

[link](#)

Stable ride-sharing matching for the commuters with payment design

Zixuan Peng, Wenxuan Shan, Peng Jia, Bin Yu, Yonglei Jiang, Baozhen Yao.
Transportation 47, 1-21(2020).

白井 帆香

東京大学交通・都市・国土学研究室修士1年

- ライドシェアリングにおいて、総旅行費用最小化を目的とした運転手と乗客の**安定マッチング問題**を**受入保留アルゴリズム**で実装
- 乗客が運転手に支払う「迂回」に対する**補償**によって負担の分担を公正にし、かつ乗客が補償を行う**インセンティブ**をもつ支払いシステムを設計
 1. マッチした乗客の通勤費用は増えるが、マッチング機会は増大するため、総通勤コストは減少
 2. 参加人数が増加すると、補償による競争が緩和され、マッチした乗客の通勤費用は減少
- 良い点
 - 「通勤者のサービス参加率の維持」というProblem-orientedな問題設定
 - 「マッチング相手の性別を限定する」という現実的な制約
- 課題点
 - ODの空間的偏在に対応した料金設計
 - 性別を制限することのマッチング効率への影響の分析
 - 完全情報の仮定

- 新規性
 - 「迂回」に対する公正な費用分担
 - 境界合理性
 - 「マッチング相手の性別制約」をマッチング候補集合のクラス分けによって実現
- 有用性・発展性
 - マッチングにおける相手の選好順序を変更するための「補償」というスキームは発展性が高い
 - デマンド交通：他のリクエストの受入を限定することに対する補償
 - マッチングアプリ：「本気度」を示す??
 - 個人の異質性の考慮は難ありか
 - 候補集合のクラス分けは，他の属性へと拡張しづらい
 - 補償対象への選好の異質性←私的価値
- 信頼度
 - マッチングにおける一般的な概念への言及が少なかった
 - DAアルゴリズムにおける提案型
 - 安定マッチングの一意性

適切な価格設定 = ライドシェアリングへの参加を促進・維持するための重要なインセンティブ

主な戦略

1. 需給バランス型
2. 公正なコスト配分
3. 価格最適化戦略
4. オークションベースの価格設定

Bian and Liu(2019)

- 1. Introduction**
- 2. The problem of the ride-sharing**
- 3. The formulations of the stable matching**
- 4. Solution procedure**
- 5. Numerical experiments**
- 6. Conclusion**

通勤時のライドシェアサービス

- 背景：大都市における自家用車での通勤による混雑
 - US 自家用車での通勤割合 89.4% 自家用車の乗車率1.1人
- 自家用車利用を減らすためのライドシェアサービス
- Wazerider – social ride-sharing platform
 - 通勤者を，旅程と時間帯の類似度に基づきマッチング
 - 課題
 - Gender limitation – 女性は同性とマッチしたがる傾向
 - Stable matching の実現 – 通勤者の参加率の維持
 - Equity と Incentive を考慮した支払いシステム – 適正な費用負担

ライドシェアの最適化問題

- 目的関数：マッチ人数最大化 / 総旅行費用最小化
- 解法：厳密解法 / 近似解法
- 通勤に着目した研究
 - 不確実性を伴う最適化問題として、曖昧なtime-windowを持つ一週間のライドシェア問題を求解 [Teodorovic and Dell'Orco(2008)]
 - VCGに基づく支払いシステムの設計, 通勤者のGPS痕跡に基づくライドシェア計画 [Kamar and Horvitz(2009)]
 - 待ち合わせ場所を考慮した最適化 [Stiglic et al.(2015)]
 - 駐車場の制約下での相乗り行動 [xiao et al.(2016)]
- 価格に着目した研究
 - コスト削減分を参加者に割り振る [Agatz et al.(2011)]
 - 入札価格の第2価格を用いる [Kleiner et al.(2011)]
 - DARPにおける非近視眼的な価格設定 [Sayarshad and Chow(2015)]
 - 経路ごとの均等なコスト負担 [Santos and Xavier(2015)]
 - 参加者の柔軟性に応じた動的価格調整 [Stiglic et al.(2016)]
 - 公平性を実現するコストシェア
 - インセンティブを実現する金銭補償

一対一安定マッチング問題

安定 現在のマッチング相手よりも、互いを好みながらもマッチングしないペア(不安定対)が存在しない

- **結婚市場における研究**

- [Gale and Shapley(1962)]安定的な割当, Deferred acceptance algorithm
- [Roth et al.(1993)]線形プログラミングを用いた証明
- [Eckhout(2000)]安定したマッチングの一意性を保証する選好の十分条件

- **交通への応用**

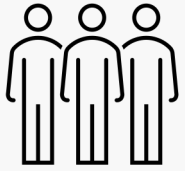
- [Bai et al.(2014)]乗客への到達時間に依存した選好を用いたタクシーのスケジュール管理
 - [He et al.(2015)]駐車場と運転手をマッチングさせて均衡配置
 - [Peng et al.(2016)]船舶と荷物のマッチング
- ライドシェアの安定マッチング – 限定的, かつ静的な価格設定
- [Wang et al.(2017)]参加者の選好がコスト削減に依存すると仮定
 - [Rasulkhani and Chow(2017)]容量制限を持つ経路におけるマッチング

本論文の位置づけ

通勤ライドシェアにおける安定マッチングの検討

1. 安定的なシェアリングに性別の制約を取り入れる
2. 公平性とインセンティブを考慮した支払いメカニズム
3. システムの安定性を維持

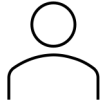
2. The problem of the ride-sharing



Rider 集合



Driver 集合



- 出発時間
- 最も遅い到着時間
- 出発地
- 到着地
- 性別の制約
- 最大許容通勤費用
= タクシー利用時の費用



- 最も早い出発時間
- 最も遅い到着時間
- 出発地
- 到着地
- 性別の制約
- 最大許容通勤費用
= 一人で通勤時の費用

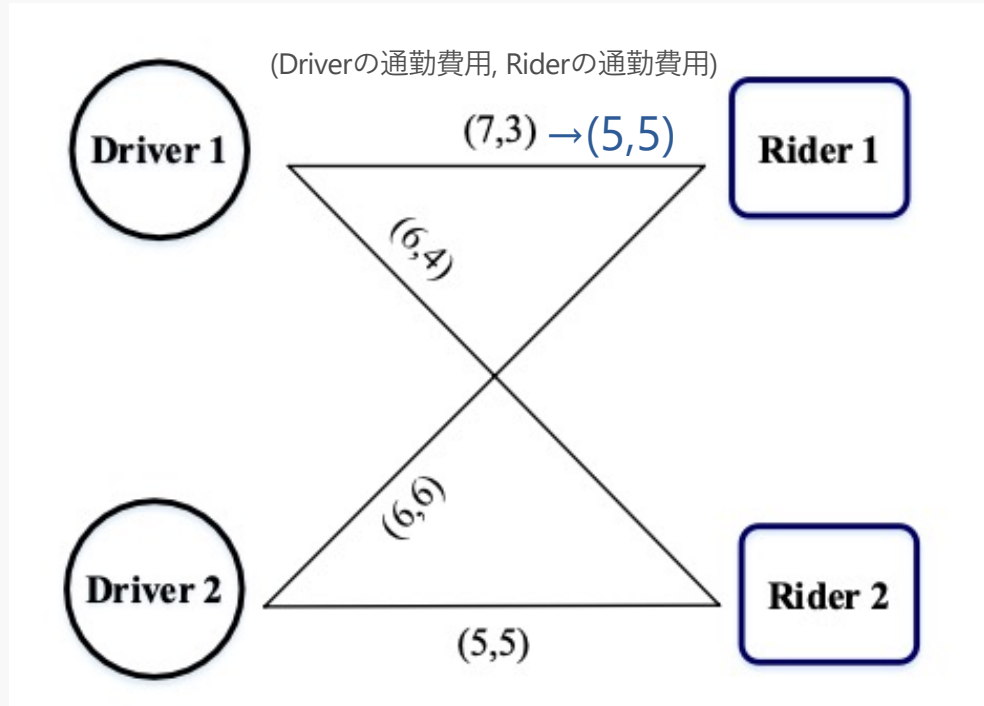
通勤費用 = \leftarrow 選好は通勤費用に依存 \rightarrow 安定割当を行う \rightarrow 通勤費用 =

$$\begin{aligned} & \text{sharing travel cost} \\ & + \\ & \text{time cost} \\ & + \\ & \text{補償} \end{aligned}$$

RiderがDriverに対して
回り道をするための補償を提供

$$\begin{aligned} & \text{sharing travel cost} \\ & + \\ & \text{time cost} \\ & - \\ & \text{補償} \end{aligned}$$

2. The problem of the ride-sharing



補償は考慮しないとき

選好

- Rider1もRider2もDriver1を選好
- Driver1はRider2を選好

結果

(Driver1 Rider2)
(Driver2 Rider1)

補償を考慮

- Rider1がDriver1に補償を2単位提供

結果

(Driver1 Rider1)
(Driver2 Rider2)

- Rider2がDriver1に補償を1単位提供

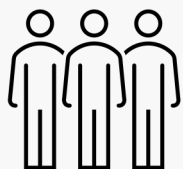
→Rider1はもう1単位提供できる

→Rider2はもう提供できない

→Rider2はDriver1をRider2と争うことを諦める

- 一人のDriverがマッチできるRiderは一人.
- DriverとRiderがともに制約(タイムウィンドウ, 性別, コスト)を満たすときマッチングは実行可能になる. またこのとき通勤費用は最大通勤費用を越えない.
- 全ての通勤者は合理的である. 各通勤者は通勤費用が低くなるマッチングを好む.

通勤者集合



Rider 集合

$$R = R_w + R_{w'} + R_{w''} + R_m + R_{m'} + R_{m''}$$

R_w : 女性だけとマッチする女性Rider集合

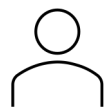
$R_{w'}$: 男性だけとマッチする女性Rider集合

$R_{w''}$: 性別関係なくマッチできる女性Rider集合



Driver 集合

$$D = D_w + D_{w'} + D_{w''} + D_m + D_{m'} + D_{m''}$$



Rider j がもつ情報

o_j 出発地

g_j 目的地

s_j 出発時間

l_j 最も遅い到着時間

ρ_j 最大許容通勤費用



Driver i がもつ情報

o_i 出発地

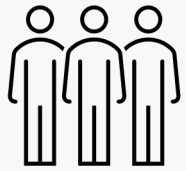
g_i 目的地

e_i 最も早い出発時間

l_i 最も遅い到着時間

ρ_i 最大許容通勤費用

実行可能なマッチングペア



Rider 集合

$$R = R_w + R_{w'} + R_{w''} + R_m + R_{m'} + R_{m''}$$



Driver 集合

$$D = D_w + D_{w'} + D_{w''} + D_m + D_{m'} + D_{m''}$$



$K^D(j)$ Rider j の性別制約を満たすDriver集合

$$\kappa^D(j) = \begin{cases} D_w \cup D_{w''} & , \forall i \in R_w \\ D_{m'} \cup D_{m''} & , \forall i \in R_{w'} \\ D \setminus (D_m \cup D_{w'}) & , \forall i \in R_{w''} \\ D_m \cup D_{m''} & , \forall i \in R_m \\ D_{w'} \cup D_{w''} & , \forall i \in R_{m'} \\ D \setminus (D_w \cup D_{m'}) & , \forall i \in R_{m''} \end{cases}$$

Driver $i \in K^D(j)$ がtime-window制約と費用制約を満たすとき、マッチングペア (i, j) は実行可能となる

$\varepsilon^D(j)$ Rider j とマッチング実行可能なDriver集合



$K^R(i)$ Driver i の性別制約を満たすRider集合

$$\kappa^R(i) = \begin{cases} R_w \cup R_{w''} & , \forall i \in D_w \\ R_{m'} \cup R_{m''} & , \forall i \in D_{w'} \\ R \setminus (R_m \cup R_{w'}) & , \forall i \in D_{w''} \\ R_m \cup R_{m''} & , \forall i \in D_m \\ R_{w'} \cup R_{w''} & , \forall i \in D_{m'} \\ R \setminus (R_w \cup R_{m'}) & , \forall i \in D_{m''} \end{cases}$$

Rider $j \in K^R(i)$ がtime-window制約と費用制約を満たすとき、マッチングペア (i, j) は実行可能となる

$\varepsilon^R(i)$ Driver i とマッチング実行可能なRider集合

3. The formulations of the stable matching

t_{ab} ノード a からノード b までの旅行時間

C_{ij}^r マッチングペア (i, j) における Rider の通勤費用

C_{ij}^d マッチングペア (i, j) における Driver の通勤費用

$$e_i + t_{o_i o_j} - s_j \leq 0$$

$$s_j + t_{o_j g_j} - l_j \leq 0$$

$$s_j + t_{o_i g_j} + t_{g_j g_i} - l_j \leq 0$$

$$C_{ij}^r - \rho_j \leq 0$$

$$C_{ij}^d - \rho_i \leq 0$$

支払いと通勤費用

公平のため、「合同の通勤費用はDriverとRider各々の通勤距離に応じて按分」

$$\underline{P_{ij}^r} = \underline{C_{ij}} \times \frac{\underline{len_j}}{\sum_{k \in \{i,j\}} \underline{len_k}} + \underline{p_{ij}}$$

マッチングペア (i, j) においてRiderが支払う金額

Driver j とRider i による合同の通勤で発生した総費用

一人で通勤したときの通勤距離

Rider i がDriver j に支払う補償

= Driverを「迂回」させることに対する“補償”

 Rider j 通勤費用

$$C_{ij}^r = (\tau_{g_j} - \tau_{o_j}) \times \alpha + P_{ij}^r$$

 Driver i 通勤費用

$$C_{ij}^d = C_{ij} + (\tau_{g_i} - \tau_{o_i}) \times \alpha - P_{ij}^r$$

τ_a ノード a 到着時刻

α 時間価値

ライドシェアにおける安定の定式化

$$\text{Min} \sum_{j \in R} \sum_{i \in \varepsilon^D(j)} X_{ij} \times (C_{ij}^r + C_{ij}^d) + \sum_{j \in R} X_{jj} \times \rho_j + \sum_{i \in D} X_{ii} \times \rho_i$$

全ての通勤者の総旅行費用最小化

$$\sum_{i \in \{j\} \cup \varepsilon^D(j)} X_{ij} = 1, \forall j \in R$$

1人のRiderがマッチできるDriverは1人

$$\sum_{j \in \{i\} \cup \varepsilon^R(i)} X_{ij} = 1, \forall i \in D$$

1人のDriverがマッチできるRiderは1人

$$\sum_{\substack{j': C_{ij'}^d \leq C_{ij}^d \\ j' \in \{i\} \cup \varepsilon^R(i)}} X_{ij'} + \sum_{\substack{i': C_{i'j}^r \leq C_{ij}^r \\ i' \in \{j\} \cup \varepsilon^D(j)}} X_{i'j} + X_{ij} \geq 1, \quad \forall i \in D, \quad \forall j \in \varepsilon^R(i)$$

安定性制約

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in D, \quad \forall j \in \varepsilon^R(i)$$

$$X_{ii} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in D \cup R$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & (i, j) \text{ is feasible} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

ライドシェアにおける安定の定式化

安定性制約 お互いにより選好するが、マッチングペアにならないようなDriver i とRider j は存在しない

$$\textcircled{1} \sum_{\substack{j': C_{ij'}^d \leq C_{ij}^d \\ j' \in \{i\} \cup \varepsilon^R(i)}} X_{ij'} + \textcircled{2} \sum_{\substack{i': C_{i'j}^r \leq C_{ij}^r \\ i' \in \{j\} \cup \varepsilon^D(j)}} X_{i'j} + \textcircled{3} X_{ij} \geq 1, \quad \forall i \in D, \quad \forall j \in \varepsilon^R(i)$$

①=1のとき

Driver i はRider j' とマッチし、
実行可能な任意のRider j よりもRider j' をより選好している、または両者について無差別である。

②=1のとき

Rider j はDriver i' とマッチし、
実行可能な任意のDriver i よりもDriver i' をより選好している、または両者について無差別である。

①=②=0のとき

少なくともRider j とDriver i には、より選好するか同等なマッチング相手が存在

Gale-Shapley アルゴリズム-安定結婚問題 Gale and Shapley(1962)

1. 各男性は、最も好きな女性にプロポーズする
2. 各女性は、プロポーズされた男性の中から最も好きな男性を選び、それ以外の男性を振る
3. 振られた男性は、プロポーズしたことのない女性の中から最も好きな女性にプロポーズする
4. 各女性は、新しくプロポーズして来た男性と、現在のパートナーの中から最も好きな男性を選ぶ

振られたままの男性がいなくなるまで、3-4を繰り返す

アルゴリズムにおける補償の考慮

- 各主体の「選好順序」がDAアルゴリズムの肝
- ライドシェアでは、相手の選好順序における自分のランクを変更するために「補償」を用いることができる←より高い余剰を得る

補償 – Riderの余剰に依存

余剰=最大許容通勤コスト-実際の通勤コスト

$$v_{ij} = \rho_j - C_{ij}^r \geq 0 \quad \forall j \in R, \forall i \in \varepsilon^D(j) \quad \text{Rider } j \text{ の Driver } i \text{ とマッチングしたときの余剰}$$

$$u_{ij} = \rho_i - C_{ij}^d \geq 0 \quad \forall i \in D, \forall j \in \varepsilon^R(i) \quad \text{Driver } i \text{ の Rider } j \text{ とマッチングしたときの余剰}$$

$$\omega_j(i, i') = v_{ij} - v_{i'j} \quad \forall j \in R, \forall i, i' \in \varepsilon^D(j)$$

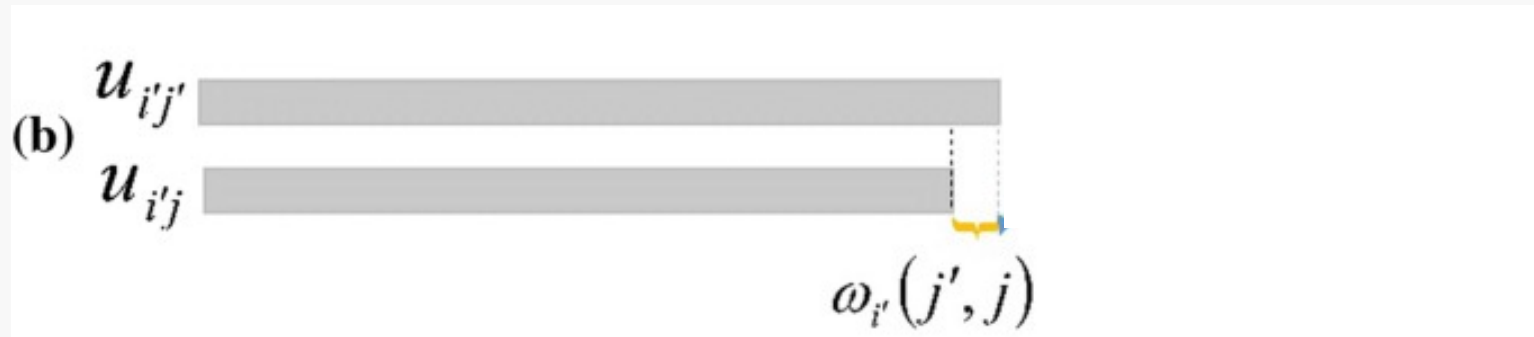
$$\omega_i(j, j') = u_{ij} - u_{ij'} \quad \forall i \in D, \forall j, j' \in \varepsilon^R(i)$$

余剰の差

- Rider j の現在のマッチング相手はDriver i だが、より多くの余剰を得ることができるとDriver i とよりマッチしたい -(a)



- Driver i' は、Rider j' とマッチしたときとの余剰の差である $\omega_{i'}(j', j)$ 以上の補償を貰えるならマッチング相手をRider j に変えて良い -(b)



- Rider j がDriver i とマッチした場合, Driver i の元のマッチング相手Rider j' は次点のDriver i'' とマッチしなくてはならず, $\omega_{j'}(i', i'')$ を失う -(c)
- 損失を回避するため, Rider j' は $\omega_{j'}(i', i'')$ 分の余剰を, Rider j とDriver i を取り合うために補償として使う



Rider j が相手を変えるためには,

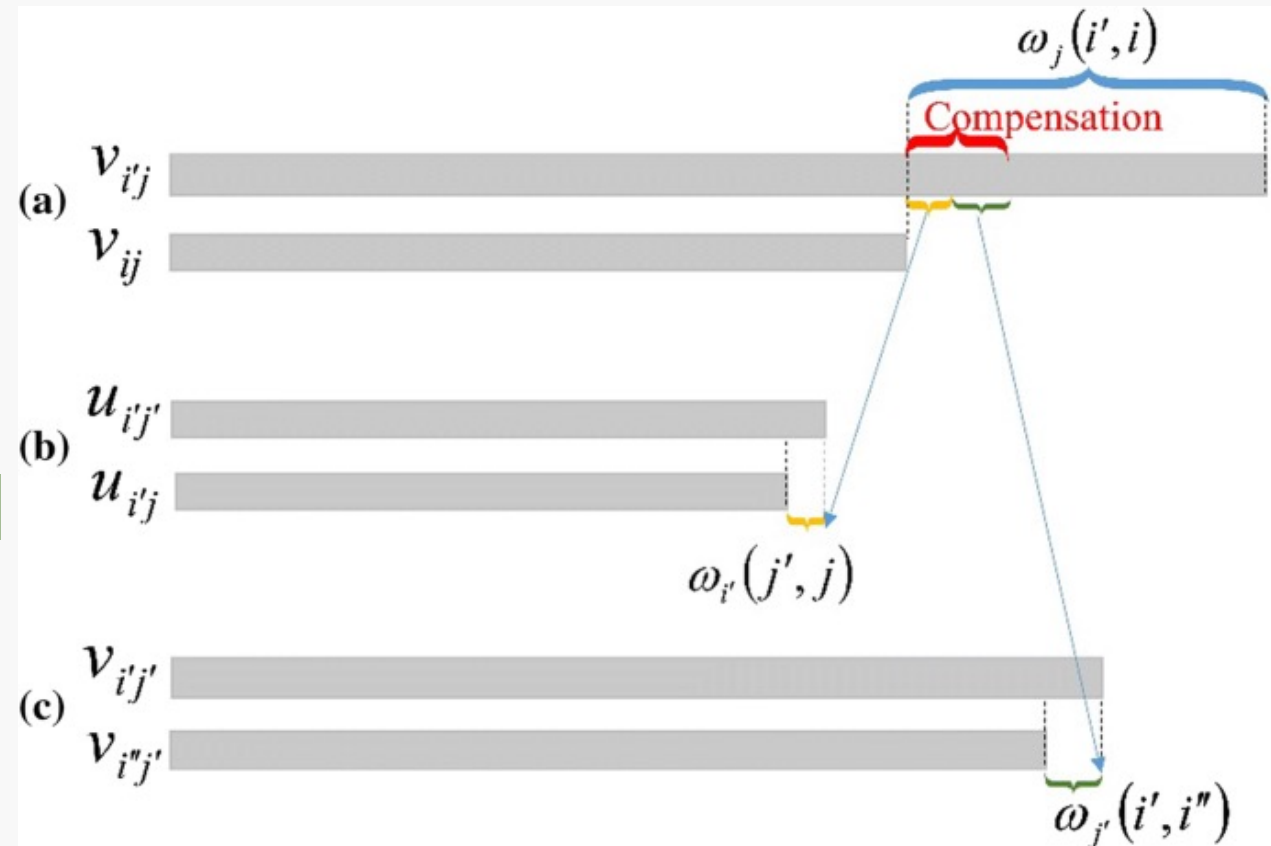
Driver i' の選好順序を変更するための $\omega_{i'}(j', j)$

+

Rider j' がDriver i' を取り戻すのを防ぐための $\omega_{j'}(i', i'')$

を補償しなければならない.

そのため, $\omega_j(i, i') \leq \omega_{i'}(j', j) + \omega_{j'}(i', i'')$ である必要がある.



- 前ページまでの例と同様に，各Riderは自分の好きなDriverに自らの余剰に応じた補償を与える
- 全てのRiderが補償を決定した後に，新しい選好順序に基づき安定マッチング解が計算される
- Riderは安定マッチング解に対して補償を修正し続ける．マッチング解が変化しなくなった時点でアルゴリズムは終了する．

McVitie and Wilson(1971)が提案した 受入保留(DA)アルゴリズム(≒Gale and Shapley)に基づきマッチング解を求める

初期安定マッチング=通勤者の通勤コストが最小となる安定マッチング解

The solution procedure of the model

// Initial stable matching solution without compensations

1: $n \leftarrow 0$

2: $p_{ij}^n \leftarrow 0, \quad \forall i \in D, \quad \forall j \in \varepsilon^R(i)$
 $\theta^n \leftarrow \bigcup_{i \in D, j \in \varepsilon^R(i)} \{p_{ij}^n\}$

μ^n n 回目の繰り返しにおける安定解

θ^n n 回目の繰り返しにおける補償の行列

3: $\mu^n \leftarrow$ deferred acceptance algorithm based on λ_i and λ_j

$\mu^n(a)$ 安定解 μ^n における a のマッチング相手

// Change preference lists of drivers by compensations

4: **Do**

λ_i Driver i の選好順序

5: Update $\mu^n(a), \lambda_i$ and λ_j according to μ^n

λ_j Rider j の選好順序

6: **For** $j = 1$ **to** $|R|$

7: **For** $k = 1$ **to** $|\lambda_j|$

// Find the current matching partner of rider j and driver i' that rider j prefers to match

8: $i' \leftarrow \lambda_j^k; j' \leftarrow \mu^n(i'); i \leftarrow \mu^n(j); i'' \leftarrow$ driver ranked by rider j' who is currently matched with driver i'
only second to driver i'

// Rider j has enough surplus to change the preference list of driver i'

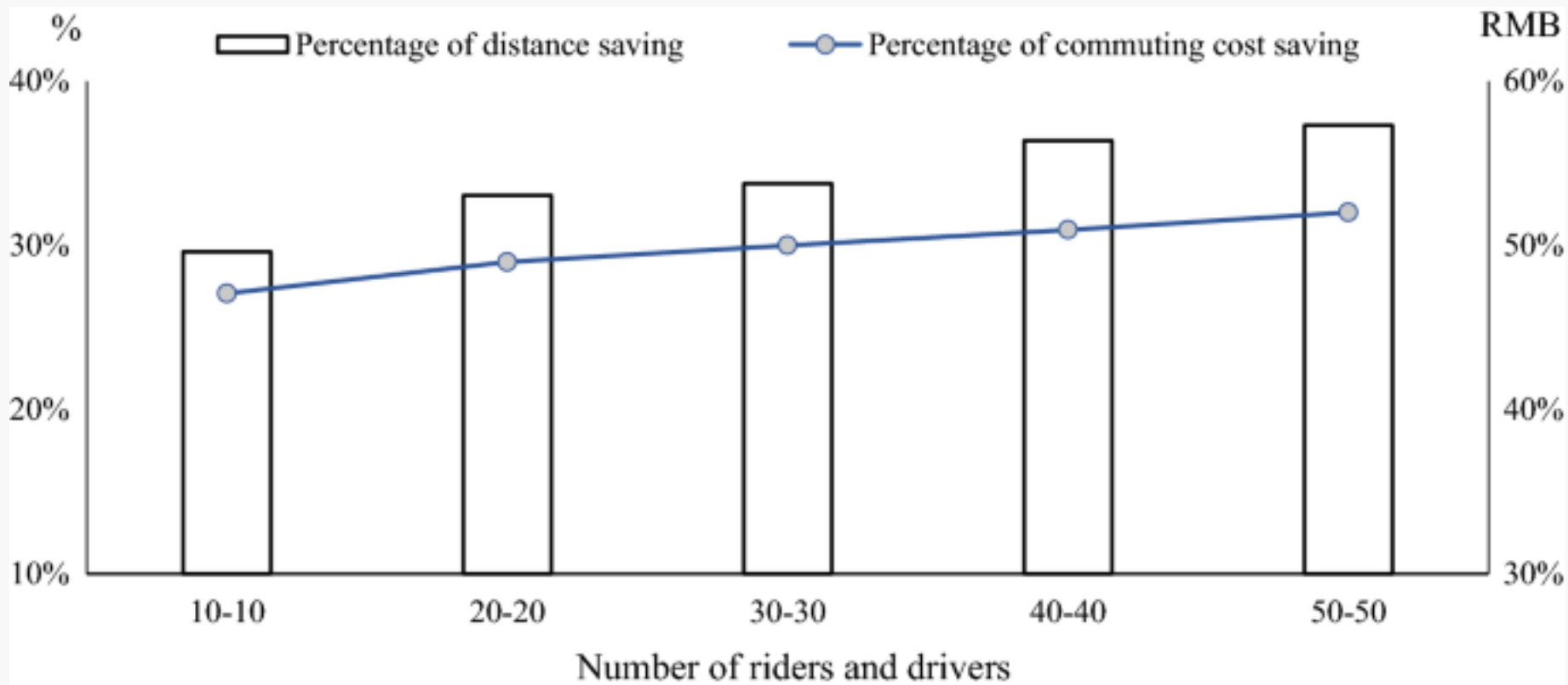
9: **If** $(\omega_j(i', i) > \omega_{i'}(j', j) \geq 0)$

// Rider j fails in the competition. The original partner of driver i' compensates driver i' to prevent rider j from matching with driver i'

10: **If** ($\omega_j(i', i'') \geq \omega_j(i', i) - \omega_{i'}(j', j)$)
11: $p_{i'j'}^{n+1} \leftarrow p_{i'j'}^n + [\omega_j(i', i) - \omega_{i'}(j', j)]$
// Rider j wins in the competition. Rider j compensates driver i' to change the rank of the preferred driver i' and prevents rider j' from getting driver i' back
12: **Else**
13: $p_{i'j}^{n+1} \leftarrow p_{i'j}^n + [\omega_{i'}(j', j) + \omega_j(i', i'')]$
14: **End if**
15: **End if**
16: **End for**
17: **End for**
// Update compensation matrix and preference lists of commuter. Calculate the Stable matching solution with new preference lists of commuters
18: $\theta^{n+1} \leftarrow \bigcup_{i \in D, j \in R} \{p_{ij}^{n+1}\}$
19: $\mu^{n+1} \leftarrow$ deferred acceptance algorithm based on updated λ_i and λ_j
20: $n \leftarrow n + 1$
// Terminal condition
21: **While** ($(\mu^{n-1} \neq \mu^n$ or $\theta^{n-1} \neq \theta^n)$)
22: Output Result

- 大連市の道路ネットワーク(383リンク-228ノード)
- 実データのODを用いる. その他の要素は分布や値を与える.

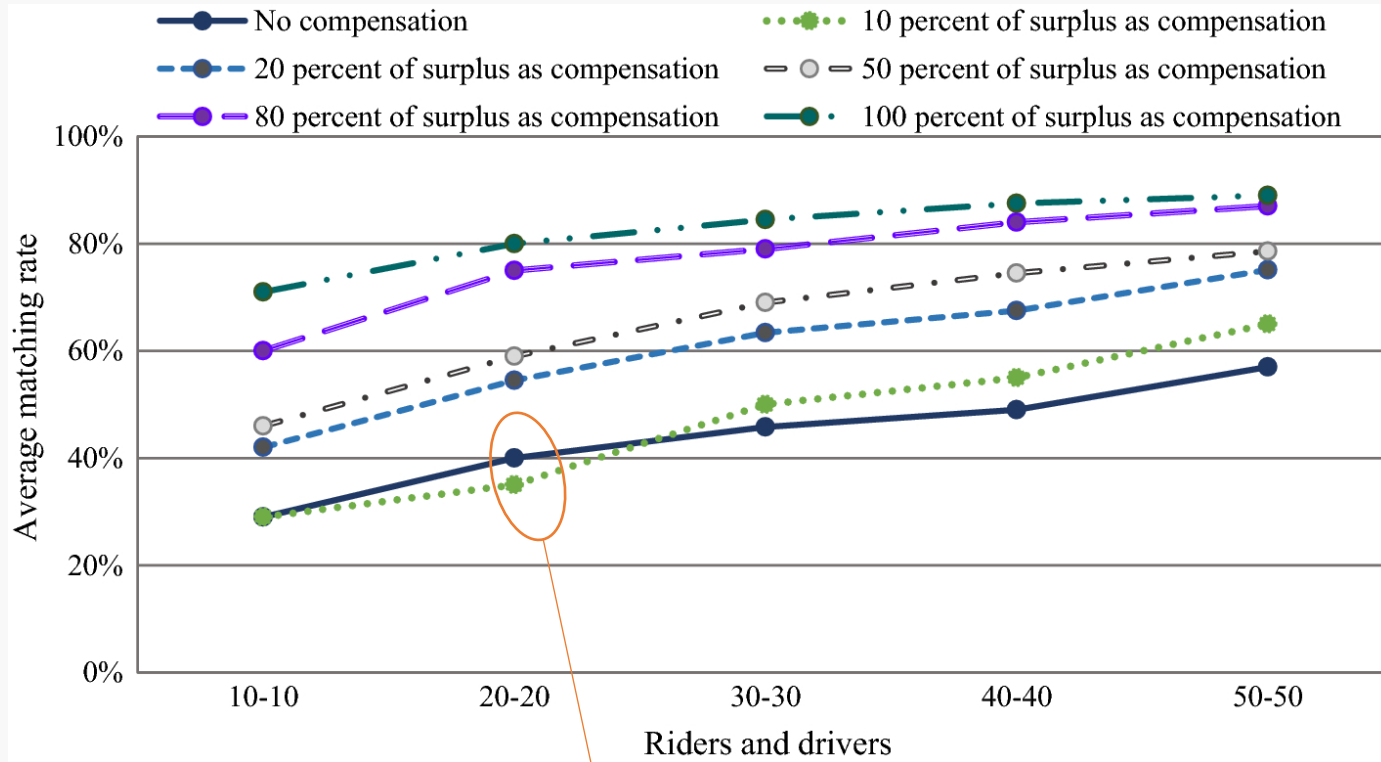
ライドシェアの効果 単独通勤時と比較した移動距離と通勤コスト



- 通勤者が増えるほど、距離削減率や通勤コスト節約率は高くなる

補償の効果

通勤者の人数と余剰に占める補償割合に応じた平均マッチング率の変化



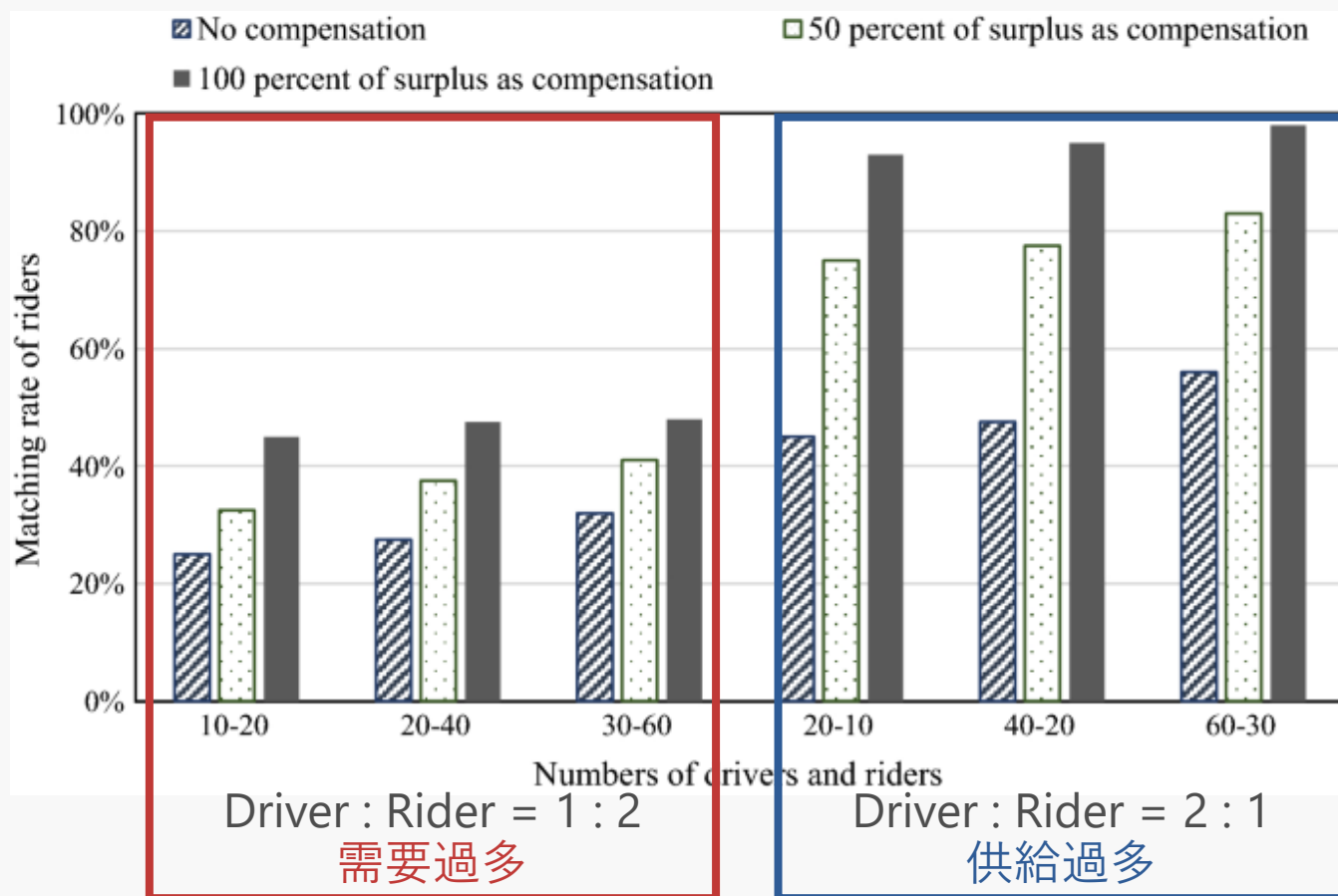
- Riderにとって, Driverとのマッチングの機会は, 補償の額に応じて増大
- 通勤者の数が増えるほど, 補償ごとのマッチング率の差が小さくなる
- 通勤者が空間的に塊を形成することで, 個人差が少なくなるため

Riderの剰余が他のRiderと補償で競争するのに十分でないため, 補償なしのケースよりマッチング率が下がる

- 大連市の道路ネットワーク(383リンク-228ノード)
- 実データのODを用いる. その他の要素は分布や値を与える.

Driver-Riderの人数比の影響

補償額ごとのRiderのマッチング率



- 比率と補償額が一定なら, Riderのマッチング率は通勤者数が多いほど高くなる

→参加率が高ければ補償不足を補える

5. Numerical experiments

- 大連市の道路ネットワーク(383リンク-228ノード)
- 実データのODを用いる。その他の要素は分布や値を与える。

Table 3 The average commuting cost of riders and total commuting cost of commuters

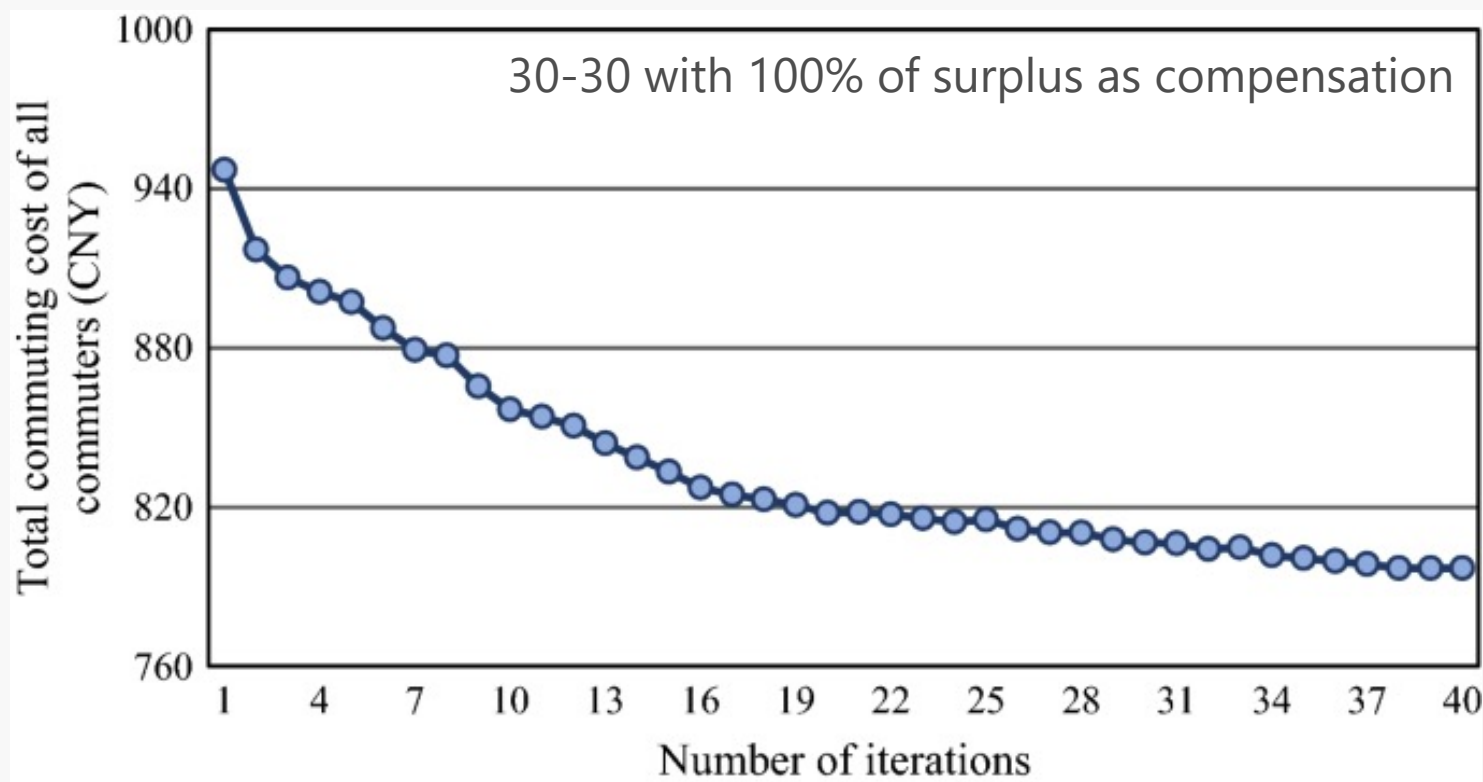
Cases	No compensation			50 percent of surplus as compensation			100 percent of surplus as compensation		
	ACCR (CNY)	TC (CNY)	CT (s)	ACCR (CNY)	TC (CNY)	CT (s)	ACCR (CNY)	TC (CNY)	CT (s)
10-20	13.87	648	1.54	15.38	610	3.20	18.02	565	5.84
10-10	12.06	390	0.97	12.5	363	1.61	14.32	303	2.97
20-10	10.89	537	1.34	11.25	476	2.82	13.27	446	5.42
20-40	12.23	1185	2.75	13.63	1123	8.71	16.28	979	29.27
20-20	10.01	706	1.77	10.76	641	4.47	12.50	544	12.90
40-20	9.45	984	2.53	9.78	915	7.64	11.06	805	26.51
30-60	10.16	1597	4.41	10.6	1529	18.60	14.88	1491	42.01
30-30	9.10	947	2.25	9.79	850	11.41	11.46	797	36.74
60-30	8.03	1362	4.08	8.63	1226	15.54	9.32	1183	40.89

ACCR average commuting cost of matched riders, TC total commuting cost of all commuters. CT calculation time

- 需要過多(D:R=1:2)の場合，奪い合いの結果補償が高くなり，マッチングしたRiderの平均通勤コストは高くなる。
- RiderとDriverの人数が一定のとき，補償が上がるにつれてマッチングしたRiderの平均通勤コストは増加するが，総通勤コストは減少する
- 比率一定の場合，全体の参加者が多い方がマッチングしたRiderの平均通勤コストは低くなる→通勤者の多様性が競争を緩和

- 大連市の道路ネットワーク(383リンク-228ノード)
- 実データのODを用いる. その他の要素は分布や値を与える.

繰り返し計算の収束 参加者全員の総通勤コスト



- 最初の20回の反復で急激に総コストは減少, その後緩やかに
- 37回目以降は補償によって相手を変えるインセンティブを持つRiderが存在せず, 変化なし

- 支払い設計を組み込んだDAアルゴリズムによるライドシェアの安定マッチングモデル
- 数値実験で、ライドシェアが移動距離や通勤コストを削減すること、参加人数がマッチング率に影響を与えることを確認
- 数値実験で、補償によりマッチングしたRiderの通勤コストは増加するものの、マッチング率の向上や総通勤コストの削減を確認
- 展望：通勤型トリップ数が多い大都市での応用

- **DAアルゴリズムを拡張して現実的な問題を解いているのが面白かった。**（理論→実装の橋渡しの部分）
- **数値実験の方法が参考になった**
 - 固定する要素と変える要素
 - 複数の指標の組み合わせと表現，可視化

- Bian, Z., & Liu, X. (2019). Mechanism design for first-mile ridesharing based on personalized requirements part I: Theoretical analysis in generalized scenarios. *Transportation Research Part B: Methodological*, 120, 147-171.
- Di, X., & Liu, H. X. (2016). Boundedly rational route choice behavior: A review of models and methodologies. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85, 142-179.
- Li, Y., & Liu, Y. (2021). Optimizing flexible one-to-two matching in ride-hailing systems with boundedly rational users. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150, 102329.
- Peng, Z., Shan, W., Jia, P., Yu, B., Jiang, Y., & Yao, B. (2020). Stable ride-sharing matching for the commuters with payment design. *Transportation*, 47, 1-21.
- 「マーケットデザイン オークションとマッチングの理論・実践」 ギオーム・ハーリンジャー. 中央経済社.