

複数の流入点を設けた個別輸送システム合流部の解析 Analysis at a Merging Section with Multi-Entry Points of Personal Rapid Transit System

河内 裕一¹, 星野 貴弘², 浜松 芳夫²

*Yuichi Kawachi¹, Takahiro Hoshino², Yoshio Hamamatsu²

Abstract: This study deals with a merging section with multi-entry points of Personal Rapid Transit System (PRT). Using the technique of Markov chain, we analyze vehicles behavior from the stochastic model of the merging section. We derive the average number of waiting vehicles for evaluating the system performance. Comparing with a merge section with one entry points, we show basic feature for multi-entry points model.

1. はじめに

個別輸送システム (PRT) とは, 都市型輸送システムの一つである。個別輸送システムは少人数 (1~6 人) 用の小型車両が自動運転で専用軌道を走行し, 客のデマンドにより運行し目的地まで直行する。このようなシステムにおいて優先路, 非優先路からなる合流部では車両の衝突回避のため非優先路側には混雑が生じる場合がある。そのため合流部での効率的な合流制御戦略を検討する事はシステムを実現する立場からも重要な課題である。

以上のような背景より, これまで筆者らは待ち時間または待ち台数に何らかの制約を設け, これを超える場合には合流に関する優先権を変化させる制御方式の検討を行ってきた^[1]。しかし, 優先権を変化させたとしても待ち行列長の総量自体は保存されるため, システム全体の混雑軽減という観点において, 根本的な解決にはならなかった。そこで本研究では, 一般的な PRT 合流部の合流点が 1 つであるのに対し, 複数の合流点があるモデルにおける混雑軽減の効果について検討する。

2. モデルの概要

個別輸送システムの車両群は点追従方式^[2]によって制御される。点追従方式は, 計算機内において実際の軌道と等価な軌道を仮想し, 仮想的な点 (Moving Target, MT) を軌道上に走行させる。各車両はこの MT を追従するように制御されるため, 前車の異常停止による衝突を防止できる。また合流部近傍では, 車両の衝突を回避するために, 合流点の手前で必要に応じてセルの乗り換えを許す準同期制御^[2]とする。

Fig.1(a) は個別輸送システムの一般的な合流部の概略図で流入点が 1 つのモデルである。Fig.1(b) は一般的な合流部に対して n 個の流入点が設けられたモデルの概略図である。Fig.1(b) では流入点を複数設けることにより, 待ち台数や待ち時間を減少させ, かつ積極的に合流させることができる。またチェックポイント (CP) は車両の到来を検知する地点であり, CP の情報を基に車両の合

流を制御している。副線上の CP_0 から先は側線 $O_1 \sim O_n$ に分岐し, それぞれの合流点 $M_1 \sim M_n$ で合流する。また側線 O_n は $CP_n \sim M_n$ 間と等距離の関係にある。

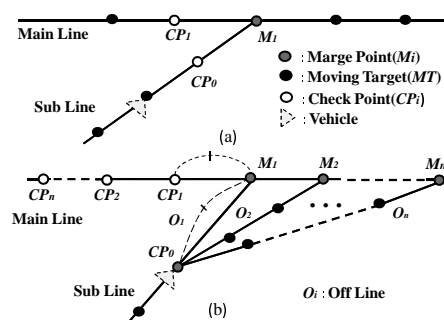


Fig. 1: Schematic diagram of the merging section.

副線上の車両を本線へ合流させるために具体的な車両の合流制御方式を次に述べる。 CP_0 上に車両が到来した場合を考える。 CP_0 上の車両をどの側線に進ませるかは, $CP_1 \sim CP_n$ の車両の到来状況によって決定する。まず $CP_1 \sim CP_n$ の全てに車両が到来していた場合, どの側線を使用しても衝突するため, 副線上で待機させる。したがって, 副線上に待ち行列が形成される。また $CP_1 \sim CP_n$ のうち, 一つ以上に空きがある場合, 合流可能であるため, 本線の空きと同期するよう側線へ進む。ただし, 通過可能な側線が複数ある場合には, 最短時間で合流できる側線を進ませる。

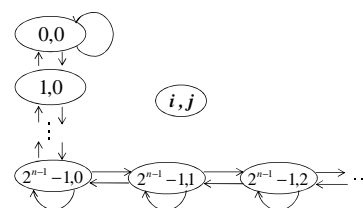


Fig. 2: State transition diagram

1:日大理工・院・電気 2:日大理工・教員・電気

3. 数理モデルの検討

流入点を n 個設けたモデルにおける合流部付近の車両挙動の解析を行うため、 Δt ごとの時点に着目し、マルコフ連鎖の手法を用いて数理モデルの構築を行う。確率モデルの状態を (i, j) と定義する。状態変数 i は $CP_1 \sim CP_n$ の状況を示す。具体的には $i = 0$ は $CP_1 \sim CP_n$ に車両が到来していない状況、 $i = 2^{n-1} - 1$ は $CP_1 \sim CP_n$ の全てに車両が到来している状況を示す。 j は副線上における待ち台数を表す。本線に車両が到来する確率を l 、到来しない確率を $m (= 1 - l)$ とする。また副線に車両が到来する確率を p 、到来しない確率を $q (= 1 - p)$ とする。マルコフ連鎖モデルの状態推移図を Fig.2 に示す。状態推移図より推移確率行列 R は式 (1) となる。

$$R = \begin{matrix} & 0,0 & \dots & N,0 & N,1 & N,2 & \dots \\ \begin{matrix} 0,0 \\ 1,0 \\ \vdots \\ N,0 \\ N,1 \\ \vdots \end{matrix} & \begin{bmatrix} m & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ qm & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & \dots & A & pl & 0 & \dots \\ 0 & \dots & qm & A & pl & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

ただし、上式の $A = pm + ql$ 、 $N = 2^{n-1} - 1$ である。

4. 解析

システムの性能評価の尺度である平均待ち台数を導出する。極限状態において状態 (i, j) となる確率を $P_{i,j}$ とすれば極限状態確率分布 P は次のように定義される。

$$P = [P_{0,0} \ P_{1,0} \ \dots \ P_{N,0} \ P_{N,1} \ P_{N,2} \ \dots] \quad (2)$$

推移確率行列と極限状態確率分布の関係及び確率の正規化条件より式 (3) の 2 式が成り立つ。

$$P = PR, \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{\infty} P_{i,j} = 1 \quad (3)$$

この 2 式より極限状態確率 $P_{i,j}$ が得られる。期待値の定義式より、平均待ち台数 L_n は下式となる。

$$L_n = \sum_{j=1}^{\infty} j P_{N,j} = \left(\frac{l}{q}\right)^{n-1} \frac{pl}{q-l} \quad (4)$$

最短路である O_1 から M_2 に到達する時間に比べて、 O_2 を使い M_2 に到達するまでの時間は $1\Delta t$ 長いことから $O_k (k = 2)$ を通ることを迂回と定義する。流入点の数が 2 のモデルにおいて迂回率 ϵ_2 は次式となった。

$$\epsilon_2 = \frac{l}{p} (pmP_{1,0} + m \sum_{j=1}^{\infty} P_{1,j}) = \frac{l}{q} \quad (5)$$

同様に流入点の数が 3, 4 のモデルの迂回率を求めた結果、 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = l/q$ となった。

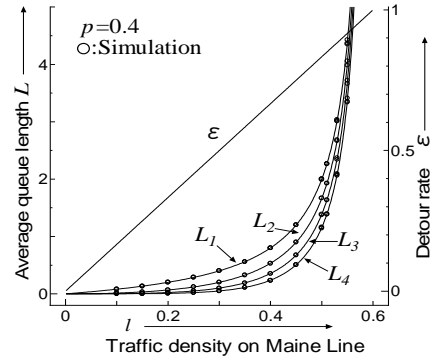


Fig. 3: Comparison of Numerical examples

Table. 1: Numerical example

	L_1	L_2	L_3	L_4	
$l = 0.3$	0.4	0.2	0.1	0.05	0.5
$l = 0.599$	239.6	239.2	238.8	238.4	0.998

5. 考察

Fig.3 に副線の到来確率 $p = 0.4$ における平均待ち台数の理論値とシミュレーション値と迂回率を示す。シミュレーションはシミュレーション時間を 100 万 Δt とし、乱数の初期値を変えて、それぞれ 3 回ずつ行った。Fig.3 より平均待ち台数の理論値とシミュレーション値はよく一致している。よって構築した数理モデルは妥当と考えられる。また、流入点の数が多いほど平均待ち台数が減少している。 l が高くなると迂回率も上昇する。

Fig.3 における $l = 0.3, 0.599$ の理論値を Table.1 に示す。表より流入点を増やすごとに平均待ち台数が倍されるのがわかる。 $l = 0.599$ の場合に迂回率は 99.8% と高い値になっている。また、 $L_2 \sim L_4$ の値は L_1 の値とほぼ等しい。この結果より流入点を複数設けたモデルは l の値が高いと、通常の流入点が 1 つのモデルと同等になる。 l の値が高いと $CP_1 \sim CP_n$ に空きがない状態が多くなる。この状態において空きができるのは左端の CP_n からである。 CP_n のみに空きがある状態が続くと、 CP_0 に到来する車両は O_n しか使わなくなる。よって O_n のみを使うため、通常の流入点が 1 つのモデルと車両の挙動が同じになることが考えられる。

6. まとめ

流入点を複数設けたモデルにおいて、迂回率が高くなると車両挙動は通常の流入点が 1 つのモデルと同等になることがわかった。今後は流入点を設置する位置が輻輳現象に及ぼす影響を、解析することが課題である。

参考文献

- [1] 星野貴弘・坪井一洋・浜松芳夫：「輸送システムにおける複数流入路での合流に伴う輻輳現象の解析」電気学会論文誌 Vol. 131, No. 8 p.1059-1067 (2011)
- [2] 荒屋慎二：「新交通システムと自動運転制御」電子通信学会誌 Vol.64, No1 p.43-48 (1981)