する必要はない。
- (b) 先行列車が遅延したために、折り返し列車の発時刻が遅延し、折り返し時分が増大した。この場合、折り返し列車の発から先行列車の発に向けて因果関係を推定する必要がある。

2.4 遅延の原因検出アルゴリズム - 基本的考え方

本稿では、物理的な原因で遅延が伝播している状況における遅延の原因の推定を念頭においている。従って、2.3 のケース 3 の (c)、(d) については、原因探索の対象としない。

その場合、原因を探索すべき方向は、駅間運転時分、列車間隔、停車時分、折り返し時分が「増大していない」方向であること、およびそのような「方向」がない場合には、当該列車に原因があると考えられるべきことがわかる。この考え方に基づく遅延の原因検出アルゴリズム（アルゴリズム 1）の基本的手順を次に示す。

・対象とする日の列車運行実績データを列車運行実績ネットワークと呼ぶネットワークで表現する。ここで、列車運行実績ネットワークは、列車の着・発事象をノードとし、列車の駅間の走行、駅での停車、列車の到着・発車順序、交差支障等をアークとするある種の PERT ネットワーク（Program Evaluation and Review Technique）である（詳細は、[4]参照）。列車運行実績ネットワーク上で、注目する二次遅延を終点とするすべてのクリティカルパスを検出し、それらのクリティカルパスの始点ノードを、原因となっている一次遅延とする。ここでクリティカルパスとは、「余裕」のない経路を意味し、遅延の伝播経路に対応していると考えられることができる。

アルゴリズム 1 の実行イメージを図 1 に示す。

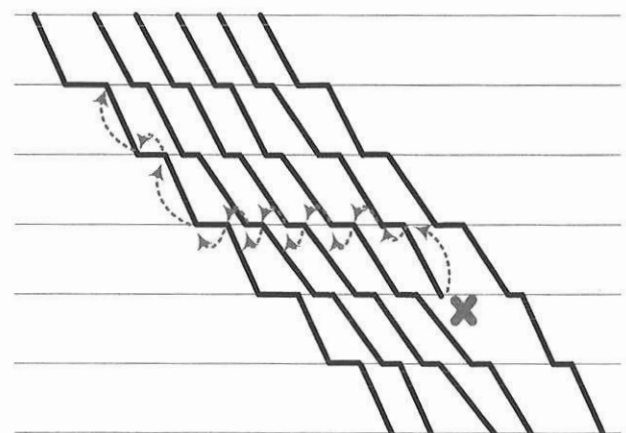


図 1：アルゴリズム 1 の実行イメージ

3 原因となっている遅延の検出アルゴリズムの考え方と課題

3.1 列車運行実績ネットワーク

列車運行実績ネットワークの詳細を以下に示す。

・**発ノード**：列車のある駅の発事象に対して1つ存在。列車番号、駅名、実績時刻を保有する。

・**着ノード**：列車のある駅の着事象に対して1つ存在。列車番号、駅名、実績時刻を保有する。

なお、通過に対しても、発ノードと着ノードを設ける。

アークには、走行アーク、停車アーク、時隔アーク、折返しアークが存在する。

・**走行アーク**：ある列車の発ノードからその列車の次の駅の着ノードにむけて存在。重みを有する（後述）。

・**停車アーク**：ある列車の着ノードからその列車の当該駅での発ノードにむけて存在。重みを有する（後述）。

・**折返しアーク**：ある列車の終着駅において、着ノードから折返し列車の発ノードに向けて存在。重みを有する（後述）。

・**時隔アーク**：ある列車の着ノードまたは発ノードから、その事象と時隔の制約（続行、追い込み、開通、交差支障）の存在するノードに向けて存在。重みを有する（後述）。

図2の列車ダイヤから構成された列車運行実績データの例を図3に示す。図2では、列車Xの駅Bでの発が遅延し、それが後続の列車に伝播する様子を示している（点線は計画ダイヤ、実線は実績）。図3のノードの中の文字列は、列車番号、駅名、着発区分、実績時刻を示す。図3の太線はクリティカルパスを示している。これについては、次節で記述する。

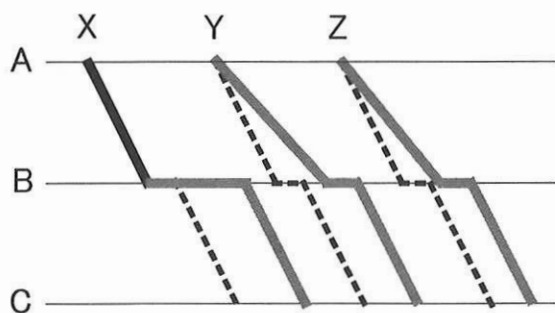


図2：遅延の伝播

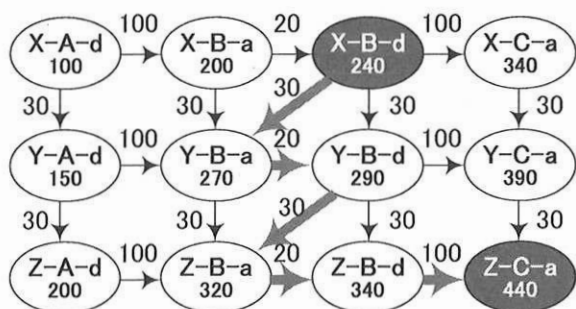


図3：クリティカルパスによる原因の探索

3.2 アークの重み

列車運行実績ネットワークにおいて、アークの重みは、その始点ノードの事象と終点ノードの事象が生起する間に最低限必要な時間を表している。従って、アークの重みは、次とするのが自然であると考えられる。

- ・走行アーク：基準運転時分
- ・停車アーク：最小停車時分
- ・折り返しアーク：最小折り返し時分
- ・時隔アーク：対応する時隔の値

3.3 クリティカルパスの探索

列車運行実績ネットワークにおいて次の条件を満たすアークをクリティカルアークと呼ぶことにする。

アークの重み＝アークの終点の実績時刻－アークの始点の実績時刻……………(1)

また、クリティカルアークのみで構成される経路（パス＝アークの並び）をクリティカルパスと言う。

アルゴリズム1の目的は、列車運行実績ネットワークにおいて、注目する二次遅延を終点とするクリティカルパスを求めることと同義である。そのためには、注目する二次遅延からすべてのクリティカルパスを逆にたどり、クリティカルパスの条件を満たさなくなったノード、もしくは行き着いたノードを「原因となっている一次遅延」として出力すればよい。図3の太線は、列車ZのC駅の着遅延に至るクリティカルパスを表している。列車ZのC駅の着遅延からクリティカルパスを逆にたどることによって、その原因として、列車XのB駅の発遅延を検知することができる。

3.4 アルゴリズム1の課題

現実の列車運行において、原因となっている遅延の探索過程においては、式(1)の条件を厳格に適用してクリティカルパスを探索することには次のような問題がある。

・**データの誤差の問題**：列車運行実績データは、運行管理システムから取得される。運行管理システムは、実際の列車の着や発を認識しているわけではなく、軌道回路の落下・扛上（こうじょう）の時刻を補正することによって、着発時刻としている。補正方法は、実際の列車運行を加味して注意深く考えられているとはいえ、ある程度の誤差が含まれることは避けられない。

・**データの精度の問題**：式(1)では、秒単位の値について厳密に等号が成立することを求めているが、現実には、完全に一致していなくても、データの誤差を考慮すると等しいとみなすべきケースがある。

・**走行時分については、次を考慮する必要がある。**

- 基準運転時分にもダイヤ表記等による若干の余裕が含まれている。従って、現実には、基準運転時分よりも速く走行することもありうる。
- 基準運転時分が同じであっても、列車ごとに実走行時分が異なることがありうる。これは、使用する番線が異なっても、基準運転時分は同じとされる場合があるためである（番線が異なる場合、異なった基準運転時

分とされることもあるが、番線変更の可能性を考慮して、余裕と見なして同一の基準運転時分とすることもある)。

- ・列車間の間隔、折り返し時分についても同様である。

さらに、列車間の間隔については、先行列車の停車時分が増加した場合、後続列車は駅手前で停止してしまうことがあり(機外停止)、この場合、駅への到着間隔は、最小運転時隔よりも大きくなる傾向がある。しかし、このような場合には、先行列車の遅延は後続列車に伝播したと考えるべきである。すなわち、列車間隔が最小運転時隔よりも大きくても、クリティカルパスと見なすことが求められる。すなわち、ケース 2 の(a)と(b)を区別することが必要である。

- ・停車時分については、ケース 3 の(a)の状況は、遅延の伝播と見なすべきではないが、(b)は遅延の伝播と見なすべきであると考えられる。従って、ケース 3 の(a)と(b)を区別することが求められる。

4 原因となっている遅延の検出アルゴリズム

3.4 節の議論を踏まえ、アルゴリズム 1 を次のように修正する。

- ・列車運行実績ネットワークのアークの重み：走行時分、列車間隔、折り返し時分は、個々の列車ごとに、対象期間の実績値の x パーセンタイル値を求め、それを重みとする。
- ・クリティカルパス探索アルゴリズムにおいては、式(1)の条件を緩和し、次とする。

アークの重み $\leq$ (アークの終点の実績時刻 - アークの始点の実績時刻) + 補正值 (2)

以下では、走行時分の補正值を α 、折り返し時分に対する補正值を β 、時隔に対する補正值を γ と表す。

- ・停車時分については、式(2)を考慮しない。すなわち、停車時分アークは、すべてクリティカルアークとする。ただし、しきい値 y を設定し、停車時分が計画ダイヤ上の停車時分よりも y 秒以上延びている時には、クリティカルアークとみなさない。

この背景にある考え方は、次の通りである。

- ・走行時分：走行時分の重みは、当該列車のある期間における最小の実走行時分とすべきであるが、極端な値を排除するために、 x パーセンタイル値とする。

- ・列車間隔、折り返し時分についても同様である。

- ・ α 、 β 、 γ は、それぞれ、走行時分、列車間隔、折り返し時分に対する誤差を加味するための補正值である。

- ・さらに、 β は、ケース 2 の(a)と(b)の状況(機外停止による列車間隔の延び)をも考慮した値とする(従って、一般には、 β は、 α 、 γ よりも大きい値とするのが自然である)。

- ・停車時分：ケース 3 の(a)の状況と(b)の状況を区別するために、しきい値 y を用いる。

5 アルゴリズム 1 の実行例

アルゴリズム 1 の実行例を図 4 に示す。太線がクリティカルパスである。対象とした運行実績データは、2008 年 6 月のある 1 日、対象線区は、首都圏近郊の路線である。ここでは、列車運行実績データの事前分析結果から、 $x = 10$ (10 パーセンタイル)、 $y = 60$ (停車時時分の 60 秒以上の増大はクリティカルパスとはみなさない)、 $\alpha = 15$ (秒)、 $\beta = 15$ (秒)、 $\gamma = 30$ (秒) とした。

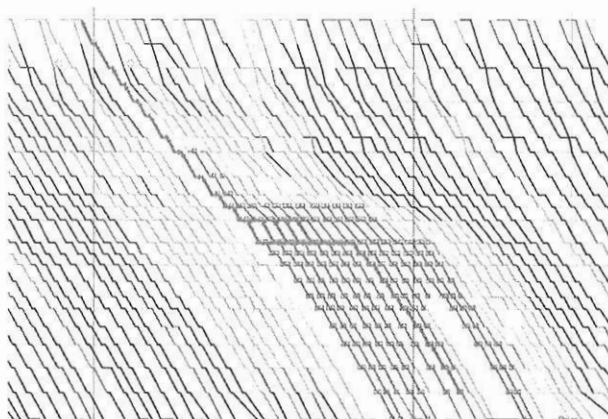


図 4：アルゴリズム 1 の実行結果

6 おわりに

本稿では、都市圏の鉄道を対象に、列車運行実績データから、頻繁に発生し、かつ、広範囲の列車の遅延の原因となっている事象を推定するアルゴリズムを導入した。本稿では、列車運行実績データを列車運行実績ネットワークと呼ぶある種の PERT ネットワークで表現し、その上でクリティカルパスを探索することによって遅延の原因を推定するアルゴリズムを導入し、実データを用いてその有効性を実証した。今後の検討事項として、発生している二次遅延と、それに対して検出された遅延の原因の間の因果関係を立証する方法の確立がある。

なお、本研究は、本研究は科研費(21510156)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 鉄道輸送トラブルによる影響に関する調査結果の概要 - 大都市圏の 1 時間未満の輸送トラブルについて - <http://www.mlit.go.jp/common/000047882.pdf>
- [2] 牛田貢平：「列車運行実績データの可視化手法によるダイヤ検討への応用」, 運転協会誌, Vol. 52, No. 8 (2010)
- [3] Kohei USHIDA, Shingo MAKINO, Norio TOMII: Increasing Robustness of Dense Timetables by Visualization of Train Traffic Record Data and Monte Carlo Simulation, WCCR2011- World Congress on Railway Research, Lille, France (2011)
- [4] (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道のスケジューリングアルゴリズム, NTS 出版 (2005)