

## 2 車種混合によるバス時刻表最適化問題の計算技術

申請中 筑波大学システム情報工学研究群 \*大沼悠人 ONUMA Yuto  
01703540 筑波大学システム情報系 吉瀬章子 YOSHISE Akiko

### 1. はじめに

昨今、我が国のバス事業は少子高齢化の影響を受け、労働人口不足が深刻化している。中でもバス運転手不足が喫緊の課題となっている。その一方で、利用者に質の高いサービスを提供する役割も果たさなければならない。バスの利用者にとって最も不満を感じるポイントはバスの遅延である。そのためバス事業者にはバスの増便や時刻表の変更が求められるが、人不足のため、このような課題への対処が難しくなっている。そこで注目されているのが、近年の車両センシングや人工知能、通信の発展に伴い開発が進められている自動運転車 (Autonomous Buses, 以下 AB) である。自動運転車導入の最大のメリットは運転手が必要ないため、人的リソースを割かなくて良いということである。したがって、今後市場導入されることが予想されているが、しばらくは従来の人が運転するバス (Human driven Buses, 以下 HB) との混合 2 車種で使用されることが予想される [1]。そこで本研究では車種の決定と時刻表の作成という二つの問題を利用者の待ち時間の最小化の観点から解決するための手法を提案する。

### 2. 手法

本研究では、本学の循環バスを対象とし、バスの待ち時間に関する不満を解消することができる時刻表の作成を行う。このようなバス輸送計画問題は、[2] で提唱された時空間ネットワークに基づいて定式化することができる。これは道路網や鉄道網などのネットワークに時間軸を加えて拡張したもので、本研究対象をこれを用いて表すと図1のようになる。この図では簡単化のために10分毎に時間ノードを縮約して記載しているが、本研究では遅延を考慮する必要があるため、1分毎に時間ノードを設定しなければならない。これが原因で1日の時刻表を一括で最適化しようとすると変数数や制約数が時間ノードに依存して増加してしまい、PCのメモリを超え、計算不可能となってしまう。

そこで本研究では、従来の時空間ネットワークを1時間毎に切り分け、階層構造を持たせることでリンク数を削減した新しいネットワーク構造を提案する (図2)。これは、1時間毎に切り分けた隣合う二つの階層を時刻ノードによって繋ぐ構造になっている。そのため、従来の時空間ネットワークでは、ある時間ノードからそれ以降の全ての時間ノードに対してリンクを設ける必要があったが、この階層型時空間ネットワークでは時刻ノードへのリンクを1つ設定すれば十分となるため、大幅にリンクを削減することができる。さらに、時刻ノードによって全体的なネットワークフローを保持しているため、従来法と同様に全体最適について言及することも可能となっている。

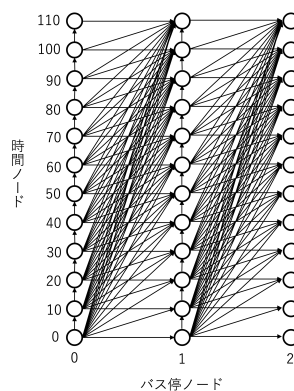


図1: 従来法

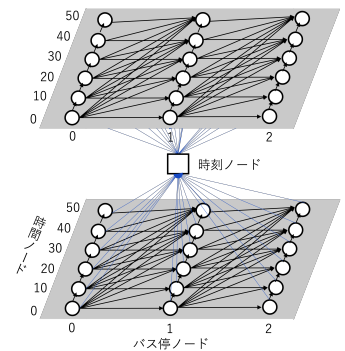


図2: 提案手法

### 3. 実験

#### 3.1. 実験設定

本研究で対象としている循環バスには1周に全29個のバス停があり、1日42台のバス枠が設けられている。また、稼働時間は6時から23時までの17時間である。よって、少なくともバス枠42台、バス停数29個、時間幅1020分とパラメータを設定したときに実行可能であるだけの頑健さがモデルには要求される。

そこで、次のような実験を行う。まず従来法と

提案手法のそれぞれに基づいた定式化を行う。そして、パラメータの増加に伴い、変化するモデルの制約数や変数数によってプログラムの計算の可否を観察し、二つのモデルの結果を比較していく。ここで言うプログラムの計算不可能な状況とは、プログラムの実行中にPCのメモリを超えてしまうことで計算が続行できないことを指す。また、実験環境として、計算機は Windows 10 Pro, CPU: Intel(R)core(TM)i7-6700, メモリ: 16GB のものを用い、最適化ソルバーは Gurobi Optimizer 9.0.2 を使用している。

### 3.2. 結果

バス停数を 29 個に固定し、その他のパラメータを変化させた結果が以下の表 1, 2 である。まず従来法では、時間幅を 60 分増加させるだけで制約数、変数数ともに大幅な増加が見られ、240 分で設定するとメモリエラーを起こしてしまっていた。一方、提案手法では、与える時間幅を 2 倍に増加させても制約数や変数数に大幅な増加は観察されない。また、本来考えたいパラメータセット以上の大きさに設定したとしても計算可能であるという結果が得られ、増便や稼働時間の延長などについての数値実験を行う基盤となり得ることを示した。

表 1: 従来法におけるパラメータの変化と計算可能性

バス枠	時刻	制約数	変数数	計算可能性
10	120	526136	44212	計算可能
10	180	3099440	103067	計算可能
10	240	8521691	161934	計算不能

表 2: 提案手法におけるパラメータの変化と計算可能性

バス枠	時刻	制約数	変数数	計算可能性
10	120	80229	39970	計算可能
10	240	84533	41463	計算可能
50	1080	527349	229831	計算可能

### 4. 実用化へ向けた計算の工夫

実験より、本研究で扱いたいパラメータのサイズに対してプログラムを実行することは可能になっ

た。しかしながら、使用ソルバーである Gurobi が分枝限定法により求解している間に所持している目的関数値の上限と下限の差を表す Gap が非常に高い値を示しており、とても社会実装できるレベルではない。そこで本研究では、解の質についても言及し、最適性が保証できる範囲で最適な時刻表を得るための計算フローも併せて提案する。それぞれの詳細な説明は当日に行うが、2つの取り組みを行った。一つ目が問題の簡素化である。まず目的関数は利用者の総待ち時間を考え、これを最小化していたが、乗車需要の均等化とした。また、循環ルートにおける最初のバス停の発車時刻だけはきりがいい数字で設定されていることから、最初のバス停における時間ノードのみ 5 分ごとに縮約した。二つ目が問題の切り分けである。先の実験は時刻表作成と車種決定の同時最適化を目指したものであるが、一方の車種に固定した上で時刻表を作成し、作成された時刻表において車種を決定するとしても二つの問題に対してアプローチできる。これら二つを行うことで、全体最適性は失われるものの、実験データでは Gap0% と質の良い解を得ることができ、実用化に近づけることができた。

### 5. おわりに

本研究は従来の時空間ネットワークと階層型時空間ネットワークのそれぞれに基づく二種類の定式化を行い、その比較実験から、提案手法に基づく定式化がモデルとして頑健であるということを示すことができた。そして、さらに問題の簡素化と二段階最適化による計算フローを踏むことによって現実的な計算結果を得ることができるとことを示した。

### 参考文献

- [1] Dai, Z., Liu, X. C., Chen, X., & Ma, X. (2020). Joint optimization of scheduling and capacity for mixed traffic with autonomous and human-driven buses: A dynamic programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 598-619.
- [2] 田口東. (2005). 首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル. *日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌*, 48, 85-108.