

個別輸送システムの合流制御戦略と二重待ち行列の解析

Analysis of Double Queue and Control Strategy for Merging on PRT System

月岡 弘孝¹, 星野 貴弘², 浜松 芳夫²Hirotaka Tsukioka¹ Takahiro Hoshino², Yoshio Hamamatsu²

Abstract: This paper deals with a merging section of the Personal Rapid Transit system. In quasi-synchronous control systems, one flow of traffic must form a queue at a merging section in order to avoid the collision of vehicles. We propose a control strategy whereby vehicles on the main line are usually not stopped; vehicles on the main line are only stopped when the number of waiting vehicles on the sub line exceeds some specific number. Therefore, queues are formed on the main line and sub line, respectively. We discuss basic features of the effects of the double queue and the relationship between traffic density and the behavior of traffic.

1. はじめに

本論文は、新交通システムの一つである個別輸送システム (Personal Rapid Transit, PRT) の合流部を対象としている。個別輸送システムとは、専用の軌道ネットワーク内を自動運転の小型車両が乗客のデマンドに応じて、目的地に直行するシステムである [1]。

通常、PRT の合流部では優先路上の車両に完全な優先権があり、合流部を通過する際の通過遅れ時間は、常に非優先路側にのみ生じる。そこで、文献 [2][3] では、非優先路上の待ち台数にしきい値を設け、優先路上の車両を待たせ、非優先路上の車両を合流させる合流制御方式の検討を行った。ただし、これらの文献では、混雑度を表す尺度であるトラヒック密度 ρ が 1 未満の検討であった。しかし、実際の交通システムにおいては、一時的に $\rho \geq 1$ となる状況もある。そこで、本論文は $\rho \geq 1$ の場合の検討を行う。

2. 合流部モデル

2.1 合流部モデル

本モデルでは、車両の基本的な制御方式として点追従制御方式を用いる。点追従制御では、地上コンピュータが一定時間間隔 (Δt) に MT (Moving Target) を発生させ、各車両は MT を追従するように制御される。このように制御することにより、前車が異常停止した場合でも後続車は追突することなく停止できる。ここで MT 予約の自由度を増すため、合流部近傍での MT 乗換を許す準同期制御方式とする。Fig.1 に本論文で扱う合流部モデルの概略図を示す。本線上と副線上には、合流点から等距離で車両の到来を検出するチェックポイント (Check Point, CP) CP_1 , CP_2 が、それぞれ設けられている。

2.2 合流制御方式

1 章で述べた通り、一般的に優先路である本線上の車両を優先して合流させるため、非優先路である副線上に待ち行列が形成される。そこで、副線の待ち台数にしき

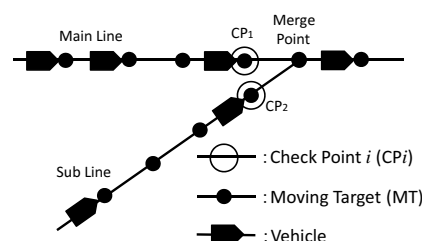


Fig. 1: Schematic diagram of the merging section.

い値 (n 台) を設定して、このしきい値以上になる場合には、 CP_2 上の車両を優先して合流させる。このとき、二重待ち行列が形成される。但し、本線上の待ち台数が k 台以上の場合には、本線 CP_1 上の車両を優先して合流させる。すなわち、本線上の待ち台数に制限値 (k 台) を設定したことになる。

2.3 到来車両

車両の到来は Δt ごとに観測する。1 つの MT に割り当てられる車両は最大一台であるため、 Δt 時間内に到来する車両数は最大一台となる。本線に車両が到来する確率を l とする。また、本線に車両が到来しない確率は $m (= 1 - l)$ とする。同様に、副線に車両が到来する確率を p とし、到来しない確率を $q (= 1 - p)$ とする。

3. マルコフ連鎖モデル

本論文では、 Δt ごとの各時点に着目し、任意の時点から次の時点までは、マルコフ連鎖モデルの状態がある 1 つの状態にとどまっていると仮定する。また、状態の観測は、任意の MT が CP に到着した時点の直後に行うものとする。観測時点において、本線上に待ち台数が i 台、副線上に待ち台数が j 台であった場合に、これを状態 (i, j) と定義する。

4. 解析

本章では、マルコフ連鎖の手法により数理モデルを構築する。マルコフ連鎖モデルにより得られる極限状態確率をもとに、平均待ち台数、平均通過遅れ時間等を求めることができる。極限状態確率分布は、極限状態 (平衡状態) において、ある一定の値に収束する確率分布であ

1:日大理工・院・電気 2:日大理工・教員・電気

る．本モデルにおいて，待ち台数の増加確率が減少確率より小さければ，極限状態確率が一定の値に収束する．極限状態確率が存在するための必要十分条件は，

$$pl < qm \quad (1)$$

である．また， $\rho = pl/qm$ とすれば，次式となる．

$$\rho < 1 \quad (2)$$

4.1 極限状態確率

極限状態において状態 (i, j) となる確率を $P_{i,j}$ で表すものとする，極限状態確率分布 P は，

$$P = [P_{0,0} P_{0,1} P_{0,2} \cdots P_{0,n} P_{1,n-1} P_{1,n} \cdots P_{k,n-1} P_{k,n} P_{k-1,n+1} P_{k,n+1} \cdots] \quad (3)$$

と定義できる．また，極限状態確率分布 P は，推移確率行列 R と (4) 式を満たす．

$$P = PR \quad (4)$$

また，確率の正規化条件より，(5) 式が成り立つ．

$$\sum_{j=0}^n P_{0,j} + \sum_{i=1}^k (P_{i,n-1} + P_{i,n}) + \sum_{j=n+1}^{\infty} (P_{k-1,j} + P_{k,j}) = 1 \quad (5)$$

4.2 平均待ち台数と平均通過遅れ時間

極限状態確率 $P_{i,j}$ を用いて，本線，副線の平均待ち台数 L_1, L_2 は，それぞれ次のように与えられる．

$$L_1 = \frac{pl}{q-l} \left(\frac{pl}{qm} \right)^{n-1} \left\{ \frac{l}{q} - \left(\frac{pl}{qm} \right)^k \right\} \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{pl}{q-l} \left\{ 1 - \frac{l}{q} \left(\frac{pl}{qm} \right)^{n-1} + \left(\frac{pl}{qm} \right)^{k+n-1} \right\} \quad (7)$$

また，リトルの公式を用いて，本線，副線の平均通過遅れ時間 T_1, T_2 は， $T_1 = L_1/l, T_2 = L_2/p$ で与えられる．但し，これらは， $\rho < 1$ に限定した結果である．

4.3 $\rho \geq 1$ の解析

前述したように本モデルの平衡条件は $\rho < 1$ である． $\rho \geq 1$ の範囲では，解が発散してしまうため極限状態確率が求められない．しかし，実際の交通システムにおいて，一時的にこのような状況となることもある． $\rho \geq 1$ の混雑した状況では，極限状態において副線の待ち台数は発散してしまうが，本線の待ち台数は制限が設定されているため， k 台または $(k-1)$ 台となる．したがって，本線の待ち台数のみの状態を考えればよい．この確率を P_k, P_{k-1} とすれば，

$$P_k + P_{k-1} = 1 \quad (8)$$

が成立する．また，極限状態確率分布 P は，

$$P = [P_k P_{k-1}] \quad (9)$$

と定義できる．(4) 式，(8) 式，(9) 式より，

$$P_k = \frac{l}{m} P_{k-1} \quad (10)$$

となる．よって，

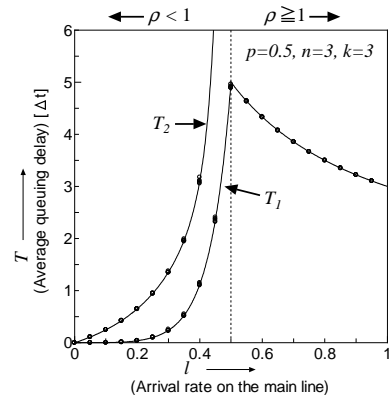


Fig. 2: Numerical examples of average queuing delay.

$$P_k = l, P_{k-1} = m \quad (11)$$

が得られる．上式から， $\rho \geq 1$ の平均待ち台数 L_1 は，

$$L_1 |_{(\rho \geq 1)} = k - m \quad (12)$$

と求められる．また，平均通過遅れ時間 T_1 は，前節と同様に $T_1 = L_1/l$ で求められる．

5. 考察

Fig.2 に $p = 0.5, n = 3, k = 3$ とした場合の l に対する T_1, T_2 の数値計算結果およびシミュレーション値を示す．Fig.2 において，実線は理論値，印はシミュレーション値を示している．シミュレーションは，シミュレーション時間を 50 万 Δt とし，同じ l の値に対して乱数の初期値を変え，それぞれ 5 回ずつ行った．計算例では， $p = 0.5$ のため， $l \geq 0.5$ の範囲では， $\rho \geq 1$ となる．

Fig.2 より，理論値とシミュレーション値はよく一致している．また， $\rho \geq 1$ の範囲に着目すると， T_1 は $\rho = 1$ で最大となり， ρ が大きくなるにつれて減少している．これは， $\rho \geq 1$ の範囲では，本線に車両が到来すれば制限値を超えるため合流し，到来しなければ制限値に満たないため待たされる．したがって，到来頻度が高くなるほど，本線の車両が合流しやすくなることから，待ち時間は減少している．

6. むすび

本論文は，副線の待ち台数によっては，本線の車両を待たせる合流制御方式を採用した PRT システムの合流部の解析を行った．その結果，トラヒック密度 ρ が 1 を超える場合の，平均待ち台数や平均通過遅れ時間を定量的に表すことができた．今後の課題は，平均通過遅れ時間の本線と副線の比を，任意に設定できる本線制限値 k や副線しきい値 n の値を導出することである．

参考文献

- [1] 荒屋真二：「新交通システムと自動運転制御」，電子通信学会誌，64, 1, pp. 43-49 (1981-1)
- [2] 関根栄子，浜松芳夫：「個別輸送システムの車両の合流制御と 2 重待ち行列の解析」，電学誌論 D, 119, 12, pp.1543-1548, (1999-12)
- [3] 曹凱，松田降太，矢野陽平，浜松芳夫：「個別輸送システムにおける 2 重待ち行列の解析と合流制御戦略」，電学誌論 D, 125, 6, pp.645-652, (2005)