

電子連結車両を用いた末端交通システムのための モデル検査法によるスケジューリング手法

清水 圭太[†]

筑波大学情報学群情報科学類[†]

長谷部 浩二[‡]

筑波大学システム情報系[‡]

1. 研究の背景と目的

近年、都市間などの長距離を結ぶ基幹的な公共交通システムに対して、それを補完する短中距離を結ぶ末端交通システムの開発が広く行われている。しかし、末端交通システムでは乗降先が複雑になり、その結果、旅客の乗り換えに時間がかかることで輸送の速達性が失われてしまうという課題が存在する。

こうした課題に対して、Hasebe らは論文[1]にて電子的に複数の車両が連結することで、隊列走行可能な末端交通システムを提案した。この交通システムの特徴は、複数の車両が車列を随時再編成することで旅客を目的地まで乗り換えさせることなく輸送できる点である。このような交通システムのスケジューリングは、運行管理用サーバにより定期的に行われることが想定されている。しかし、このような交通システムは、末端交通システムの特徴に加え、車両の隊列の編成という要素が加わることで組み合わせが非常に複雑になるため、一般にスケジューリングは容易な作業ではない。

これまで提案されてきたスケジューリング手法の一つに、モデル検査法を用いたものがある。モデル検査法は、システムが満たすべき性質を与えると、システムが取りうるすべての状態を網羅的に探索することにより、その性質が成立するかどうかを判定するものである。もしその性質が成立しない場合は、具体的な反例が生成される。

論文[2]では、実際にタスクに対してスケジューリングをモデル検査法で行う手法について述べている。しかし、車両を頻繁に再編成するようなシステムをモデル検査法によってスケジューリングを行うことの適用可能性は示されていない。そこで、本研究では、モデル検査器の1つで、同期システムを簡単な言語で記述できる NuSMV の後継のツールである nuXmv [3] を用いて、有界モデル検査により、末端交通システムをスケジューリングする手法について提案する。

2. 交通システムのモデル

2.1 運行経路ネットワーク

以下で、本研究で対象とする交通システムについて、論文[1]をもとに概観する。末端交通システム

も既存の交通網と同様に、旅客の乗降地点とその乗降地点間を結ぶ運行経路で形成される。これを運行経路ネットワークと呼ぶ。運行経路ネットワークの例を図1に示す。また、今回扱う交通システムは、乗降地点において隊列の再編成を行うことができる。このような乗降地点を結節点と呼ぶ。結節点に1度に停車できる車両数には上限がある。また、結節点から別の結節点に移動するのにかかる時間は、図1の括弧内の数字で表されている。

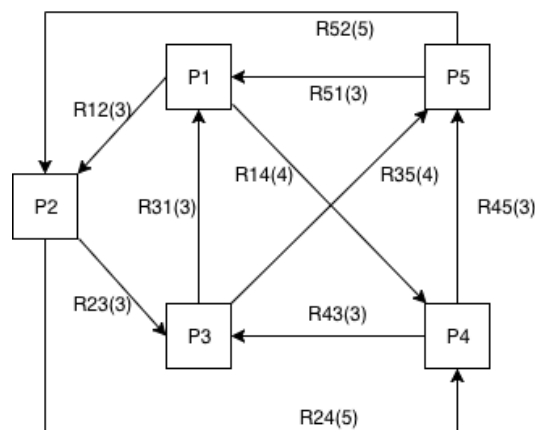


図1 運行経路ネットワークの例

2.2 電子連結車両

この交通システムにおいて、車両は電子的な連結により隊列走行を行うことができるという特徴を持つ。車両は運転手による操縦で隊列の先頭を走行する先導車と、先導車に追従することで無人走行を行う後続車の2種類に分類される。また、先導車が1度に連結できる後続車の数には上限があり、制限内で先頭車が任意の後続車を随時選択し、車両の隊列の編成を行い、旅客の輸送を行う。また、旅客の乗降および隊列の再編成に2単位時間かかるものとする。本研究では先導車を HA, HB, HC の3台、後続車を T1, T2, ..., T5 の5台を図1の運行経路ネットワークに配置する。

2.3 運行ルート

本研究では先導車の運行ルートを固定し、スケジューリングによって後続車の運行ルートおよび各車両の移動のタイミングを求めるものとする。先導車の運行ルートを表1に示す。ここでは表1内の先頭の結節点を各先導車の初期位置とする。後続車の初

Scheduling by Model Checking for Last-Mile Transportation Systems with Platooning Vehicles

[†]Keita Shimizu, University of Tsukuba, College of Information Science

[‡]Koji Hasebe, University of Tsukuba, Faculty of Engineering, Information and Systems

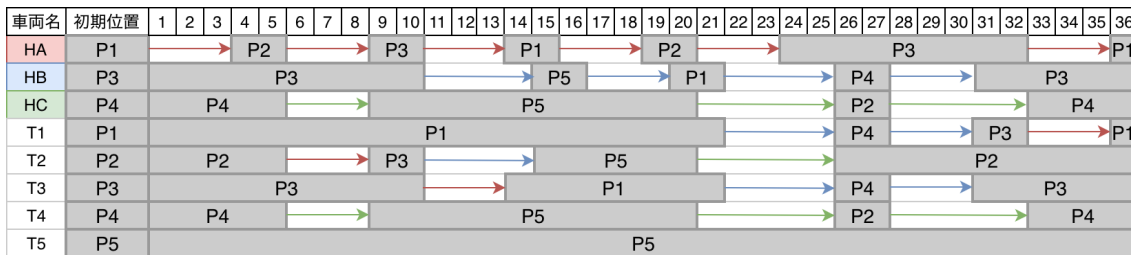


図 2 運行スケジュール

期位置は、T1 を P1, T2 を P2, T3 を P3, T4 を P4, T5 を P5 とする。

表 1 先導車の運行ルート

先導車名	運行ルート
HA	P1 → P2 → P3 → P1
HB	P3 → P5 → P1 → P4 → P3
HC	P4 → P5 → P2 → P4

3. モデル検査法によるスケジューリング

本研究で提案するスケジューリング手法では、まず、スケジュールが満たすべき条件の連言の否定を表す論理式モデル検査法で検証し、反例が出るかを確認する。もしも反例が生成された場合、その反例は与えられた条件の否定の否定、すなわち条件を満たした実行過程であり、求めるべきスケジュールとみなすことができる。また、本研究ではモデル検査器として nuXmv の有界モデル検査を用いる。有界モデル検査は初期状態から決められた遷移数までのモデル検査を行う手法である。また、遷移数が少ない方から検証を行い、反例が出ると同時に検証を終了するため、最も短いスケジュールのうちの 1 つを得ることができる。

4. 検証結果

本研究では、スケジュールが満たすべき条件として以下の (1)~(3) の連言を考える。

- (1) 常に全ての先導車が牽引している後続車の数は 2 台以下である。
- (2) 常に全ての結節点で 1 結節点に停車している車両の数は 5 台以下である。
- (3) 中央サーバが獲得した旅客の移動需要を満たす。

図 1 のモデルに対し、上記の 3 項目の論理積の否定の式を検証した結果、図 2 のようなスケジュールを得ることができた。図 2 において、初期位置より右の数字が時間の経過を表す。また、後続車の移動の矢印の色は、牽引されている先導車を表す。図 2 より、T5 が 1 回も動いていないことから、本交通システムでは後続車は T1~T4 の 4 台のみ用意すれば

いいことがわかる。しかし、車両間で結節点における 1 度の滞在時間のばらつきが激しく、速達性が最適かは分からない。そのため、結節点における滞在時間を制限するなど、スケジュールの条件を見直すことで速達性が最適であるかを検証する必要があると考えられる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、モデル検査法の有界モデル検査を用いることで状態が複雑になりやすい電子連結車両を用いた端末交通システムのスケジューリングを行うことができた。

今後の課題としては、研究で扱わなかったいくつかの条件を加えることが挙げられる。具体的には任意の 2 結節点間を乗り換えなしで移動できるといった性質である。また、一般に今回の検証で用いたモデルの状態数は、結節点の数を P 、運行経路の数を R 、移動時間の最大値を T 、車両の数を V とすると、おおよそ $((P + R) * T)^V$ となり、車両の台数に対して指数関数的に増加してしまう問題がある。そのため、モデルを拡張し、車両の台数を増やすと現実的な時間での検証ができなくなる状態爆発を引き起こす可能性が存在する。実際に、結節点が 8 のモデルに車両 14 台を配置して検証を行なったところ、数日経過しても検証が終了しなかった。今後は、状態爆発を抑えるため、大きな交通システムに対し、モデルを分割してスケジューリングを行う手法について取り組む予定である。

参考文献

- [1] K. Hasebe, et al. "Traffic Management for Last-Mile Public Transportation Systems Using Autonomous Vehicles," *ISC2 2017*, 8 pages, 2017.
- [2] G. Behrmann, et al. "Optimal Scheduling Using Priced Timed Automata," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 32, no. 4, pp. 34-40, 2005.
- [3] R. Cavada, et al. "The nuXmv Symbolic Model Checker", *In: CAV*, pp. 334-342, 2014