

Public Conveyance Model を用いた鉄道シミュレーション

友枝 明保^{1,2}, 小松 満仁³, 兪 逸淵³, 高山 糧³, 姜 鋭⁴, 西成 活裕^{2,5}

1. 明治大学先端数理科学インスティテュート, 2. 東京大学先端科学技術研究センター,
3. 東京大学大学院 工学系研究科, 4. 中国科学技術大学 工程科学学院,
5. 独立行政法人 科学技術振興機構 さきがけ

概要

公共交通における定時運行は乗客にとって最も重要視されるポイントである。特に鉄道ネットワークの場合、アクシデントが生じると、乗客の流れが変化しネットワーク全体に影響を及ぼすため、車両の定時運行が困難になる。この際、乗客の流れの変化を見積もることが重要となる。本稿では確率セルオートマトンモデルに基づく Public Conveyance Model を用いて乗客流を見積もる鉄道シミュレーター”KUTTY”を構築したので報告する。

Train Network Simulation based on Public Conveyance Model

Akiyasu Tomoeda^{1,2}, Mitsuhiro Komatsu³, Il Yun Yoo³, Ryo Takayama³,
Rui Jiang⁴, Katsuhiko Nishinari^{2,5}

1. Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences (MIMS), Meiji University,
2. Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo,
3. School of Engineering, The University of Tokyo,
4. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China,
5. PRESTO, Japan Science Technology Corporation

Abstract

In the railway transportation service, on-time operation of trains is important. However, once an accident occurs, on-time operation becomes difficult due to a change of the passenger flow pattern. In this case, it is crucial to estimate the changing pattern. This paper presents a Tokyo Metro Railway Network simulator “KUTTY” based on our public conveyance model, which is described by a stochastic cellular automaton.

1 Introduction

朝の通勤時間帯、鉄道がダイヤ通りに運行されていないことがしばしばある。人身事故、信号や車両の設備不良などがその要因として考えられるが、乗客の乗り降りによるちょっとした遅れの積み重ねによって大きな遅れが生じていることもある [1]。このような場合、鉄道会社はどのように車両制御をしているのであろうか？一般的には、鉄道会社は路線上に閉塞区間を設けることで、車両が等間隔になる

ように制御しており、乗客の空間内の不均一性は考慮されていない。また、鉄道ネットワークの研究は、複雑系ネットワークとして捉えることで様々なモデルが提案されている [2, 3, 4, 5]。しかし、残念ながらこれらのモデルでも乗客の振る舞いは考慮されておらず、実際のネットワーク上の乗客流の変化までは捉えられていない。

そこで、本稿では、乗客の乗り降りを考慮した確率セルオートマトンモデルである Public Conveyance Model(PCM) [6] を鉄道ネットワークに応用するこ

とで、乗客の流れを考慮した鉄道ネットワークシミュレーター“KUTTY”を構築したので報告する。

2 Models

我々のシミュレーターは東京メトロの8路線138駅からなるネットワークを対象としている。このシミュレーターはインプットデータの他に、ネットワーク構造や乗客のODデータをデータベース化し、それも利用していることを注意しておく(図1)。

2.1 Route choice model

ある乗客 p が駅に着いたとき、ODデータに基づいて乗客の行き先駅が確率的に決定される。その行き先までのすべての経路集合を $S(p)$ とし、ある時刻 t での各ルート $s \in S(p)$ を次式(1)を用いて評価する。

$$E\left(T(p, s), C(p, s), D(p, s, t)\right) = aT(p, s)^\alpha + bC(p, s)^\beta - cD(p, s, t)^{-\gamma}, \quad (1)$$

ここで、 $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ は正値のパラメーターとする。この式(1)において、 $T(p, s)$ はルート s の旅行時間であり、 $0 \leq C(p, s) \leq 2$ はルート s の乗換回数である。東京メトロのネットワーク構造では、どの2つの駅に対しても最大2回の乗り換えで到達が可能であるため、本研究では乗換回数は最大2回までと限定する。 $T(p, s)$ は $T(p, s) = nT_t + C(p, s)T_c$ で計算され、 n はルート上の駅の数、 T_t は駅間移動時間で2分とする。 T_c は同一駅における乗換時間であり、1分とした。第2項 $bC(p, s)^\beta$ は乗客が乗換に気乗りしない効果を表しており、乗客は乗換の回数を減らすために、旅行時間が長い方を選択することもある。 $D(p, s, t)$ はある時刻 t でのルート上の最大密度を表している。

(1)に基づいて計算された評価関数を正規化することで、乗客 p がルート s を選択する確率は k_e (本稿では $k_e = 1$) をパラメーターとして次のように表わされる。

$$P(p, s, t) = \frac{\exp\left[-k_e E(p, s, t)\right]}{\sum_{s_i \in S(p)} \exp\left[-k_e E(p, s_i, t)\right]}, \quad (2)$$

(1)をふまえると、コスト $E(p, s, t)$ が高いほど乗客はそのルートを選択しないので、(2)はコストが小さいほど、とりうる確率が高いことを意味する。

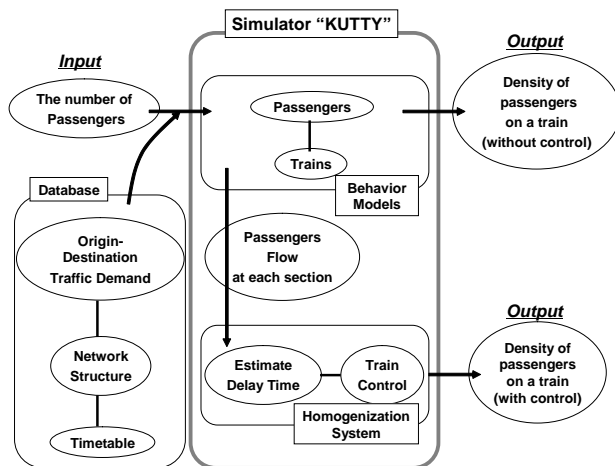


図1: The design flow diagram of our simulator “KUTTY”.

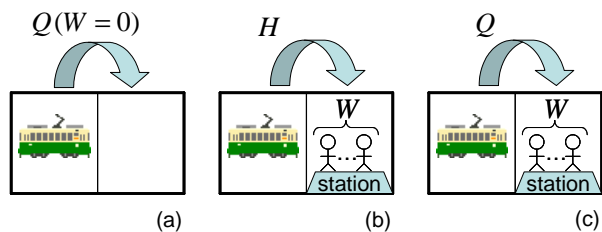


図2: All cases of the hopping probability of a train. (a) hop into a non-platform cell (b) hop into a platform cell (first time) (c) hop into a platform cell after one stop in the case of (b).

2.2 Train movement model

鉄道の動きのダイナミクスは確率セルオートマトンを用いてモデル化する[6]。車両はある確率 H によって次のセルに移動し(図2)、移動確率 H は a' をパラメーターとして次のように決める。

$$H = \min\left(\frac{1}{a' \min(W, W_{\max}) + 1}, Q\right). \quad (3)$$

ここで、 W, W_{\max} は各セルでの待っている乗客の人数と車両の定員であり、 Q は自由移動確率である。すべてのセルで待っている乗客がいらない場合、 $H = Q$ となり ASEP [7] に帰着する。本研究では、車両が確率的に止まってしまった場合、鉄道システムが信号で制御されていることを踏まえ、次の時刻では確率 Q で進めるようにした。またパラメーターは $a' = 0.2, Q = 1$ とした。

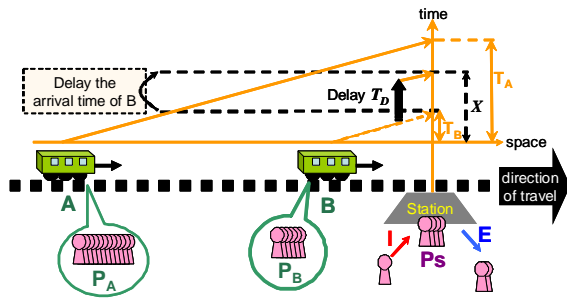


図 3: Schematic view of our homogenization system.

2.3 Homogenization reschedule

鉄道のダンゴ運転は微小な車両間隔の乱れが増幅して生じるものであった。つまり、車両間隔が等間隔であった状態からずれが生じると、乗せる乗客数のバランスがくずれ、余計に車両間隔のずれが大きくなるのである。そこで、鉄道会社は車両の間隔を等間隔にすることで擾乱を抑える制御を行っている。しかし、この制御方法は乗せる乗客が空間的に等分布である前提で考えている制御であり、現実的に考えると、乗客の空間的な分布の偏りを考えて制御するべきである。そこで本研究では、乗客の分布に注目し、その分布が均等になるような新しい鉄道制御方法を提案する。

図 3 において P_B, P_A をそれぞれ、車両 B, A い乗っている乗客の数とおく。 P_s は次の駅のプラットフォームで待っている乗客を表し、 E_B, E_A は次の駅で降りる乗客数、 I は単位時間に駅に到着する人数を表している。それぞれの車両の次の駅までにかかる時間を T_B と T_A で表わす。我々のアイデアは B, A の車両に乗っている乗客数を等しくするために、到着までの時間を T_B から X へと伸ばすことを考える。 X は次の関係式から求められる。

$$\begin{aligned} P_B + (P_s + IX) - E_B \\ = P_A + I(T_A - X) - E_A. \end{aligned} \quad (4)$$

左辺 (右辺) は駅を過ぎた後に $B(A)$ に乗っている乗客の数を表している。車両 B の遅れ時間 T_D は

$$T_D = X - T_B, \quad (5)$$

として計算される。



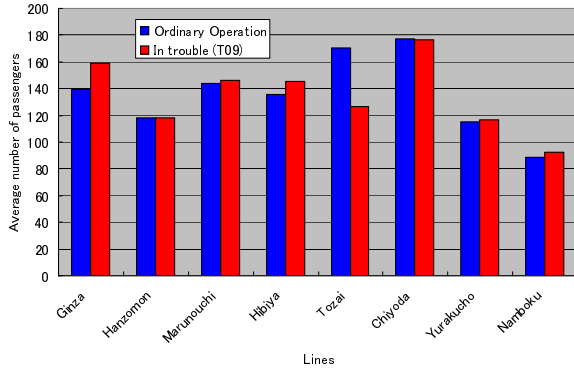
図 4: Snapshots of our simulator “KUTTY”. Left one is entire picture and right one is closeup picture around Otemachi station. In KUTTY, the high flow (low-flow) is painted in red (blue).

3 Simulation and Results

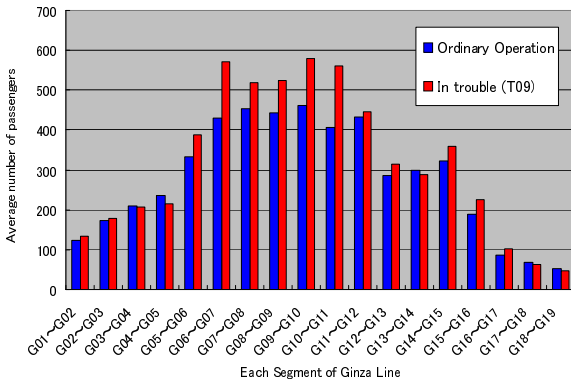
図 4 に我々の構築したシミュレーター “KUTTY” のスナップショットを載せる。このシミュレーションから最も混んでいるエリアは東西線の大手町 (T09) 駅であることがわかった。この結果に基づいて、我々は仮想的に $T09$ でのみ事故が起こり、 $T09$ でのみ乗客が通れなくなったとし、その際の流量変化を調べ、その結果が図 5(a) である。

この図 5(a) から東西線における乗客数は 25% 程度減少していることが分かる。その一方で、銀座線と日比谷線の乗客数がそれぞれ 15%, 10% 程度上昇している。これは、 $T09$ が通れなくなったことによって、乗客が銀座線と日比谷線を利用して迂回したと考えられる。そこで銀座線に注目し、銀座線の各駅間での乗客数をプロットしたものが図 5(b) である。このプロットから $G05$ から $G11$ のエリアの乗客数が増えていることがわかる。これは東西線を迂回するために、銀座線の $G06$ から $G11$ 駅を利用していることを示唆している。

最後に乗客分布に注目した鉄道制御方法のシミュレーション結果について述べる。 $G03$ 駅で突然乗客が増えた状況を考え、車両の混雑率を測定したもの



(a) Each line



(b) Each segment of Ginza Line

図 5: The comparison plot of the number of passengers (a) per train in each line, (b) per segment of the Ginza Line, between normal operation and that with an accident at T09.

が図 6 である。この図から、従来の車両間隔を等距離に保つ鉄道制御は何も制御しない場合に比べて混雑をより小さいエリアに抑え込むことに成功している。しかし、我々の乗客分布を均等にする制御は、従来の車両を等間隔に制御する方法よりもさらに狭い領域へと抑え込むことに成功した。

4 Conclusions

本研究では確率セルオートマトンモデルに基づいた Public Conveyance Model に乗客の経路選択の効果を入れることで鉄道シミュレーター”KUTTY”を構築した。このシミュレーターを用いることで、ネットワーク構造に変化があったときの乗客流の変化を即座に見積もることができるようになった。また、突発的な乗客の増加による擾乱に対して、乗客分布

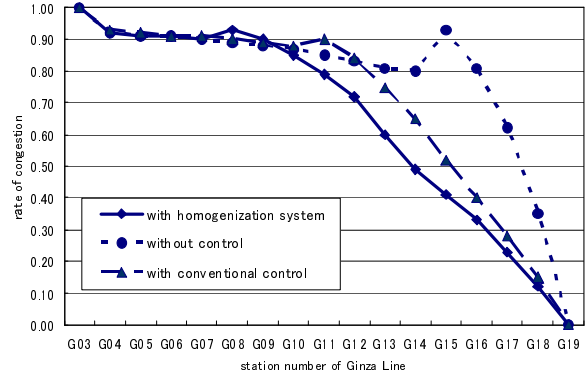


図 6: The comparison plot of the passenger density of train A among the three systems.

を均等化する車両制御方法を提案し、その効果について検証した。その結果、従来の鉄道間隔を等間隔に保つ制御方法よりも、我々の方法の方が擾乱の影響範囲を狭い範囲に抑え込めることがわかった。今後の課題として、通勤時間帯の考慮や新線の評価、データベースの改良などを行う予定である。

参考文献

- [1] 寺田寅彦, 岩波文庫随筆集, 第二巻
- [2] M. Pursula, Simulation of traffic systems - an overview, Journal of Geographic Information and Decision Analysis Vol. 3, p. 1, 1999.
- [3] V. Latora and M. Marchiori, Physica A, Vol. 314, p. 109, 2002.
- [4] D. J. Watts and S.H. Strogatz, Nature, Vol. 393, p. 440, 1998.
- [5] D. Meignan, O. Simonin and A. Koukam, Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 15, p. 659, 2007.
- [6] A. Tomoeda, K. Nishinari, D. Chowdhury and A. Schadschneider, Physica A, **384**, p. 600, 2007.
- [7] B. Derrida, Phys. Rep. **301**, 65 (1998).