

災害時鉄道利用客の経路統制による駅の滞留緩和に向けた考察

Consideration for Mitigating Stagnation by Route Assignment of Railway Passenger's Under the Disaster

樋野葉子 *1 荒井幸代 *2
Hino Yoko Arai Sachiyo*1千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻
Graduate School of Engineering, Chiba University, Architecture and Urban Science*2千葉大学大学院工学研究科都市環境システムコース
Graduate School of Engineering, Chiba University, Department of Urban Environmental Systems course

In this paper, we take a problem of dangerous situation in which the stations of the metropolitan area overflows with passengers because of the railway suspension at the outbreak of a disaster. In this situation, operation management of the trains is a critical issue to ensure the passenger's safety. We propose here a method not to exceed the accommodation capacity of a station by determining each passenger's rail route. We adopt Constraint Satisfaction Problem solving algorithm, backtracking method to decide them. In addition, Dijkstra algorithm is introduced to find the shortest route.

The effectiveness of our method is evaluated empirically by using the simplified railway network.

1. はじめに

2011年の東日本大震災では、首都圏の主要路線の運休により、駅や駅周辺は帰路を断たれた鉄道利用客で溢れる、いわゆる、帰宅難民問題が表面化した。また、この状況において銀座線は一部区間で運転を再開したが、利用客が殺到したため、安全を確保できず、再度運転を見合わせる事態を招いた。[1]このことは、運転再開が混乱を深刻化する可能性があることを示している。

本研究ではこの事態に着目し、駅の最大収容人数を超過せず、駅の機能を保ち、駅周辺の滞留者数を最小化することを目指す。具体的には、利用客の経路をトップダウンに決定することにより、移動経路を分散させ、滞留緩和を図る。駅の最大収容人数を制約とする、制約充足問題として定式化し、バックトラック法を用いて経路を決定する。

2. 制約充足問題

制約充足問題 (Constraint Satisfaction Problem) は以下の3つの要素によって構成される。

- 変数 (variable) 集合 $\mathcal{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
- 値域 (domain) 集合 $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}(x_1), \mathcal{D}(x_2), \dots, \mathcal{D}(x_n)\}$
- 制約 (constraint) 集合 $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$

値域集合 \mathcal{D} とは、変数がとり得る値の集合を意味し、有限で離散的とする。

各制約 c_j は、変数のある部分集合 \mathcal{X}_j ($\mathcal{X}_j \subseteq \mathcal{X}$) に対して許される (あるいは禁止される) 値の組合せを表す。制約充足問題の解は、すべての制約を満足する変数の値の組であり、1つ、またはすべての解を求めることが制約充足問題の目的である。

上の定義では、制約は値の組の集合で与えられるが、それらすべてを陽に記述する必要はなく、等式や論理式を用いて表現することもできる。

2.1 バックトラック法

制約充足問題の代表的な解法として、バックトラック法 (Backtracking) があげられる。バックトラック法は、ある順序に従って、制約を満たす変数の値の割当てを順次おこなっていく方法であり、木探索とも呼ばれる。変数に値を割当てるとき、すべての制約を満たす値が存在しなければ、一つ前の変数に戻ってその値を取り消し、他の値を試みる (バックトラック) という操作を繰り返す。そのため、バックトラック法では制約充足問題を厳密に解くことが可能である。

3. 対象問題

本研究において対象とする鉄道ネットワークを図1に示す。各ノードとリンクは駅と路線を表し、リンク上の数値はリンクコストを示す。駅の集合 \mathcal{S} は $\mathcal{S} = \{s_i \mid 1 \leq i \leq 4\}$ ($i \in \mathbb{Z}$)、各駅の最大収容人数の集合 \mathcal{C} は $\mathcal{C} = \{c_i \mid 1 \leq i \leq 4\}$ ($i \in \mathbb{Z}$) と表す。駅 s_i - 駅 $s_{i'}$ 間を区間 $[s_i, s_{i'}]$ と表記し、区間 $[s_i, s_{i'}]$ のリンクコスト $e_{ii'}$ は通常運転時において、この区間を通過するために要する時間を示す。

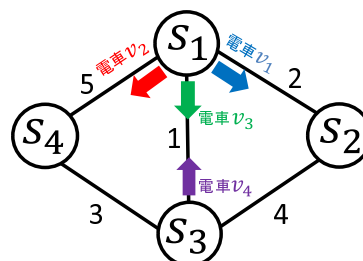


図1: Railway Network

連絡先: 樋野葉子, 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻, 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33, 043-290-3316, 043-290-3316, y.18.hino.6@gmail.com

3.1 電車のモデリング

電車は図 1 に示す, 4 種類で, 集合 $\mathcal{V}=\{v_j \mid 1 \leq j \leq 4\}$ ($j \in \mathbb{Z}$) と表し, 電車 v_1 は右回り ($s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow s_4 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$), 電車 v_2 は左回り ($s_1 \rightarrow s_4 \rightarrow s_3 \rightarrow s_2 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$), 電車 v_3 は下り ($s_1 \rightarrow s_3, s_2 \rightarrow s_3, \dots$), 電車 v_4 は上り ($s_3 \rightarrow s_1, s_4 \rightarrow s_1, \dots$) と, それぞれの進行方向は異なる. 電車は, 始発時刻, 駅での停止時間, 各区間の移動に要する時間を定めた, 運行ダイヤに基づき, 図 2 に示すモデル従い, 駅への発着を繰り返す.

電車 v_j が y 分おきに駅 s_i に到着する場合

1. 時刻 t 駅 s_i に到着
2. 時刻 $t+x$ 次駅 $s_{i'}$ へ出発
 x : 駅 s_i での停止時間
3. $t \leftarrow t+y$
4. 1 から 3 を繰り返す

図 2: Model of Arrivals and Departures to the Station

3.2 鉄道利用客のモデリング

利用客の集合 \mathcal{P} は $\mathcal{P}=\{p_k \mid 1 \leq k \leq n\}$ ($k \in \mathbb{Z}$) とし, 鉄道ネットワークにおける利用客の移動モデルを図 3 に示す. 利用客の出発駅 (*Origin*) (以下 O) と目標駅 (*Destination*) (以下 D) はすべての駅 s_i ($\in S$) よりそれぞれ決定する. さらに, 都市部ではオフィス街や住宅街が存在し, 通勤 (帰宅) 時には利用客の OD に偏りがあり, 駅内滞留者数にも影響するため, 利用客の OD の組合せを考慮する. 表 1 に全ての組合せを示す.

表 1: Passenger's Origin-Destination Combination

モデル	O 集中	D 集中	OD 集中	OD 分散
通勤	O	$\{s_2\}$	$\{s_1, s_2, s_3\}$	$\{s_2\}$
	D	$\{s_1, s_3, s_4\}$	$\{s_4\}$	$\{s_4\}$
帰宅	O	$\{s_1, s_3, s_4\}$	$\{s_4\}$	$\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$
	D	$\{s_2\}$	$\{s_1, s_2, s_3\}$	$\{s_2\}$

また, 本研究において, 駅周辺滞留者数とは, 駅内滞留者数と駅外滞留者数の合計人数とし, 各駅における駅内滞留者数の集合 \mathcal{N} を $\mathcal{N}=\{n_i \mid 1 \leq i \leq 4\}$ ($i \in \mathbb{Z}$), 駅外滞留者数の集合 \mathcal{W} を $\mathcal{W}=\{w_i \mid 1 \leq i \leq 4\}$ ($i \in \mathbb{Z}$) と表す. 駅内滞留者数 n_i は時刻ごとに変化するため, 式 1 に示す通り, 時刻 t における駅内滞留者数 $n_i(t)$ は, OD より駅 s_i を出発駅とし, 駅 s_i 入ってきた人数 $H_i^{in}(t)$ と, 駅 s_i に到着した電車に乗りきれず, 電車を見送った人数 $H_i^{pass}(t)$, また, 乗換えのために駅 s_i で降り, 電車を待っている人数 $H_i^{transfer}(t)$ の合計人数とする. 図 4 に概念図を示す.

$$n_i(t) = H_i^{in}(t) + H_i^{pass}(t) + H_i^{transfer}(t) \quad (1)$$

- $n_i(t)$: 時刻 t における駅 s_i の駅内滞留者数 [人]
 H_i^{in} : 駅 s_i を出発駅とし, 駅 s_i に入った利用客数 [人]
 H_i^{pass} : 駅 s_i に到着した電車を見送った利用客数 [人]
 $H_i^{transfer}$: 乗換えのため駅 s_i で電車を待つ利用客数 [人]

1. 現在駅 $\leftarrow Origin$
2. t に現在時刻を代入
3. **while** 電車 $v_j \neq$ 現在駅
4. **if** 現在地 = *Origin*
5. **then** $H_i^{in}(t) \leftarrow H_i^{in}(t) + 1$
6. **else**
7. **then** $H_i^{transfer}(t) \leftarrow H_i^{transfer}(t) + 1$
8. **do** $t \leftarrow t+1$
9. **if** 電車の最大乗車人数を超過
10. **while** 次の電車 $v_{j'} \neq$ 現在駅
11. **do** $H_i^{pass}(t) \leftarrow H_i^{pass}(t) + 1$
12. **do** $t \leftarrow t+1$
13. **while** 電車 $v_j \neq$ 次駅 $s_{i'}$ **or** 電車 $v_{j'} \neq$ 次駅 $s_{i'}$
14. **do** $t \leftarrow t+1$
15. 現在駅 $\leftarrow s_{i'}$
16. **if** 現在駅 = *Destination*
17. **for** $t \leftarrow$ 出発時刻 **to** 到着時刻
18. **do** $n_i(t) \leftarrow H_i^{in}(t) + H_i^{pass}(t) + H_i^{transfer}(t)$
19. **end**
20. **else** 3 へ戻る

図 3: Passenger's Transferring Model

問題の簡略化のため, 降車する際の目標駅における滞留時間は考慮せず, n_i には含まない.

また, 本研究において駅外滞留者とは, 目的とする駅の駅内滞留者数 n_i が最大収容人数を越えている場合に, 駅 s_i の外での待機を強いられた利用客を指す.

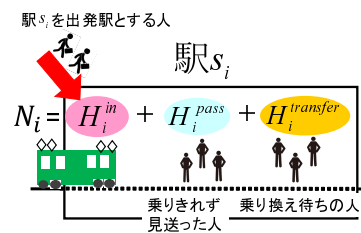


図 4: Conceptual Diagram of the Number of Stranded Passengers in the Station

4. 提案手法：経路決定バックトラッキング

本章では、駅の最大収容人数を越えないことを目的とした、提案手法による経路決定について述べる。制約充足問題の代表的解法である、バックトラック法をベースとする。

4.1 制約条件

制約条件は、式 2 に示す通り、各駅 s_i の駅内滞留者数 n_i が、駅の最大収容人数 c_i を越えないことである。

$$n_i(t) \leq c_i \quad (c_i \in \mathcal{C}) \quad (2)$$

制約条件を満たす経路決定をおこなうことにより、駅が機能不全に陥ることを防ぐ。ここで駅の機能不全とは、駅が容量オーバーとなり、利用客の安全を確保できないために運休を強いられる状況を指す。

4.2 アルゴリズム

利用客は駅 s_i において、その時点での最短経路を選択し次駅 $s_{i'}$ へ向かうとき、自身を含めた現在駅の駅内滞留者数 n_i が制約 (式 2) を満たすか判定する。制約を満たす場合は区間 $[i, i']$ を利用し、次駅へ移動する。しかし制約を満たさない場合は選択した区間 $[i, i']$ が利用不可能なため、当初の区間 $[i, i']$ を除く、準最短経路を新たに探索し、再び移動する。最短経路がない場合は、経由した駅 s_i^{via} へ戻り (バックトラック)、以前選択していない区間を用いた準最短経路を再び探索する。制約を満たし、出発駅から目標駅に到着するまで、以上の処理を繰り返し、得られた経路を解とする。現在駅が出発駅であり、経由した駅 s_i^{via} がない場合は、経路決定失敗となり、最初に得た最短経路上を移動するとし、制約を満たすまで駅外滞留者として待つ。アルゴリズムの詳細は図 5 に示す。

提案手法において、通常のバックトラック法により経路を決定することに加え、Dijkstra 法を導入し、最短経路順に探索をおこなうことで、移動時間を最小限とすることが可能となる。

5. 実験

5.1 実験設定

ダイヤは災害発生後の徐行運転を想定し設定する。ラッシュ時の滞留者数を再現するため全利用客数 $n = 4000$ 人のうち、はじめの 1 時間は 15 分ごとに 800 人、その後 1 時間は 15 分ごとに 200 人の利用客が経路決定を開始する。

駅の最大収容人数 c_i と電車の最大乗車人数は予備実験により決定する。駅の最大収容人数は通常運転時のラッシュ時に、全利用客が最短経路上を移動する時、得られた各駅の駅内滞留者数の最大値 n_i^{max} に 200 を加えた値とする。電車の最大乗車人数も同様に、乗車人数の最大値を乗車率 200% とし、乗車率 150% の値を算出し、最大乗車人数とする。

5.2 実験結果

通勤時において利用客の OD を図 6 では D 集中モデル、図 7 では OD 分散モデルにおける、提案手法を用いた駅内滞留者数の推定結果をそれぞれ示す。結果より、すべての駅で駅内滞留者数が駅の最大収容人数を越えておらず、利用客の移動経路を決定することにより、駅の最大収容人数超過を防ぐことができた。

6. 考察

6.1 評価方法

「提案手法：経路決定バックトラッキング (a)」と、比較対象として、「利用客が最短経路を選択した場合 (b)」を用いて、

経路決定バックトラッキングアルゴリズム

1. 現在駅 $\leftarrow Origin$
2. 現在駅から目標駅までの (準) 最短経路探索
3. **if** 最短経路あり
4. ▷ 次駅 $s_{i'}$ に対し、移動したと仮定
5. **then** t_{arrive} から t_{on} まで、制約充足判定
 t_{arrive} : 現在駅に利用客が到着した時刻
 t_{on} : 次駅へ向かう電車へ乗車した時刻
6. **if** 制約を満たす
7. **then** 現在駅 $\leftarrow s_{i'}$
8. **if** 現在駅 = $Destination$
9. **end**
10. **else** 4 へ
11. **if** 制約を満たさない
12. 区間 $[s_i, s_{i'}]$ を除き、2 へ
13. **if** 最短経路なし
14. **if** 経由駅 s_i^{via} あり
15. **then** 現在駅 $\leftarrow s_i^{via}$
16. **then** 区間 $[s_i, s_{i'}]$ を除き、2 へ
17. **if** 経由駅 s_i^{via} なし
18. **then** 経路決定失敗 \leftarrow 最短経路選択

図 5: Route Assignment Backtracking Algorithm

利用客の滞留時間と、駅外滞留者数の推定結果を比較し、提案手法の有効性を評価する。

6.2 実験結果

図 8 の左列 (A) に D 集中モデル、右列 (B) に OD 分散モデルにおける提案手法 (a) と比較対象 (b) の滞留時間を示す。また図 9 も同様にして、各モデルにおける駅外滞留者数の推移を表す。図 8(A) では、提案手法 (a) は (b) と比較すると最大滞留時間は変わらないが、滞留時間の長い利用客数が減少しており、平均滞留時間が短くなった。また駅外滞留者数も大幅に減少した。しかし (B) において、提案手法 (a) では、制約違反となり経路を変更した利用客が 0 人であったため (b) と同じ結果となった。

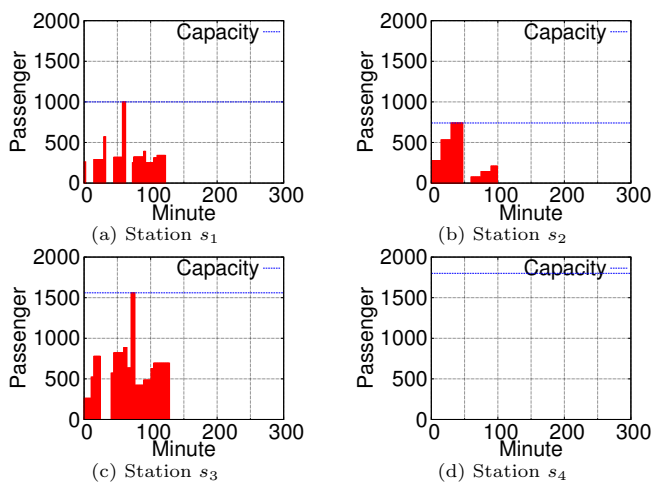


図 6: Destination Intense Model : Process of the Stranded Passenger in the Station during Commuting Time

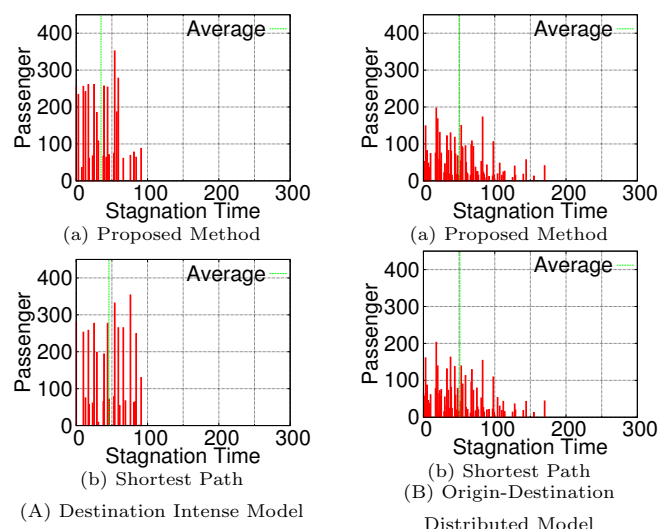


図 8: 駅利用客の滞留時間の比較

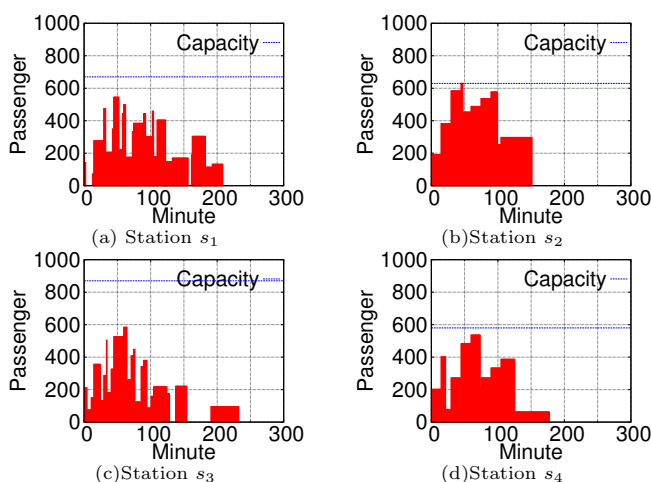


図 7: Origin-Destination Distributed Model : Process of the Stranded Passenger in the Station during Commuting Time

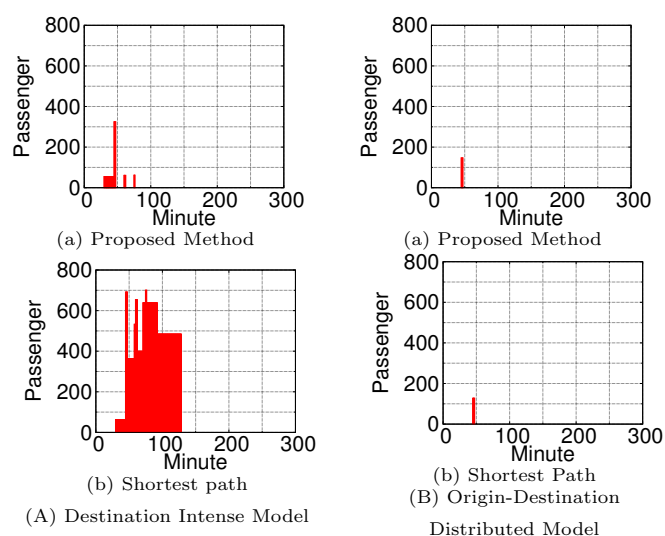


図 9: Comparison of Stranded Passengers outside the Station

7. 結論及び今後の課題

本研究では、災害時において生じる鉄道の運行ダイヤの乱れによって利用客が駅周辺に溢れる状況に着目し、駅周辺滞留者数を最小限とするための経路決定法を提案した。また、提案法の効果を示すため、簡単な鉄道ネットワークを用いて、駅周辺滞留者数の変化を観察し、災害時には利用客の経路を一括管理することによって帰宅可能な利用客が増えること、および、滞留による駅の混雑を緩和できることを示した。

提案手法の効果は、利用客の目標駅が一か所に集中する場合に顕著であり、利用客の滞留時間、および、駅外滞留者数を共に減少できることを示した。

今後の課題として、利用客の出発駅、目標駅の偏りに応じた提案手法の有効性の考察を深めるとともに、路線の一部が運休した後、復旧する場合に、提案した経路決定法を導入した最適な再開計画方法を提案することを挙げる。

参考文献

- [1] 大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会：“大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会報告書”，国土交通省 (2011. 3)
- [2] 西部喜康, 桑原和宏, 石田亨, 横尾真：“分散制約充足の高速化と通信網回線設定への適用”，電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D, No. 10, pp. 2204-2214 (1993)
- [3] 西原清一：“制約充足問題の基礎と展望”，人工知能学会誌, Vol. 12, No. 3, pp. 351-358 (1997. 5)