

# 生産空間における自動運転ネットワーク最適化モデル

An optimization model for the autonomous network in a space for agriculture, forestry and fishery production

室蘭工業大学 工学部 ○学生員 坂本信(Shin Sakamoto)  
 室蘭工業大学大学院 工学研究科 正員 有村幹治(Mikiharu Arimura)

## 1. はじめに

現在、北海道の生産空間である南十勝地域において人口減少、少子高齢化が全国・全道と比べて一足早く進行している。さらに、幕別町・大樹町・広尾町・中札内村・更別村では圏域中心都市である帯広市と比べて高齢者における人口の流出も多い。これは、各町村に病床数が400床を超える特定機能病院や介護施設が無く、これらが存在する圏域中心都市に移住する人が多数存在すると推測できる(表-1)。そして、住民の交通手段において中札内村・更別村では、タクシーは入っておらず、バスに至っても十勝バス1社しか入っていない(表-2)。さらに、運転手の高齢化や免許返納によるドライバー不足で高齢者の交通手段の確保が難しくなっており南十勝地域の喫緊の課題と言える。

柴原ら<sup>2)</sup>は、意識調査から南十勝地域における住民の普段の帯広へのニーズ、定住意識に寄与する要因を明らかにした。現状は車社会で、公共交通を利用する住民は極めて少ないが、将来的に運転ができなくなった際には公共交通の所要時間や乗り継ぎの待ち時間が定住意識に影響してくることが分かっている。

そこで、本研究では、「道の駅」を乗り継ぎ場として地方部の市街地を走る自動運転車両と高規格道路を走る広域路線バス(以下“高速バス”と呼ぶ)を考慮したモデルを作る。また、仮想空間にてリクエスト数に応じた自動運転車両の台数を変化させ稼働時間の最小化を基本的なアルゴリズムである最近傍探索で求める。

表-1 南十勝4町村の医療施設の有無

	中札内村	更別村	大樹町	広尾町
診療所	○	○	○	
病院			○	○
特定機能病院				

表-2 南十勝4町村のバス会社・タクシーの有無

	中札内	更別	大樹	広尾
バス会社	○	○	○	○
タクシー			○	○

## 2. 自動運転ネットワーク最適化モデル定式化

### 2.1 Dial-a-Ride 問題(DARP)

Dial-a-Ride 問題(DARP)<sup>3)</sup>とは、オンデマンドの巡回型で送迎する場合の車両別の経路、順序、利用者の時間窓等の制約条件に基づき総距離を最適化する問題である。利用者が増えると解の組み合わせが指数関数的に増え、NP 困難な組み合わせ最適化問題となり、遺伝アルゴリズム(GA)やタブーサーチ法(TS)などを用いたヒューリスティックな手法で近似解を求める。

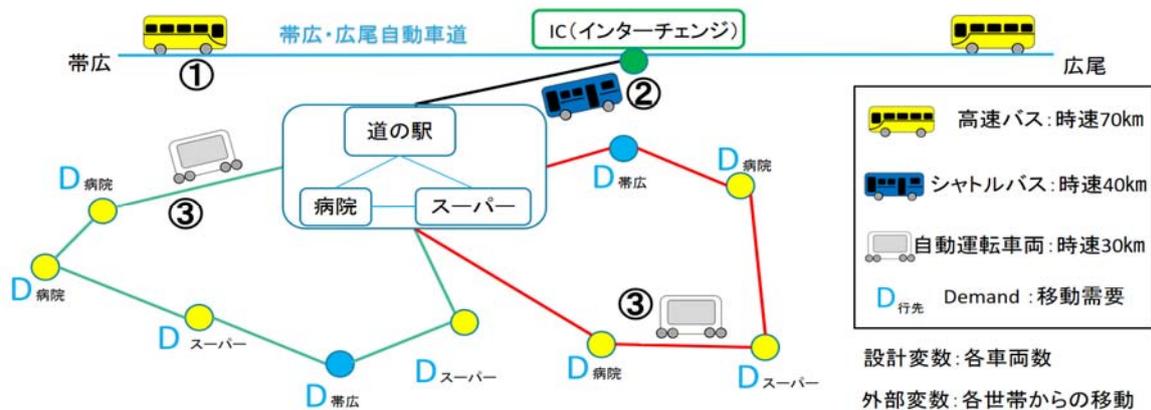


図-1 高速バスと自動運転車両の結合イメージ

## 2.2 Total Cost(総費用)の定式化

本研究は高速バスと自動運転車両の二段階 Dial-a-Ride 問題であり、その和を取った Total Cost(総費用)の最小化を目指す。

$$\text{MinimizeTC} = \begin{cases} HC(t_0^H, F) \\ + \\ AC(t_0^A, X) \end{cases} \quad (1)$$

## 2.3 Highwaybus Cost(高速バス費用)

$HC(t_0^H, F)$  : Highwaybus Cost(高速バス費用)

$H$  : 高速バス(Highwaybus)の場合を意味する

$F^O$  : 帯広から出発する高速バスの台数

$F^H$  : 広尾から出発する高速バスの台数

$r$  : 高速バス車両

$t_0^H$  :  $r$  がデポを出発する時刻を表すベクトル

$u$  : 使用可能な高速バス車両台数の上限

$t_{r,n^H(i)}^H$  : 高速バス車両  $r$  の利用者  $n^H(k)$  における出発時刻

$t_{r,0}^H$  : 高速バス車両  $r$  のデポにおける出発時刻

制約条件

$$n_0^H \geq 2 \quad (2)$$

$d^H(q)$  : ある高速バス車両  $r$  が  $q$  番目に訪問するデポを表す番号(ここでは  $q=0$ )

$n_0^H$  :  $F$  中の  $d^H(p)$  の個数

$$\sum_{r=1}^u N_r^H = N^H \quad (3)$$

$N^H$  : 利用者の総数

$N_r^H$  : 高速バス車両  $r$  が訪問する利用者の総数

$u$  : 使用可能な高速バス車両台数の上限

$$\sum_{n^H(k) \in F} D(n^H(k)) \leq W_r(F) \quad (4)$$

$n^H(k)$  : ある高速バス車両が  $k$  番目に訪問する利用者のノード番号

$D^H(n^H(k))$  : 利用者  $n^H(k)$  の乗員[人]

$$W_r(F) \leq W_{c,r}^H \quad (5)$$

$W_r(F)$  : 高速バス車両  $r$  の定員

$W_{c,r}^H$  : 高速バス車両  $r$  の定員容量

$$t_s^H \leq t_{r,0}^H \quad (6)$$

$t_s^H$  : 高速バス車両の稼働可能時間の開始時刻

$t_{r,n^H(k)}^H$  : 高速バス車両  $r$  の利用者  $n^H(k)$  の出発時刻

$$t_{r,0}^H \leq t_e^H \quad (7)$$

$t_{r,0}^H$  : 高速バス車両  $r$  が最後にデポに到着する時刻

$t_e^H$  : 高速バス車両の稼働可能時間の終了時刻

$$t_{r,0}^H = t_{r,0}^H + \sum_{i=0}^{N_r} \left\{ \overline{T^H}(\overline{t}_{r,n^H(k)}, n^H(k), n^H(k+1)) + t_{c,n^H(k+1)} \right\} \quad (8)$$

$t_{c,n^H(k)}$  : 利用者  $n^H(k)$  の乗り換え時間

$\overline{T^H}(\overline{t}_{r,n^H(k)}, n^H(k), n^H(k+1))$  : 高速バス車両  $r$  の時刻

$\overline{t}_{r,n^H(k)}$  における利用者  $n^H(k)$  と利用者  $n^H(k+1)$  の間における平均所要時間

## 2.4 Automatic driving vehicle Cost(自動運転車両費用)

谷口<sup>5)</sup>の時間指定付き確定論的配車配送計画に基づいて定式化する。

$$AC(t_0^A, X) = \sum_{l=1}^m c_{f,l}^A \cdot \delta_l^A(X_l) + \sum_{l=1}^m C_{t,l}^A(t_{l,0}^A, X_l) + \sum_{l=1}^m C_{p,l}(t_{l,0}^A, X_l) \quad (9)$$

$AC(t_0^A, X)$  : Automatic driving vehicle Cost(自動運転車両費用)

$A$  : 自動運転車両(Automatic driving vehicle)の場合を意味する

$l$  : 自動運転車両

$m$  : 使用可能な自動運転車両台数の上限

$c_{f,l}^A$  : 自動運転車両  $l$  の固定費用[円/分]

$\delta_l^A$  : 運行するか否か

$C_{t,l}^A$  : 自動運転車両  $l$  の単位時間当たり運行費用[円/分]

$t_0^A$  : 自動運転車両  $l$  がデポを出発する時刻ベクトル

$$t_0^A = \{t_{l,0}^A | l = 1, m\} \quad (10)$$

$$C_{t,l}^A(t_{l,0}^A, F) = C_{t,l}^A \sum_{i=0}^{N_l^A} \left\{ \overline{T^A}(\overline{t}_{l,n^A(i)}, n^A(i), n^A(i+1)) + t_{c,n^A(i+1)}^A \right\} \quad (11)$$

$\overline{t}_{l,n^A(i)}^A$  : 自動運転車両  $l$  の利用者  $n(i)$  の出発時刻

$\overline{T^A}(\overline{t}_{l,n^A(i)}, n^A(i), n^A(i+1))$  : 自動運転車両  $l$  の時刻

$\overline{t}_{l,n^A(i)}^A$  における利用者  $n^A(i)$  と利用者  $n^A(i+1)$  の間における平均所要時間

$t_{c,n^A(i)}^A$  : 利用者  $n(i)$  の乗り換え時間

$$C_{p,l}(t_{l,0}^A, X_l) = \sum_{i=0}^{N_l^A} \left[ c_{d,n(i)} \cdot \max\{0, t_{l,n(i)}^{A,a}(t_{l,0}^A, X_l) - t_{n(i)}^e\} + c_{e,n(i)} \cdot \max\{0, t_{n(i)}^s - t_{l,n(i)}^{A,a}(t_{l,0}^A, X_l)\} \right] \quad (12)$$

$N_l^A$  : 自動運転車両利用者の総数

$n(i)$  : ある自動運転車両が  $i$  番目に訪問する利用者のノード番号

$t_{l,n(i)}^{A,a}(t_{l,0}^A, X_l)$  : 自動運転車両  $l$  がデポを時刻  $t_{l,0}^A$  に出発したときのノード  $n(i)$  への到着時刻

制約条件

$$n_0^A \geq 2 \quad (13)$$

$n_0^A$  : 数列 $X_l$ 中の $d^A(j)$ の個数

$d^A(j)$  : ある自動運転車両が  $j$  番目に訪問するデポを表す番号(ここでは  $j = 0$ )

$$\sum_{l=1}^m N_l^A = N^A \quad (14)$$

$X$  : 全自動運転車両の配送ルートへの利用者の割り当てと訪問順序を示す数列( $X$ のなかには、すべての $n(i)$ が必ず含まれる.)  $X = \{X_l | l = 1, m\}$

$X_l$  : 自動運転車両  $l$  の配送ルートへの利用者の割り当てと訪問順番を示す数列

$$X_l = \{n^A(i), d(j) | i = 1, N_l, j = 1, n_0\}$$

$N_l^A$  : 自動運転車両  $l$  が訪問する利用者の総数

$m$  : 使用可能な自動運転車両台数の上限

$$\sum_{n^A(i) \in X_l} D(n^A(i)) \leq W_l(X_l) \quad (15)$$

$D(n(i))$  : 利用者 $n(i)$ の乗員[人]

$$W_l(X_l) \leq W_{c,l}^A \quad (16)$$

$W_l(X_l)$  : 自動運転車両  $l$  の定員

$W_{c,l}^A$  : 自動運転車両  $l$  の定員容量

$$t_s^A \leq t_{i,0}^A \quad (17)$$

$t_s^A$  : 自動運転車両の稼働可能時間の開始時刻

$t_{l,n^A(i)}^A$  : 自動運転車両  $l$  の利用者 $n^A(i)$ における出発時刻

$$t_{l,0}^A \leq t_e^A \quad (18)$$

$t_{l,0}^A$  : 自動運転車両  $l$  が最後にデポに到着する時刻

$t_e^A$  : 自動運転車両の稼働可能時間の終了時刻

$$t_{l,0}^A = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ T^A(\bar{t}_{l,n^A(i)}, n^A(i), n^A(i+1)) + t_{c,n^A(i+1)} \right\} \quad (19)$$

$t_{c,n^A(i)}$  : 利用者 $n^A(i)$ の乗り換え時間

$T^A(\bar{t}_{l,n^A(i)}, n^A(i), n^A(i+1))$  : 自動運転車両  $l$  の時刻

$\bar{t}_{l,n^A(i)}$ における利用者 $n^A(i)$ と利用者 $n^A(i+1)$ の間における平均所要時間

### 3. モデルシミュレーション

#### 3.1 最近傍探索 (Nearest neighbor algorithm)<sup>5)</sup>

検索質問データが与えられたとき、それに最も近いデータをデータベースから探し出す問題である。単純なため短い時間で経路を求めることが可能。

#### 3.2 自動運転車両のシミュレーションモデル

シミュレーション方法は、Google の OR-Tools<sup>6)</sup>を用いた。このパッケージの最近傍探索を用い、仮想空間 T 町座標上(100,100)においてリクエスト数の上限を 100 とし、10 刻みで自動運転車両数を 1 台から 10 台までで行

う(図-3, 図-4)。総距離を最小化し、その値を時速 30[km/時](自動運転車両の平均時速)で除し、稼働時間の最小化を検証する。移動距離はマンハッタン距離で表す。式は以下ようになる。

1 台当たりの稼働時間(分)

$$= \frac{\text{総距離}[m]}{\text{車両数}[台]} \times \frac{1}{30[km/時]} \times 1000 \times 60 \quad (20)$$

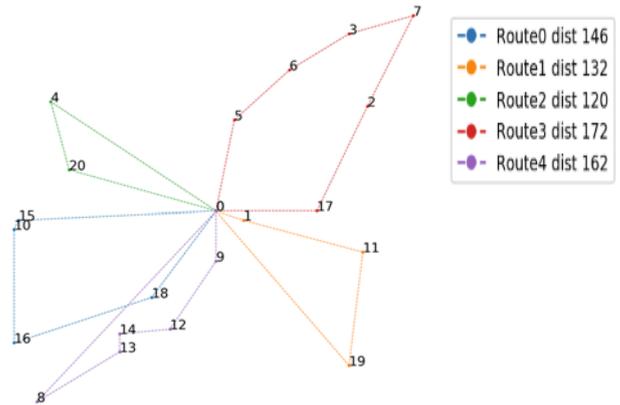


図-3 走行ルート(リクエスト数 20, 台数 5 台)

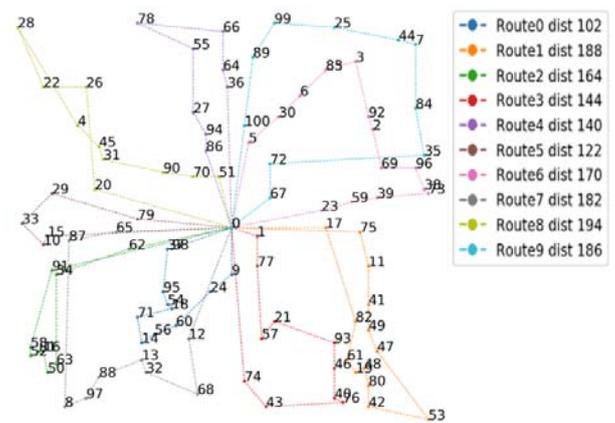


図-3 走行ルート(リクエスト数 20, 台数 5 台)

### 3.4 結果

表-3 よりリクエスト数に対する自動運転車両の台数が算出され、最適台数の場合、1km×1km メッシュにおいて平均稼働時間が 3 分前後となることがわかった。また、図-2 より、リクエスト数が増えると車両数とリクエスト数が等しくなるまで  $y = 0.0758x + 2.9333$  の関係で増加する。図-5 より高速バスを 4 台(各車両休憩 30 分とする)で走らせたとき、1 時間間隔で T 町から O 市や H 町へ行くことができる。また、8 台(各車両休憩 30 分とする)の場合は 30 分間隔となった。

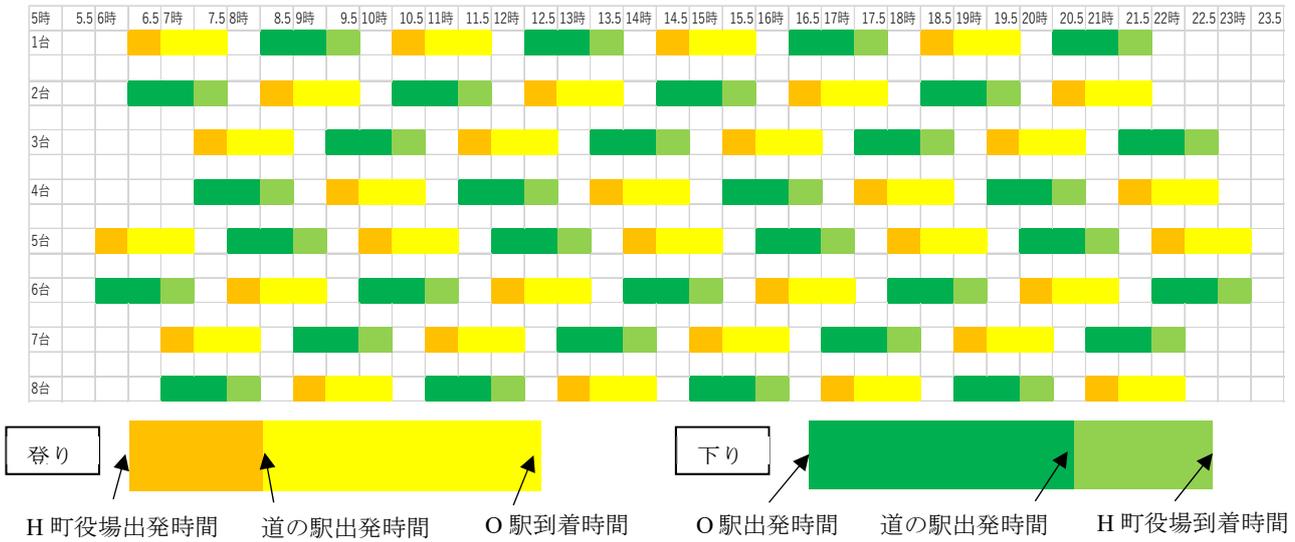


図 - 5 高速バス台数とダイヤグラム

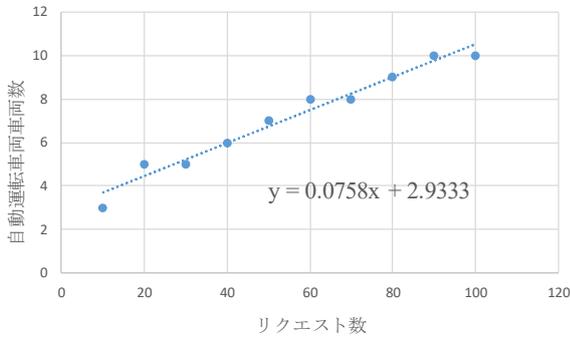


図 - 2 リクエスト数と自動運転車両台数の関係

#### 4. まとめ

本研究では、最近傍探索で用いてリクエスト数が変化した際に自動運転車両数の稼働時間が最小になるときのモデルを表した。また、リクエスト数と自動運転車両数の関係を図式化することができた。今後は、最近傍探索での誤差の幅を小さくするため、メタヒューリスティクス手法(タブーサーチ法やアニーリング法)を用いることで精度向上が可能であると考えられる。また、高速バスとの結合のイメージは示せたが、結合の詳細については、課題である。そして、モデルを現実的なものとするために、リクエストを実際のアンケートデータに基づいて作成し、さらに、新たな街を複数追加することで広域的なモデルの構築を目指す。圏域中心都市である帯広市とのアクセスが向上し南十勝地域に住む方々の生活範囲の拡大に貢献したい。

**謝辞：**本研究は国土交通省・道路政策の質の向上に資する技術研究開発「自動運転と道の駅を活用した生産空間を支える新たな道路交通施策に関する研究開発」からの支援を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表します。

表 - 3 各リクエストにおける最適台数と平均稼働時間

リクエスト数 (人)	平均稼働時間 (分)	台数 (台)
100	3.2	10
90	3.3	10
80	3.1	9
70	3.2	8
60	3.1	8
50	3.3	7
40	3.3	6
30	3.1	5
20	2.9	5
10	3.3	3

#### 参考文献

- 1) 国土交通省十勝南モデル地域にて検討を進めるにあたって . <https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/keikaku/splaat0000195s8-att/splaat00000195zo.pdf> 11/8 閲覧
- 2) 柴原貴, 岸邦宏, 高橋清, 有村幹治, 東本靖史, 澤充隆: 過疎地域における地方中核都市への公共交通確保による定住意識の向上に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第74号, 2017.
- 3) 大和裕幸, 坪内孝太, 稗方和夫: オンデマンドバスのためのリアルタイムスケジューリングアルゴリズムとシミュレーションによるその評価, 2007.
- 4) 谷口栄一, シティロジスティクス, 土木計画学研究・論文集, No.18-1, 2001年9月, 招待論文.
- 5) 岩井雅一, 高速・高精度な近似最近傍探索の実現,
- 6) GoogleOR-Tools, Vehicle Routing Problem <https://developers.google.com/optimization/routing/vrp>, 2018, 11/5 閲覧.