

個別輸送システムの通過遅れ時間を考慮した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 Consider with queuing delay on PRT System月岡 弘孝¹, 星野 貴弘², 浜松 芳夫²*Hiroataka 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 for merging consider based on the queuing delay. Therefore, queues are formed on the main line and sub line, respectively. We discuss the characteristics of the merging control strategy considering the queuing delay.

1. はじめに

本研究は、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、常に非優先路側のみ生じる。このような状況を改善するため、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^[2]。しかし、文献^[2]では、合流部における輻輳現象の解析を行っており、合流制御戦略の検討は行われていなかった。混雑した状況が発生しやすい合流部の合流制御戦略を検討することは、システムを実現する観点からも重要な課題である。このような観点から、システムの柔軟性を考慮し、合流部を通過する際の通過遅れ時間の比率 (優先路上の平均通過遅れ時間: 非優先路上の平均通過遅れ時間) を任意に調整する合流制御方式の検討を行った^[3]。しかし、非優先路側の待ち台数のみによって制御を行っていたため、通過遅れ時間の比率を調整することが困難となる場合もあった。本論文では、非優先路側の待ち台数だけでなく、優先路側の待ち台数も考慮した制御を行った場合の検討を行う。

2. 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。点追従制御方式では、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。また、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 に本研究で扱う合流部モ

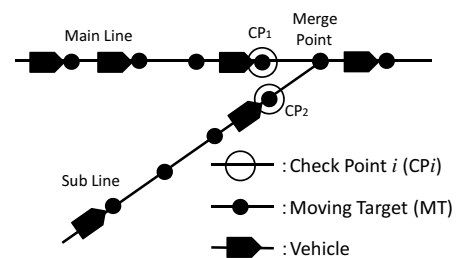


Fig. 1: Schematic diagram of the merging section.

デルの概略図を示す。優先路である本線 (Main Line) 上と非優先路である副線 (Sub Line) 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・1 > 合流制御方式 通常、車両の競合が起こった場合、本線上の車両を優先して合流させるため、副線にのみ待ち行列が形成される。この状況を改善するため、副線の待ち台数にしきい値 (n 台) を設定し、このしきい値以上になる場合には、副線 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。ただし、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・2 > 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 とし、到来しない確率を $m (= 1 - l)$ 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. 解析

マルコフ連鎖の手法により数理モデルを構築する。本研究では、 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、本線の待ち台数が i 台、副線の待ち台数が j 台である時、これを状態 (i, j) と定義する。

1: 日大理工・院・電気 2: 日大理工・教員・電気

< 3・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 $P_{i,j}$ で表すと、極限状態確率分布 P は、

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

と定義できる。また、推移確率行列を R とすれば、極限状態確率 $P_{i,j}$ は以下の (2), (3) 式より算定できる。

$$P = PR \quad (2)$$

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

< 3・2 > 平均通過遅れ時間 極限状態確率 $P_{i,j}$ を用いて、本線、副線の平均通過遅れ時間 T_1, T_2 は、それぞれ次式で与えられる。

$$T_1 = \frac{p}{q-l} \left(\frac{pl}{qm} \right)^{n-1} \left\{ \frac{l}{q} - \left(\frac{pl}{qm} \right)^k \right\} \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{l}{q-l} \left\{ 1 - \frac{l}{q} \left(\frac{pl}{qm} \right)^{n-1} + \left(\frac{pl}{qm} \right)^{k+n-1} \right\} \quad (5)$$

4. 合流制御戦略

本線と副線の通過遅れ時間を、任意に調整するための副線しきい値 n と本線制限値 k の検討を行う。合流部を通過する際の本線と副線の通過遅れ時間の比率を任意とするため、変数 α を用いて、

$$T_1 : T_2 = 1 : \alpha \quad (6)$$

とする。ただし、 $\alpha > 0$ とする。(6) 式を変形すると、 $\alpha = T_2/T_1$ となる。以降、この α を目標通過遅れ時間比率と呼ぶことにする。以前の報告 [3] では、本線の制限値を $k \rightarrow \infty$ とした際の目標通過遅れ時間比率に最も近づく副線しきい値 n_{opt} を明らかにした。しかし、副線側の待ち台数のみにより制御を行っているため、副線の到来確率 p が小さい場合、通過遅れ時間比率を調整することが困難となる場合もあった。

そこで、副線しきい値 n だけでなく、本線制限値 k の値も用いて合流制御した場合との比較を行う。(4), (5) 式を用いて、(6) 式を n について解けば、

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

と求められる。上式に設定可能な整数値 k を代入し、得られた n の値に対して、非負整数となるよう丸め処理を行う。この操作により得られた全ての (n, k) の組み合わせに対して、通過遅れ時間比率を計算し、最も目標比率に近づく (n, k) の組み合わせを n_{opt}, k_{opt} とする。

< 4・1 > 数値計算例および考察 Table.1 に、文献 [3] において通過遅れ時間比率の調整が困難であった $p = 0.3$, $l = 0.6$, 目標比率 $\alpha = 2$ に対する、(7) 式及び丸め処理により与えられる (n, k) の組み合わせと、通過遅れ時間比率を示す。Table.1 より、副線のしきい値のみで制御

Table. 1: Control of queuing delay ratio. ($\alpha = 2$)

k (Main line)	n (Sub line)	Delay ratio α
1	0	6.0000
2	0	1.8621
3	1	1.3814
4	2	2.5328
5	2	2.1629
6	2	1.9553
∞	2	1.6296

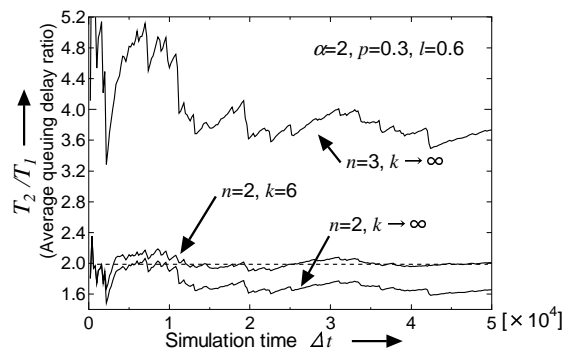


Fig. 2: Simulation result

する場合は、 $n_{opt} = 2$ と求められ、本線の制限値も用いて制御する場合は、 $n_{opt} = 2, k_{opt} = 6$ となる。

Fig.2 に Table.1 の値で合流制御した場合のシミュレーション結果を示す。副線のしきい値 $n = 2$ だけで制御する場合は、Fig.2 の様に目標比率に対する差が大きく、 $n = 3$ としてしまうとさらに差は広がってしまう。これに対し、本線の制限値も用いて制御する場合は、目標比率に対する差は 1 万 Δt 以降では 0.1 以内であった。したがって、操作量として副線しきい値だけでなく、本線制限値を用いることで、より柔軟に目標比率へ調整できることが明らかになった。しかし、副線上の到来確率 p がさらに小さい場合、副線側の待ち台数によって優先路を切り替えるため、通過遅れ時間比率を調整することが困難となる場合もある。そのため、本手法を用いる際は、この点を考慮する必要がある。

5. まとめ

本研究は、副線しきい値 n だけでなく、本線制限値 k も用いた合流制御を採用した PRT システムの合流部の解析を行った。その結果、副線しきい値 n だけで合流制御を行った場合に比べ、より柔軟に合流部を通過する際の通過遅れ時間比率を調整可能であることを示すことができた。今後の課題は、平均通過遅れ時間だけでなく、待ち時間分布を考慮した合流制御について検討を行う。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] 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」, 電学論 D, 125, 6, pp.645-652, (2005-6)
 [3] 月岡弘孝, 星野貴弘, 浜松芳夫:「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」, 平成 24 年電気学会全国大会講演論文集, pp.387-388, (2012)