

異種車両連携を考慮する経路計画問題のための整数計画法

豊田中央研究所 *大滝 啓介 OTAKI Keisuke
早川 敬一郎 HAYAKAWA Keiichiro
小出 智士 KOIDE Satoshi
大社 綾乃 OKOSO Ayano
西 智樹 NISHI Tomoki

1. 背景

近年 MaaS (Mobility as a Service) と呼ばれるコンセプトが注目されており、MaaS では応用毎に様々な最適化が必要であり、例えばライドシェアでは、車両の待機場所や顧客への訪問経路、相乗り方法などを最適化することで、車両移動コストや顧客の待機時間を削減できる [1,3]. これらの交通環境における最適化では、一般に複数車両に関わる意思決定が必要となる。そのため本稿でも複数車両の経路を同時に最適化する問題を扱う。

例えば N 台の重車両が移動する状況における総移動コスト最小化問題を考える。各車両が独立して移動する場合には最短経路を経由することが望ましい。一方で車両が隊列 (platoon) を形成する場合、燃料消費が削減されることが知られており、この効果を想定した経路計画は車群経路計画 (Vehicle platooning problem; VPP) と呼ばれ、次のような IP 実装が提案されている [2,4]. 二値変数 $x_{u,v,n} \in \{0,1\}$ によって、車両 $n \in [N]$ が辺 (u,v) を移動するかどうかを示す。辺 (u,v) の単独移動コストを $w_{u,v}$ で表し、目的関数は $\min \sum_{(u,v) \in E} w_{u,v} g_{u,v}$ で表される。ただし $g_{u,v} := b_{u,v} + \eta \times \{(\sum_{n \in [N]} x_{u,v,n}) - b_{u,v}\}$, $b_{u,v} := \bigvee_n x_{u,v,n}$ は燃料消費が η 倍に削減される効果を表す。

VPP では単一車両を想定するため、複数車種の場合に対応できない。例えばトラックやドローンが連携する場合や、複数機能・能力の車両が連携する経路計画問題を表現できない。そこで我々は VPP を一般化させた異種車両連携を考慮する最適化問題 (Palette platooning problem; PPP) を定義した [5]. 最適化問題 PPP は、VPP と共に NP 困難であるため、大規模な問題を解くためには発見的解法が重要となる。しかし発見的解法自体を評価するために厳密解が必要になる場面も多く、我々は整数計画ソルバーを用いてアプローチをしている。

2. 問題

交通環境をモデル化した重み付き有向グラフを $G = (V, E, w)$ で表す。本稿ではトラックなどを想定した大車両 L と、小型の配送車両やドローンを想定した小車両 S の二種類を扱う。大車両と小車両は、それぞれ N_L 台と N_S 台存在し、識別子 $l \in [N_L]$ と $s \in [N_S]$ で表す。個別の車両は、移動サービスを表現する単一のリクエスト $r = (o, d) \in V \times V$ を持ち、 o から出発して d へ移動することが目的である。そのため頂点 o から出発し d へたどり着く経路を、リクエスト r を達成する充足経路と呼び、与えられた全車両のリクエストに対する充足経路の集合が経路計画問題の解である。

問題 1 (PPP [5]). 小車両と大車両の移動リクエスト $\mathcal{R}_S = \{r_1^{(S)}, \dots, r_{N_S}^{(S)}\}$ と $\mathcal{R}_L = \{r_1^{(L)}, \dots, r_{N_L}^{(L)}\}$ を充足する経路のうち、以下のコスト関数を最小化する経路 \mathcal{P} を計算する最適化問題を PPP と呼ぶ。

$$c(\mathcal{P}) = \sum_{(u,v) \in E, T_1 \in \{L,S\}} w_{u,v} g_{u,v}^{(T_1)}$$

$$g_{u,v}^{(T_1)} = \#(\text{車種 } T_1 \text{ が親})$$

$$+ \sum_{T_2 \in \{L,S\}} \eta^{(T_1 T_2)} \#(\text{車種 } T_2 \text{ が親 } T_1 \text{ と連携}) \quad (1)$$

式 (1) は次のように解釈される。二種類の車両 L, S に対して、連携の親となる車種と子になる車種を考え、組合せ **LL/LS/SL/SS** を用意する。例えば VPP であれば、隊列の先頭車両は空気抵抗の影響を受ける親であり、後続車両はその子と解釈される **LL** の連携である。例えば組合せ **LS** の具体的な意味として、大車両 L の荷台に小車両 S が乗り込むことで移動コストが削減されるような連携を考える。最適化問題 PPP は、想定される連携からコスト最小な連携と、連携を達成できるような経路を選択する問題である。

これまでに我々は、**LS** のみを有向化した IP として **LS-IP-NA** と **LS-IP-A** を検討してきた [5]. 本

稿では更に一般化を行い、2車種の全組合せを全て考慮した PPP-IP を提案する。

3. 整数計画ソルバーによるアプローチ

PPP-IP では経路だけではなく、車両同士が連携するかないかを二値変数で表し、これを同時に最適化する。大車両 $l \in [N_L]$ もしくは小車両 $s \in [N_S]$ が、辺 $(u, v) \in E$ を通るか通らないかを決定する二値変数として $f_{u,v,l}^{(L)}$ と $f_{u,v,s}^{(S)}$ を用いる。また種類 $T \in \{L, S\}$ である車両 $n \in [N_T]$ について、3つの二値変数 $L_n^{(T)}, FL_n^{(T)}, FS_n^{(T)} \in \{0, 1\}$ を用意し、もし車両 n が連携の親である場合には $L_n^{(T)} = 1$ とする。車両 n が連携の子となる場合には、 $FL_n^{(T)} = 1$ によって LT 連携を選択し、逆に小車両の親と連携する場合には $FS_n^{(T)} = 1$ によって ST 連携を選択する。我々の IP はこれらを利用し、式 (1) 中の $g_{u,v}^{(T)}$ を式 (2) の形で定義する。なお IP ソルバーを利用する際には、容量制約と役割の排他性を制約として課す。

$$g_{u,v}^{(T)} := \sum_n L_{u,v,n}^{(T)} + \eta^{(LT)} FL_{u,v,n}^{(T)} + \eta^{(ST)} FS_{u,v,n}^{(T)} \quad (2)$$

$$L_{u,v,n}^{(T)} + FL_{u,v,n}^{(T)} + FS_{u,v,n}^{(T)} = f_{u,v,n}^{(T)} \quad (3)$$

$$\sum_{n_1 \in [N_{T_1}]} L_{u,v,n_1}^{(T_1)} Q^{(T_1 T_2)} \geq \sum_{n_2 \in [N_{T_2}]} FT_{2,u,v,n_2}^{(T_1)} \quad (4)$$

$$\sum_v f_{u,v,n}^{(T)} - \sum_v f_{v,u,n}^{(T)} = \begin{cases} 1 & \text{if } u = o_n^{(T)} \\ -1 & \text{if } u = d_n^{(T)} \\ 0 & \text{o/w} \end{cases} \quad (5)$$

ここで式 (3) は親・子の役割の排他性を、式 (4) は容量制約を、式 (5) はリクエストに対する充足経路がフロー保存を満たして正しく計算されることを意味している。

4. 数値実験による IP インスタンスの検証

提案した IP インスタンスを人工グラフ上のランダムなリクエスト群に対して適用する。実験は Intel Core i7-3770K (3.50GHz) の CPU, 32GB のメモリを備える PC を用いて実施した。IP ソルバーには Gurobi 8.1.1 を用いて、インスタンスの具体的な実装は Python 3.5.2, Julia 0.7 を用いた。

実験では $(N_L, Q_i^{(LS)})$ のラベルを利用して問題例を表現する。例えば $(N_L, Q_i^{(LS)}) = (2, 3)$ は、大車両が2台、それぞれの容量が3台分であり、小車両は6台 (= 2 × 3) 用意する問題を意味する。実験では、頂点位置にノイズを付与した 10 × 10 の格子グラフを作成し、グラフの頂点对をランダムに選択してリクエストと見なして実験を行う。

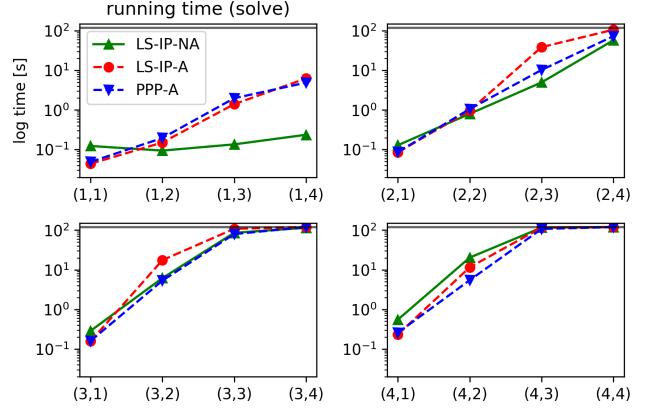


図 1: IP の計算時間比較

問題例として $(N_L, Q_i^{(LS)}) \in [4] \times [4]$ となる例をそれぞれ 20 問作成して、解を得るために必要だった計算時間の平均を求める。計算時間は 120 秒を上限とした。図 1 に結果を図示する。横軸は問題ラベル、縦軸は計算時間の対数である。今回のランダムなリクエストに対しては、3つの IP インスタンス (LS-IP-NA, LS-IP-A, PPP-IP) を比較しても、計算時間に大きな差は見られなかった。一つの理由として、Gurobi が IP インスタンスの事前計算を実施することで、結果として似たような問題を解くことになっている可能性がある。

5. まとめ

異種車両連携を考慮する経路最適化に対する IP を用いたアプローチについて概説した。実験結果と IP については発表で詳しく報告する。

参考文献

- [1] N. Agatz, A. Erera, M. Savelsbergh, and W. Xign. Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *EJOR*, 223:295–303, 2012.
- [2] C. Bonnet and H. Fritz. Fuel consumption reduction in a platoon: Experimental results with two electronically coupled trucks at close spacing. Technical report, SAE Technical Paper, 2000.
- [3] M. Furuhata, M. Dessouky, F. Ordóñez, M.-E. Brunet, X. Wang, and S. Koenig. Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *TRP-B*, 57:28–46, 2013.
- [4] E. Larsson, G. Sennton, and J. Larson. The vehicle platooning problem: Computational complexity and heuristics. *TRP-C*, 60:258–277, 2015.
- [5] 大滝, 早川, 小出, 大社, 西. 異種車両連携を考慮する経路計画における整数計画法. 第 33 回人工知能学会全国大会 (JSAI2019), 2019.