

個別輸送システム合流部における連結走行方式のモデル化

Modeling of a Merging Section on PRT System at Connected Traveling Type

○市川 悠¹, 浜松 芳夫², 星野 貴弘²*Yu Ichikawa¹, Yoshio Hamamatu², Takahiro Hoshino²

Abstract : In this research, a merging section of Personal Rapid Transit system is analyzed. The demand operation system is employed in the PRT system. Small vehicles are traveling on the guide way network and run from origin to destination directly. When a vehicle arrives at a merging section with two inflow line, the vehicle must wait for connecting another vehicle on the other line. We examine a fundamental behavior of vehicles at the merging section.

1. はじめに

本研究は、個別輸送システム (Personal Rapid Transit, PRT) の合流部を対象としている [1]。PRT とは、小型車両をコンピュータ制御により軌道ネットワーク上を走行させ、利用者の要求に応じ出発地から目的地まで直行するデマンド運行システムである。PRT システムの合流部では、車両同士の事故の防止や、旅行時間の観点から何らかの制御を行う必要がある。

PRT システムの一つである ARAMIS では、合流部で車両同士を連結し走行している。実際には物理的な連結ではなく、約 300mm の車間距離を維持するよう電子的に制御し走行する。ARAMIS では、合流部において、二車線から同時に車両が到来したとき、前書きのように 2 台の車両を連結させて出力させる。一方の車線のみ車両が到来する場合には、もう一方の到着を待つか 1 台で出力させる。このシステムのメリットとして、車線容量を増加できることが挙げられる。本研究では、車両が合流部で連結する場合についてモデル化し、合流後の出力台数について検討を行う。

2. 合流部モデル

個別輸送システムの車両走行の制御方式には、基本的に点追従制御と車両追従制御がある。点追従制御は、地上計算機が仮想的な移動セルを発生し、実際の車両はこ

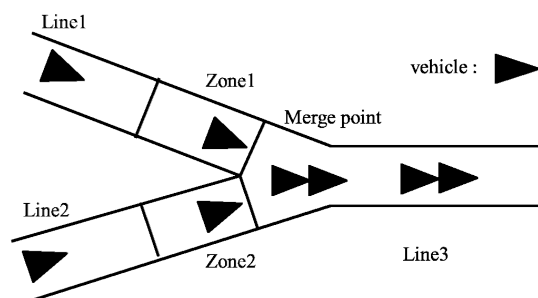


Fig. 1: Schematic diagram of a merging section.

1:日大理工・院・電気 2:日大理工・教員・電気

Table. 1: State transition of the Markov model.

Present State	Next State			
	i	$i+1$	$i-1$	i
i	i	$i+1$	$i-1$	i
$-i$	$-i$	$-(i-1)$	$-(i+1)$	$-i$
n	n	n	$n-1$	n
$-n$	$-n$	$-(n-1)$	$-n$	$-n$
probability	p_1p_2	p_1q_2	q_1p_2	q_1q_2

のセルの前端を追従するように制御される。本研究では、軌道ネットワーク上を走行する車両の運行制御方式は点追従制御とする。移動セルの時間間隔を Δt とし、システムの単位時間とする。

本合流部モデルを Fig.1 に示す。Line1, Line2 に到来する車両が合流部で連結する。合流部の直前に連結する車両を待つための Zone1, Zone2 を設ける。しかし、旅行時間の観点から無制限に待たせることは好ましくないため、各 Zone での待ち台数に制限を設ける。

<2-1>合流制御 以下に合流部での車両制御をまとめる。

(1) Line1 上の Zone1 に車両が到来したとき、Line2 上の Zone2 に車両が到来していれば、連結して出力する。

(2) Line1 上の Zone1 に車両が到来したとき、Line2 上の Zone2 に車両が到来していなければ、Zone2 に車両が到来するまで待たせる。

(3) Line2 上の Zone2 でも Line1 と同様の制御を行う。

(4) 各 Zone には、待つことができる制限台数 n を設け、この n を越えたとき、その車両を 1 台で出力する。

<2-2>到来確率 各車両が到来するか否かは、システムの単位時間 Δt ごとに観測する。 Δt 時間内には、各 Line に最大で 1 台の車両しか到来しない。Line1 の車両が到来する確率を p_1 、到来しない確率を $q_1 (= 1 - p_1)$ とする。Line2 も同様に、車両が到来する確率を p_2 、到来しない確率を $q_2 (= 1 - p_2)$ とする。

3. マルコフ連鎖モデル

本合流部の数理モデルの構築には、マルコフ連鎖の手法 [2] を用いる。 Δt ごとの各時点に着目し、任意の $k\Delta t$ から次の $(k+1)\Delta t$ の時点までは、本モデルが従う確率

過程が一つの状態にとどまっているものとする。マルコフ連鎖の状態を定義する確率変数一つとし、状態 i と定義する。ただし、 i の値は、 $i = 0, 1, 2, \dots, n$ とし、Zone1 の待ち台数を i 、Zone2 の待ち台数を $-i$ 、両方の Zone に車両がないときは $i = 0$ とする。現時点の状態から $1\Delta t$ 後の状態への推移をまとめれば Table1 となる。表より、マルコフ連鎖の推移確率行列 R を導出する。

4. 解析

状態 i の平衡状態確率を P_i で表すものとする。そして、平衡状態確率分布 P を次式のように定義する。

$$P = [P_0 \ P_1 \ P_{-1} \ P_2 \ P_{-2} \ \dots \ P_n \ P_{-n}] \quad (1)$$

さらに、 $P = PR$ と確率の正規化条件

$$P_0 + \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{i=1}^n P_{-i} = 1 \quad (2)$$

を用いれば、平衡状態確率 P_i を求めることができる。

<4-1>各 Line より 1 台で出力される確率 d 本合流部での合流制御戦略が、車両を連結することから、各 Line の車両が Line3 に 1 台で出力される確率 d の検討を行う。まず、Line1 と Line2 の 1 台での出力確率 d_1, d_2 を以下に示す。

$$d_1 = p_1 q_2 P_n = \frac{(p_1 q_2 - q_1 p_2)(p_1 q_2)^{2n+1}}{(p_1 q_2)^{2n+1} - (q_1 p_2)^{2n+1}} \quad (3)$$

$$d_2 = q_1 p_2 P_{-n} = \frac{(p_1 q_2 - q_1 p_2)(q_1 p_2)^{2n+1}}{(p_1 q_2)^{2n+1} - (q_1 p_2)^{2n+1}} \quad (4)$$

(3), (4) 式より、1 台での出力確率 d は (5) 式となる。

$$d = d_1 + d_2 = \frac{(p_1 q_2 - q_1 p_2) \{ (p_1 q_2)^{2n+1} + (q_1 p_2)^{2n+1} \}}{(p_1 q_2)^{2n+1} - (q_1 p_2)^{2n+1}} \quad (5)$$

<4-2>Line3 へ 1 台で出力される台数の割合 e 次に、それぞれの Zone から 1 台で出力されたとき、Line3 におけるその台数の割合 e_k を以下のように定義する。ただし、次式において、 $k = 1, 2$ である。

$$e_k = \frac{\text{Zone } k \text{ から 1 台で出力される台数}}{\text{Zone } k \text{ への到来台数}}$$

各 Line からの 1 台での出力台数の割合 e_k は以下の式となる。

$$e_1 = d_1/p_1 = \frac{(p_1 q_2 - q_1 p_2)(p_1^{2n} + q_2^{2n+1})}{(p_1 q_2)^{2n+1} - (q_1 p_2)^{2n+1}} \quad (6)$$

$$e_2 = d_2/p_2 = \frac{(p_1 q_2 - q_1 p_2)(q_1^{2n} + p_2^{2n+1})}{(p_1 q_2)^{2n+1} - (q_1 p_2)^{2n+1}} \quad (7)$$

さらに、Line1 と Line2 を区別せず、合流部から車両が 1 台で出力される割合を

$$e_d = \frac{\text{合流部から 1 台で出力された台数}}{\text{合流部への到来台数}}$$

と定義すれば、

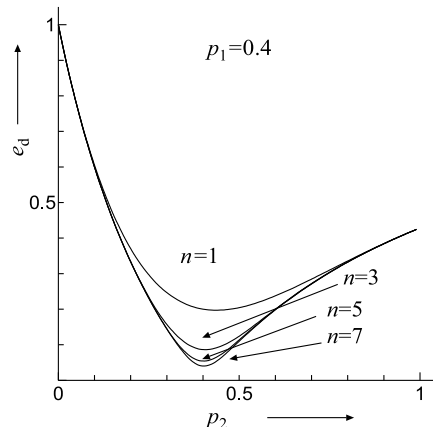


Fig. 2: Numerical example of e_d .

$$e_d = \frac{d_1 + d_2}{p_1 + p_2} = \frac{(p_1 q_2 - q_1 p_2) \{ (p_1 q_2)^{2n+1} + (q_1 p_2)^{2n+1} \}}{(p_1 + p_2) \{ (p_1 q_2)^{2n+1} - (q_1 p_2)^{2n+1} \}} \quad (8)$$

で求められる。また、 $p_1 = p_2 (= p)$ の条件のとき

$$e_d = q P_0 = \frac{q}{2n+1} \quad (9)$$

となり、到来しない確率 q に比例することが分かる。

5. 考察

Fig.2 に、Line2 の車両到来確率 p_2 を変化させたときの Line3 へ 1 台で出力される台数の割合 e_d を示す。ただし、Line1 の車両到来確率 $p_1 = 0.4$ とした。また、制限台数 n をパラメータとしてある。(9) 式より、 $p_1 = p_2$ の条件では、 $n = 1$ のとき $e_d = 20\%$ 、 $n = 7$ のとき $e_d = 4\%$ である。さらに、 $n = \infty$ のとき $e_d = 0\%$ となり、1 台のみで出力される車両はなくなる。この結果は、定性的に予想される結果と一致している。このとき、 $e_d = 10\%$ 未満とするには、 $n = 3$ 以上にする必要がある。また、(8) 式の $p_1 \neq p_2$ の条件で、例えば $n = 3$ において、 $0.35 < p_2 \leq 0.45$ のとき $e_d = 10\%$ 以内に抑えることができる。しかし、制限台数 n と平均待ち時間の関係は、トレードオフの関係にあるため、この点を考慮する必要がある。

6. まとめ

本合流部の数理モデルをマルコフ連鎖の手法を用いて構築し、連結する際の車両挙動を解析的に陽に求めることができた。Line3 へ 1 台で出力される台数の割合に着目し、数値例よりその特徴を定量的に明らかにできた。

今後の課題として、各 Zone の制限台数が異なる場合や車両の到来数を変化させた場合の検討が挙げられる。

参考文献

- [1] 浜松芳夫：「個別軌道輸送システム合流部における車両挙動とその制御」, 電学論誌 A Vol. J70-A No.9 pp.1255-1260 1987 年 9 月
- [2] 森村英典, 高橋幸夫：「マルコフ解析」, 朝倉書店 (1979)