

動的ネットワークにおける共有型自動運転車の最適運用問題

Optimal Operation Problem of Shared Autonomous Vehicles in Dynamic Networks

北海道大学工学部	○学生員	難波智也 (Tomoya Namba)
北海道大学大学院工学院	学生員	新田 翔 (Sho Nitta)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	峪 龍一 (Ryuichi Tani)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

カーシェアやライドシェアといった交通におけるシェアリングは世界的に普及が進んでいる。日本国内における認知度は諸外国と比較すると低い水準にあるが、その市場規模は拡大傾向にある¹⁾。

一方、自動運転は人間のコントロールの必要性に応じてレベルが区分されている。現在では高速道路などの特定の場所で一部の操作が自動化されるレベル3までの導入が進んでいる。将来的には人間のドライバーによるコントロールが一切必要ないレベル5の完全自動運転システムが実現されると考えられている²⁾。

シェアリングの普及と自動運転技術の発達により、自動車の所有者が利用しない間は他人に貸し、利用したいときに自動車と呼び出して利用する、ということが可能になる。そこで本研究では、地域が自動運転車を所有するものとし、人々は移動したいときにそれと呼び出して利用する状況を考える。この自動運転車は、渋滞を考慮したうえで利用者を最短で目的地まで運ぶ経路を走行する。これにライドシェアの要素を取り入れると、自動運転車は個人利用にとどまらず、公共交通サービスの側面も持ち合わせた移動手段となる。

このような共有型自動運転車両に関する研究はいくつか存在する。瀬尾ら³⁾は共有型自動運転車両の運用とインフラ設計等を最適化する手法を提案した。愛甲ら⁴⁾は混雑を考慮せず、共有型自動運転車両の経路決定モデルを提案した。

また、ライドシェアを想定して経路を決定する問題は様々な問題設定で研究されている。中内⁵⁾は Kinematic Wave(KW)理論に基づくライドシェア避難モデルを提案した。中内のモデルはネットワークにおいて交通需要が与えられており、KW 理論に基づき渋滞を考慮した上で総移動時間が最小化される自動車の経路選択問題である。このネットワークのリンク上には自動車を運転できない要援護者が存在しており、車両はそのリンクを通過することで要援護者をピックアップすることができる。しかし中内のモデルではライドシェアの有無は表現できるが、車両の乗車人数は表現できない。共有型自動運転車の運用においては一台当たりの定員に限られているため、車両に乗車する人数を記述することも重要である。また中内のモデルにおいて、車両は避難所に到達することを目的としているため、目的地の指定ができていない。

そこで本研究では中内のモデルを拡張し、各車両に乗車する人数を表現し、かつ目的地を指定して、渋滞を考

慮した動的配車配送問題および動的ライドシェアのマッチング問題を解くモデルを提案する。

2. 問題設定

2.1 概要

本章では本研究で用いるモデルについて説明する。本モデルは、ある一方向への交通需要が大きい通勤行動などを想定している。利用者はそれぞれネットワークのリンク上で車両を待機しており、各車両がそのリンクを通過すると利用者は車両に乗車できる。この時、渋滞を考慮した上で、利用者の総移動時間が最小となる車両の経路選択を考える。

2.2 Dynamic Network Loading

本研究では中内の避難モデルと同様に Kinematic Wave (KW) 理論を用いて交通流を表現する。また、Han et al.(2016)⁶⁾、Han et al.(2019)⁷⁾によって提案された変分理論に基づく Link Transmission Model (LTM)によって交通量配分計算を行うものとする。

KW 理論は「車両数の保存則(連続式)」と「Fundamental Diagram(FD)」の2つの要素からなる。本稿ではFDとは流率密度関係のことを意味するものとする。FDは交通流観測から経験的に得られている交通量と密度の関係であり、交通量が交通密度に関する凹関数となる。本研究では多くの既往研究と同様に図1に示す三角形のFDを仮定する。ここで最大交通量をリンク i の交通容量 C_i 、最大交通量を実現する密度を臨界密度とする。また交通密度が臨界密度より小さい状態を自由流状態、臨界密度より大きい状態を渋滞流状態と呼ぶ。

LTMは時刻 t における累積流入交通量と累積流出交通量の関係から、時刻 $t+1$ にリンクから流出できる最大交通量(以下 Demand)とリンクに流入できる最大交通量(以下 Supply)を求める手法であり、Daganzo⁸⁾により提案された Cell Transmission Model(CTM)よりも計算コストが小さく、精度も高いと知られている。

また、LTMをネットワーク拡張したことに伴う分流や合流といった境界条件は、Han et al.(2016)⁶⁾によって提案された Riemann Solver(以下 RS)を用いて計算する。

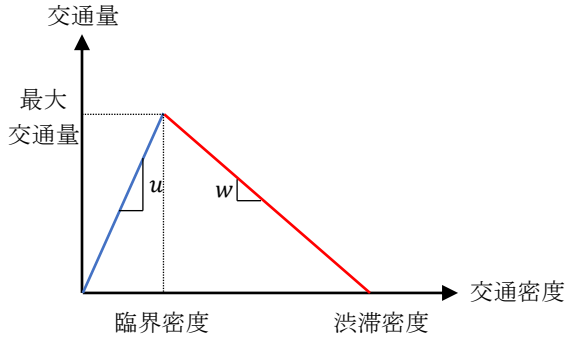


図-1 Fundamental diagram (FD)

2.3 乗車とネットワークの表現

本モデルでは車両の交通流モデルのみで利用者の移動を表現する。そこでリンクを通過した際にそのリンクで待機する利用者が乗車するものとする。この時、車両の定員を γ とすると、リンクでは0人から γ 人の乗車が考えられる。リンクを通過したことによる乗車人数と利用者の需要を等しくすることで、すべての利用者が車両に乗車したことになる。この表現を用いる際、乗車人数の合計が車両の定員を超えないようにするよう注意が必要である。以下に具体的な例を示す。

まず図2のようなネットワークが存在する。

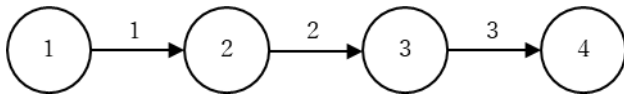


図-2 ネットワーク

図2のネットワークにおいて、車両の定員 $\gamma = 2$ であり、ノード4を目的地とする利用者がリンク1及び2で待機している状況を考える。この時考えられる各リンクでの乗車人数のパターンを表1に示す。

表-1 乗車人数のパターン

リンク1	リンク2	リンク3	合計
2	0	0	2
1	1	0	2
1	0	0	1
0	2	0	2
0	1	0	1

この各パターンが本問題における経路となり、これを表2に示す。なおリンクの後の()内の数値はそのリンクにおける乗車人数を表している。

表-2 経路と乗車人数

経路	リンク			乗車人数
p_1	1(2)	2(0)	3(0)	2
p_2	1(1)	2(1)	3(0)	2
p_3	1(1)	2(0)	3(0)	1
p_4		2(2)	3(0)	2
p_5		2(1)	3(0)	1

本研究の目的は利用者の総移動時間が最小になるよう、車両の経路選択を求めることである。そこで表2を基にネットワークを経路ベースに変更すると図3のようになる。

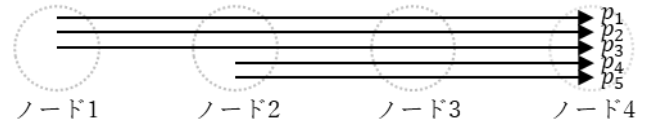


図-3 経路ベースのネットワーク

以降、本研究では図3で示すような経路ベースのネットワークを考える。

3. 定式化

3.1 仮定

本研究における仮定を以下に示す。

- ・ 利用者は全員車両に乗車して移動する。
- ・ 利用者はリンク上で車両を待機し、乗車する。
- ・ 利用者の需要は与件とする。
- ・ リンクには容量制約がある。
- ・ 出発ノードではポイントキューを形成する。
- ・ 到着ノードの容量は考慮しない。
- ・ 車両の容量は等しいものとする。
- ・ FDの形状は与件とする。

3.2 記号

本研究で用いた変数の定義を以下に示す。

T	時刻集合
S	出発ノード集合
G	到着ノード集合
L	リンク集合
P	経路集合
P_0	ノード0を起点とする経路集合
I	利用者が待機するリンク集合
l_i	リンク i の延長
u_i	リンク i の自由流速度
w_i	リンク i の後進波速度
ρ_i^{jam}	リンク i の渋滞密度
C_i	リンク i の交通容量
γ	車両の定員
$n_{p,i}$	経路 p 上のリンク i での乗車人数
n_p	経路 p を通過する車両の乗車人数

$h_p(t)$	経路 p の起点から時刻 t に発生する交通量
$d_{i,g}$	到着ノードを g とするリンク i で待機する利用者数
$q_o(t)$	時刻 t に出発ノード o に滞留する（ポイントキューを形成する）交通量
$N_i^{up}(t)$	時刻 t のリンク i における累積流入交通量
$N_i^{dn}(t)$	時刻 t のリンク i における累積流出交通量
$f_i^{in}(t)$	時刻 t のリンク i における流入交通量
$f_i^{out}(t)$	時刻 t のリンク i における流出交通量
$D_o(t)$	時刻 t の出発ノード o における Demand
$D_i(t)$	時刻 t のリンク i における Demand
$S_i(t)$	時刻 t のリンク i における Supply
$\mu_i^p(t, x)$	時刻 t にリンク i 上の位置 x を通過する交通量のうち、経路 p に属するものの割合
$\alpha_{ij}(t)$	時刻 t にリンク i から流出する交通量のうちリンク j に流入する割合
$\lambda_i(t)$	時刻 t にリンク i に流入した交通量がリンク i から流出する時刻
$\tau_i(t)$	時刻 t にリンク i から流出する交通量がリンク i に流入した時刻

3.3 最適化問題

本研究における利用者の経路選択は、利用者の総移動時間が最小化される最適化問題として式(1)のように表される。

$$\min \left(\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} n_p h_p(t) (\lambda_p(t) - t) \right) \quad \cdots(1)$$

本問題における未知変数は各経路の起点から時刻 t に発生する交通量 $h_p(t)$ である。次に示す LTM は時刻 t の発生交通量 $h_p(t)$ を入力することで、リンクの容量制約に基づき、経路 p を時刻 t に出発した交通が到着する時刻 $\lambda_p(t)$ を出力するモデルである。式(1)における $\lambda_p(t) - t$ は時刻 t における経路 p の移動時間を表している。

ここで経路 p を構成するリンク集合を $\{1, 2, \dots, K\}$ とすると、 $\lambda_p(t) = \lambda_o \circ \lambda_1 \circ \lambda_2 \dots \circ \lambda_K(t)$ となる。なお $f \circ g(t) \doteq g(f(t))$ は2つの関数の合成を表す。また $\lambda_o(t)$ は出発ノード o において時刻 t に滞留（ポイントキューを形成）し始めた交通が o を出発する時刻を表す。

本問題ではすべての利用者が車両に乗って移動することを表現するため式(2)で表される制約を受ける。

$$d_{i,g} = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} n_{p,i} h_p(t) \quad \forall i \in I, \forall g \in G \quad \cdots(2)$$

LTM の解法は以下に示す通りであり、1 から 4 を時間制約内で繰り返し計算する。

- 1) 出発ノードにおける Demand を求める
- 2) リンクの Demand 及び Supply を求める
- 3) 境界条件をもとに、実際にリンクから流出する交通量及びリンクへ流入する交通量を求める

4) 各変数を更新する

1) 出発ノードにおける Demand

出発ノードにおける Demand はポイントキューの有無によって式(3)のように表される。

$$D_o(t) = \begin{cases} \infty & q_o(t) > 0 \\ \sum_{p \in P_o} h_p(t) & q_o(t) = 0 \quad \forall o \in S \end{cases} \quad \cdots(3)$$

ポイントキューの時間変化は発生交通量とリンクへの流入量の差から式(4)のように表現できる。

$$\frac{d}{dt} q_o(t) = \sum_{p \in P_o} h_p(t) - \min \{D_o(t), S_j(t)\} \quad \cdots(4)$$

2) リンクの Demand と Supply

リンクの Demand と Supply はリンクのある時刻における累積流入交通量と累積流出交通量からそれぞれ式(5),(6)のように表せる。

$$D_i(t) = \begin{cases} f_i^{in} \left(t - \frac{l_i}{u_i} \right) & \text{if } N_i^{up} \left(t - \frac{l_i}{u_i} \right) = N_i^{dn}(t) \\ c_i & \text{if } N_i^{up} \left(t - \frac{l_i}{u_i} \right) > N_i^{dn}(t) \end{cases} \quad \forall i \in L \quad \cdots(5)$$

$$S_j(t)$$

$$= \begin{cases} f_j^{out} \left(t - \frac{l_j}{w_j} \right) & \text{if } N_j^{up}(t) = N_j^{dn} \left(t - \frac{l_j}{w_j} \right) + \rho_j^{jam} \cdot l_j \\ c_j & \text{if } N_j^{up}(t) < N_j^{dn} \left(t - \frac{l_j}{w_j} \right) + \rho_j^{jam} \cdot l_j \end{cases} \quad \forall j \in L \quad \cdots(6)$$

式(5)において上段は自由流状態、下段は渋滞流状態の Demand を表している。同様に式(6)において上段は渋滞流状態、下段は自由流状態の Supply を表している。この時、リンク i の累積流出交通量と累積流入交通量の関係は $\tau_i(t)$ 及び $\lambda_i(t)$ を用いてそれぞれ式(7),(8)で表される。

$$N_i^{dn}(t) = N_i^{up}(\tau_i(t)) \quad \forall i \in L \quad \cdots(7)$$

$$N_i^{up}(t) = N_i^{dn}(\lambda_i(t)) \quad \forall i \in L \quad \cdots(8)$$

3) 境界条件と交通量

経路ベースで表されるネットワークを考える際、リンクにおける交通量がどの経路を選択しているか区別する必要がある。リンク j の上流端の座標を a_j とすると、リンク j 上の交通量のうち、時刻 t 、位置 a_j における経路 p に属する交通量の割合は式(9)で表せる。

$$\mu_j^p(t, a_j) = \frac{f_i^{out}(t)}{f_j^{in}(t)} \mu_i^p(\tau_i(t), a_i) \quad \cdots(9)$$

$$\forall p \text{ s.t. } \{i, j\} \subset p$$

式(9)を用いて境界条件 $\alpha_{ij}(t)$ を式(10)で表す。

$$\alpha_{ij}(t) = \sum_{p \ni i, j} \mu_i^p(\tau_i(t), a_i) \quad \cdots(10)$$

式(11)は境界条件をもとに RS を用いて交通量を計算していることを表している。

$$\begin{aligned} & ([f_i^{out}(t+)]_{i=1,\dots,L}, [f_j^{in}(t+)]_{j=1,\dots,L}) \\ & = RS([D_i(t)]_{i=1,\dots,L}, [S_j(t)]_{j=1,\dots,L}) \end{aligned} \quad \cdots(11)$$

4) 各変数の更新

累積交通量と交通流率（交通量）の関係は式(12),(13)で表せる。

$$\frac{d}{dt}N_i^{up}(t) = f_i^{in}(t) \quad \forall i \in L \quad \cdots(12)$$

$$\frac{d}{dt}N_i^{dn}(t) = f_i^{out}(t) \quad \forall i \in L \quad \cdots(13)$$

4. まとめと今後の課題

本研究ではライドシェアを前提とした地域が所有する自動運転車両について、Kinematic wave 理論に基づき渋滞を考慮したうえで利用者の総移動時間を最小化する経路選択モデルを提案した。このモデルでは各車両に乗車する人数を区別することにより、地域が所有する自動運転車両の運用をより現実的に表現している。数値計算の結果については講演時に報告する。

本モデルでは到着ノードの容量は考慮せず、車両は目的地に到着するとトリップを終えていた。しかし現実にはその他のノードに移動する必要があり、その過程でも利用者を輸送することが可能である。よって一方向の交通のみでなく、車両がネットワーク内を巡回するようモデルを拡張することが今後の課題である。

参考文献

1. 総務省 情報流通行政局 情報通信政策課 情報通信経済室: ICT によるインクルージョンの実現に関する調査研究報告書, 2018. https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/h30_03_houkoku.pdf (閲覧日 2021.11.26)
2. JASO: テクニカルペーパー 自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義, 2018. https://www.jsae.or.jp/08std/data/DrivingAutomation/jaso_tp18004-18.pdf (閲覧日 2021.11.26)
3. 瀬尾亨, 朝倉康夫: 多目的線形計画法による共有型自動運転システムの戦略的設計, 土木計画学研究・講演集, Vol. 61, CD-ROM, 2020.
4. 愛甲聡美, Thaithatkul P., 瀬尾亨, 朝倉康夫: アクティビティパターンを与件としたライドシェア車両の最適割り当て問題, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_1233-I_1242, 2017.
5. 中内智也: Kinematic Wave 理論を用いたライドシェア避難モデル, 北海道大学 令和2年度修士論文(未公開).
6. Ke Han, Benedetto Piccoli, W.Y Szeto: Continuous-time link-based kinematic wave model: Formulation, solution existence, and well-posedness, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, Vol. 4, No. 3, pp.187-222, 2016.
7. Ke Han, Gabriel Eve, Terry L.Friesz: Computing

Dynamic User Equilibria on Large-Scale Networks with Software Implementation, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 19, pp.869-902, 2019.

8. Daganzo C. F.: The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, pp.79-93, 1995.