

Flexible Mobility On Demand: 複数の交通サービスへの動的な車両割り当てを 特徴とするオンデマンド交通システムの設計と評価

池田 拓郎¹・藤田 卓志²・Moshe E. Ben-Akiva³

¹非会員 (株) 富士通研究所 〒211-8588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4-1-1
E-mail: ikeda.takuro@jp.fujitsu.com

²非会員 (株) 富士通研究所 〒211-8588 神奈川県川崎市中原区上小田中 4-1-1
E-mail: fujita.takushi@jp.fujitsu.com

³Nonmember of JSCE, Massachusetts Institute of Technology.
E-mail: mba@mit.edu

従来、地域公共交通としての役割は、主に、路線バス、タクシーが担ってきたが、路線バスは固定的な経路、スケジュールや運行頻度など様々な面で利便性が低く、一方で、タクシーは料金が高く日常的には利用できない。そのため、利用者の満足度は低く、十分な利用者を獲得できていない。その結果、事業者は収益を上げることが困難な状況である。このような問題に対し、我々は、需要と供給に応じて、同一車両を異なる交通サービスへ動的に割り当てることで、事業者の利益を向上させる新たなオンデマンド交通システムを提案する。利用者の観点からは多様なサービスの中から乗車便を選択することが可能である。本稿では、提案システムのコンセプトを概説し、シミュレーションによる評価について報告する。

Key Words : demand responsive transit system, flexible transportation services, shared-taxi, shared-ride, dial-a-ride, mobility on demand

1. はじめに

従来、地域公共交通の役割は、主に、路線バス、タクシーが担ってきたが、路線バスは固定的な経路、固定的なスケジュール、地域によっては運行頻度の低さなど、様々な面で利便性が低い。一方で、タクシーは最も利便性の高い交通サービスの一つであるが、料金がいため、日常的に利用することは金銭的に困難である。そのため、これらの交通サービスに対する利便性、料金の両面での利用者の満足度は低く、十分な利用者が獲得できていない。その結果、事業者は収益を上げることが困難な状況である。例えば、バス事業に関しては、都市部の約4割、地方部の約6割が赤字となっている¹⁾。また、タクシー事業に関しては、比較的用户の多い都市部においても、実車率（全走行距離に対して乗客を乗せて走行した距離の割合）が約4割しかなく、運転手の賃金も全産業労働者の平均を大きく下回っている²⁾。事業者は収益が上がらないため、利用者に十分なサービスを提供することができない。それにより、さらなる利用者数の減少を招き、

さらに事業者の収益性が低下するという悪循環に陥っている。

これまでに、利便性の高い交通手段を低料金で提供することで利用者の満足度を向上させることを目的として、様々なオンデマンド交通サービスが実用化されている。例えば、交通不便地域を中心として、交通弱者の移動手段を確保するため、コミュニティバスや乗合タクシーを導入する自治体が増えている。その運用コストは、クラウドコンピューティングの活用等により、従来よりも大幅に削減されている³⁾。また、都市部を中心として、スマートフォンのGPS機能を利用したリアルタイムのタクシー予約アプリが広まっている。特に、海外においては、Uber⁴⁾、Lyft⁵⁾、SideCar⁶⁾など、乗合を含む新たな交通サービスが注目を集めている。これらの背景として、ICTの活用により、簡便な予約処理、スケジュールリングの自動化、スムーズな決済、運転者と乗客のマッチング、または、乗合する乗客同士のマッチングが容易になったこと等が挙げられる。このようなICTの活用が、前述した事業者の収益性の低さと利用者の満足度の低さの悪循環か

ら脱する鍵となる可能性がある。

しかしながら、これらの交通サービスは、必ずしも、事業者の利益を十分に考慮したものにはなっていない。例えば、これまでの交通サービスの予約システムでは、利用者がリクエストにおいて指定した条件（出発地、到着地、出発時刻、到着時刻など）に一致する乗車便を利用者に提示するが、利用者の選択によっては、車両不足に陥り、後続の利用者にサービスを提供できなくなり、事業者は利益を失う恐れがある。逆に、事業者の利益だけを優先させて、例えば、運用コストの低い乗車便を提示すると、利用者に受け入れられず、結果的に事業者は利益を得られない可能性がある。以上のような背景に対し、我々は、事業者の利益を向上させる新しいオンデマンド交通システムを提案する。以降、提案システムを Flexible Mobility on Demand (FMOD) と呼ぶ。本論文では、FMOD のコンセプトと、シミュレーションによる有効性の評価結果について述べる。

2. 既往研究

長年にわたってオンデマンド交通に関する研究が行われており、近年になってさらに実用化が進んでいる。オンデマンド交通とは、広義には、利用者のリクエストに応じて運行される形態の交通サービスの総称であるが、通常は、乗り合いを主体とし、柔軟な経路やスケジュールで運行される交通サービスを指す。

ミニバンなどの車両を使って、door-to-doorの移動手段を提供するオンデマンド交通サービスは、dial-a-ride と呼ばれる。1990年代に、Dial⁷⁾は完全自動化されたdial-a-ride システムを開発した。複数の利用者のリクエストに対する、dial-a-rideのルーティング・スケジューリングは、dial-a-ride 問題 (DARP) と呼ばれ、長年、オペレーショ

ンズ・リサーチ (OR) 分野を中心に研究対象とされている^{8) 9) 10)}。FMODも乗り合いを含むオンデマンドサービスであるため、同様のアルゴリズムを用いるが、本研究では対象としない。DARP、およびその派生問題に対するアルゴリズムについては、Cordeau¹¹⁾による包括的なレビューを参照されたい。

FMOD は、利用者に対して乗車便の選択肢集合を提示し、利用者は、その中から嗜好に応じて選択を行う。選択肢集合を最適化する問題は、assortment 最適化問題と呼ばれ、DARP と同様、OR の分野において、多くの研究がなされている^{12) 13) 14)}。しかしながら、交通サービスの選択に対して適用した例は見当たらない。本研究では、オンデマンド交通の文脈においての assortment 最適化問題を対象とする。特に、利用者の嗜好を考慮するために、離散選択モデル¹⁴⁾に基づいた assortment 最適化問題を扱う。

3. Flexible Mobility On Demand

(1) コンセプト

FMODは、需要と供給に応じて事業者が保有する同種の車両群を異なる交通サービスに動的に割り当てることを特徴としたオンデマンド交通システムである（図-1）。ある車両は一日のうちでサービス、つまり運行モードを動的に変えながら運行する。予約ベースのシステムであり、利用者からのリクエストに応じて、各サービスに対して利用者が選択可能な乗車便の選択肢集合を提示する。その際、利用者の選択モデルに基づき、事業者の利益の最大化するように、乗車便の選択肢集合を最適化する。

FMODにおける各サービスは次のように特徴付けられる。

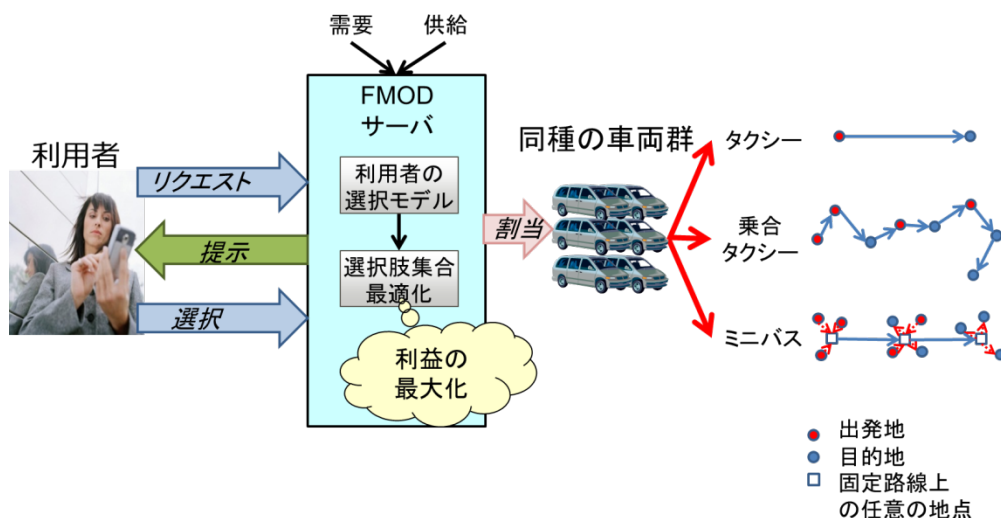


図-1 FMODのコンセプト

a) タクシー

単一のリクエストに対して、door-to-doorの移動手段を提供する。乗客は任意の地点において、乗降することが可能である。

b) 乗合タクシー

複数のリクエストに対して、door-to-doorの移動手段を提供する。各乗客は任意の地点で乗降可能であるが、同乗者のための迂回が発生することから、各乗客の旅行時間はタクシーよりも増加する可能性がある。

c) ミニバス

複数のリクエストに対して、既定のルート上の移動手段を提供する。乗客はルート上の任意の地点で乗降できる。同乗者の乗降による旅行時間の増加は発生するが、ルートから逸脱しないので、同乗者のための迂回による旅行時間の増加は発生しない。別途、乗降地点と出発地・目的地の間の移動が必要である。従来の路線バスと異なり、時刻表は存在せず、最初の乗客が割り当てられるまで運行は開始しない。

各サービスは、異なる料金体系で提供される。また、同一車両により全てのサービスを実施するため、例えば、定員4～8人程度のセダン、またはミニバンを用いることを想定している。

FMODでは、状況に応じて、同一車両を異なるサービスに動的に割り当てることが可能なので、時間的な需要の変動や空間的な需要の偏在にも柔軟に対応できる。例えば、需要の多いオンピーク時には、タクシーよりも乗合タクシー、またはミニバスに多くの車両を割り当てることで、車両不足でサービスを提供できない事態を防ぐことができる。更に、需要が多いエリアから少ないエリアへ向かう場合は、乗合タクシー、またはミニバスとして運行し、逆方向へ戻るときは、タクシーとして運行するといった、需要と供給に応じた効率的な運用が可能に

なる。これにより、従来の交通サービスに比べて、事業者の収益性と利用者の満足度の両方を向上させることが期待される。

(2) 予約処理

図-2に示すように、FMODの予約処理は以下の4つのステップで行われる。

a) ステップ1

利用者はスマートフォンアプリなどを介してサーバにリクエストを送信する。リクエストには、以下の情報を含む。

- ・出発地 (O)
 - ・目的地 (D)
 - ・希望出発時刻の time window ($[PDT^-, PDT^+]$)
- または
- ・希望到着時刻の time window ($[PAT^-, PAT^+]$)
 - ・座席数 (N^{seat})

希望出発時刻に関しては、“即刻”と指定してもよい。

b) ステップ2

サーバは、リクエストに基づいて、各サービスに対する乗車便の選択肢集合を利用者に提示する。以降、乗車便を **product**、乗車便の選択肢集合を **assortment** と呼ぶ。各 **product** は、以下の情報を含む。

- ・サービス種別
- ・乗車地点 (L^P)
- ・降車地点 (L^D)
- ・予定乗車時刻 (SDT)
- ・予定降車時刻 (SAT)
- ・料金 ($price$)

c) ステップ3

利用者は提示された **assortment** の中から **product** を一つ選択し、サーバに送信する。もしくは、利用者は提示された **product** を全て却下してもよい。

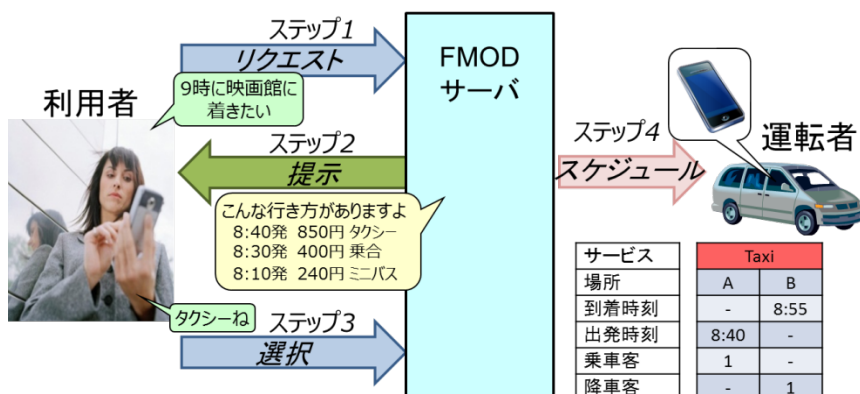


図-2 FMODの予約処理

d) ステップ4

サーバは利用者の選択結果を受信すると、それに基づいて車両のスケジュールを更新し、該当車両の運転者のスマートフォンアプリに対してスケジュールを送信する。

4. Assortment 最適化問題

FMOD は、前述のステップ2において、利用者からのリクエストに応じて、assortment を利用者に提示する。利用者に提示する assortment は、以下の2つのフェーズにより決定する。

フェーズ1：feasible product 集合の生成

各車両をそれぞれのサービス（タクシー、乗合、ミニバス）として運行した場合に、スケジュールや乗車定員に関する制約を満たすスケジュールに基づき、実現可能な乗車便、すなわち feasible product の集合を生成する。

フェーズ2：assortment 最適化

フェーズ1で得られた集合に含まれる feasible product の組み合わせにより構成される assortment のうち、利益の期待値が最大となるものを選択する。

以下、各フェーズについてより詳細に説明する。

(1) Feasible product 集合の生成

各車両はそれぞれのサービスとして運行することができる。また、ある車両をあるサービスとして運行する場合、時間帯の異なる複数の product を生成することができる。したがって、 N を車両の集合、 M をサービスの集合、 L を車両とサービスの対に対する product の最大数とすると、product の集合 P は、 $N \times M \times L$ の大きさを持つ集合である。車両 n で運行されるサービス m の l 番目の product は $p_{n,m,l}$ で表される。

$$P = \{p_{n,m,l}\} \quad n \in N, m \in M, l \in L \quad (1a)$$

$$M = \{\text{taxi, share, bus}\} \quad (1b)$$

ここで、taxi, share, bus は、それぞれ、タクシー、乗合タクシー、ミニバスのサービスを指す。

a) スケジュール

各 product は運行単位の車両のスケジュールに関連付けられる。ここで、運行単位の車両のスケジュールを schedule block と呼ぶ。図-3 に示すように、各車両のスケジュールは、schedule block の系列 $SB_1, SB_2, \dots$ からなる。schedule block には、サービス種別、場所（出発地、到着地、および経由地）、各場所における到着時刻、および出発時刻、乗降客の情報を含む。サービス種別には、タクシー、乗合タクシー、ミニバスに加えて、前のサービスの到着地点から、次のサービスの出発地点までの空車

	SB_1				SB_2		SB_3		SB_4		SB_5			
service	Shared				empty		taxi		empty		Mini-bus			
location	a	b	c	d	d	e	e	f	f	g	g	h	i	j
Arrival Time	-	9:15	9:30	9:50	-	13:00	-	13:30	-	14:40	-	15:00	15:10	15:20
Departure time	9:00	9:20	9:35	-	12:30	-	13:05	-	14:30	-	14:50	15:01	15:11	-
Boarding passengers	1	2	-	-	-	-	3	-	-	-	4,5	6,7	-	-
Alighting passengers	-	-	1	2	-	-	-	3	-	-	-	4	6	5,7

図-3 スケジュールの例

SB_1					SB_2					SB_3					SB_1					SB_2					SB_3				
service	Shared				empty				Mini-bus				service	Shared				empty				Mini-bus							
location	a	b	c	d	d				g				location	a	b	c	d	d				g							
Arrival Time	-	9:15	9:30	9:50	-				14:40				Arrival Time	-	9:15	9:30	9:50	-				14:40							
Departure time	9:00	9:20	9:35	-	12:30				-				Departure time	9:00	9:20	9:35	-	12:30				-							
Boarding passengers	1	2	-	-	-				-				Boarding passengers	1	2	-	-	-				-							
Alighting passengers	-	-	1	2	-				-				Alighting passengers	-	-	1	2	-				-							

passenger 3 for taxi

SB_1					SB_5					SB_6					SB_3											
service	Shared				empty				taxi				empty				Mini-bus									
location	a	b	c	d	d	e	e	f	f	g	g				h				i				j			
Arrival Time	-	9:15	9:30	9:50	-	13:00	-	13:30	-	14:40	-				15:00				15:10				15:20			
Departure time	9:00	9:20	9:35	-	12:30	-	13:05	-	14:30	-	14:50				15:01				15:11				-			
Boarding passengers	1	2	-	-	-	-	3	-	-	-	4,5				6,7				-							
Alighting passengers	-	-	1	2	-	-	-	3	-	-	-				4				6				5,7			

passenger 3 for shared-taxi

SB_1					SB_1'					SB_2					SB_3											
service	Shared				empty				Shared				empty				Mini-bus									
location	a	b	c	d	d	e	e	f	f	g	g				h				i				j			
Arrival Time	-	9:15	9:30	9:50	-	13:00	-	13:30	-	14:40	-				15:00				15:10				15:20			
Departure time	9:00	9:20	9:35	-	12:30	-	13:05	-	14:30	-	14:50				15:01				15:11				-			
Boarding passengers	1	2	-	-	-	-	3	-	-	-	4,5				6,7				-							
Alighting passengers	-	-	1	2	-	-	-	3	-	-	-				4				6				5,7			

(a) ケース 1

(b) ケース 2

図-4 スケジュール更新の例

での移動 (empty) も含まれる。

予約中の利用者に対する **product** を生成するには、二通りの方法でスケジュールを更新することが考えられる。一つは、図4 (a) に示すように、予約中の利用者を最初の乗客として新たな **schedule block** を生成するケースである (ケース1)。もう一つは、図4 (b) に示すように、サービスが乗合タクシー、またはミニバスの場合に、既に利用者の割り当てられた **schedule block** を更新して予約中の利用者を追加するケースである (ケース2)。

生成・更新された **schedule block** に基づき、現在の利用者に対する **product**、すなわち、乗車地点、降車地点、予定乗車時刻、予定降車時刻、料金を決定する。

b) Feasible product

生成・更新した **schedule block** が以下の制約1から4を満たす場合、それに関連付けられた **product** を **feasible product** と呼び、その集合を F で表す。

$$F \subseteq P = \{p_{n,m,l}\} \quad n \in N, m \in M, l \in L \quad (2)$$

制約1：schedule block 間の無競合： 前の **schedule block** の到着時間が、次の **schedule block** の出発時間を越えない。

制約2：乗車定員： 同時に車両内に存在する乗客の数が車両の定員を超過しない。

制約3：最大旅行時間： 各乗客の旅行時間が最大値 $IVTT^{max}$ を超えない。

制約4：約束時刻： 既に **schedule block** に割り当てられている利用者へ通知済みの予定乗車時刻、または予定降車時刻と、更新後の **schedule block** での予定時刻との差が許容値 T^{max} を超えない。

c) Tight feasible / Loose feasible product

FMOD では利用者の希望を尊重しつつ事業者利益を向上させるため、必ずしも利用者の希望時刻に一致した **product** のみを提示するわけではない。このため、利用者の希望時間範囲から幅を持たせた時間範囲で **feasible product** を生成する必要がある。具体的には、リクエストで指定された希望出発時刻の **time window**、または、希望到着時刻の **time window** を両側に最大逸脱時間 SD^{max} だけ拡張した範囲で、**feasible product** を生成する。すなわち、希望出発時刻を指定した利用者に対しては式 (3) を満たす **product** を、希望到着時刻を指定した利用者に対しては式 (4) を満たす **product** を生成する。

$$PDT^- - SD^{max} \leq SDT_p \leq PDT^+ + SD^{max} \quad \forall p \in F \quad (3)$$

$$PAT^- - SD^{max} \leq SAT_p \leq PAT^+ + SD^{max} \quad \forall p \in F \quad (4)$$

feasible product のうち、リクエストで指定された希望出発時刻の **time window**、または、希望到着時刻の **time window** を満たすものを **tight-feasible product** と呼び、そうでないものを **loose-feasible product** と呼ぶ。それぞれの集合を、 F^{tight} , F^{loose} とすると、希望出発時刻を指定した利用者に対しては式 (5)、希望出発時刻を指定した利用者に対しては式 (6) が成立し、 $F^{tight} \cup F^{loose} = F$ である。

$$PDT^- \leq SDT_p \leq PDT^+ \quad \forall p \in F^{tight} \quad (5)$$

$$PAT^- \leq SAT_p \leq PAT^+ \quad \forall p \in F^{tight} \quad (6)$$

前述のスケジュール更新のケース1では、車両の利用可能性に応じて、まず、多くても1つの **tight-feasible product** を生成し、それに加えて、複数の **loose-feasible product** を生成する。具体的には、最大逸脱時間 SD^{max} を一定の時間間隔 $T^{interval}$ に分割し、各時間間隔において新たに生成した **schedule block** が制約1から4を満たすかを調べる。制約を満たす場合はその **schedule block** に基づき、**loose-feasible product** を生成する。

スケジュール更新のケース2では、拡張された **time window** の範囲内で、すでに利用者の割り当てられた **schedule block** を探索し、予約中の利用者をその **schedule block** に追加した場合に、制約1から4を満たすかを調べる。制約を満たす場合はその **schedule block** に基づき、**tight-feasible product**、または **loose-feasible product** を生成する。

(2) Assortment 最適化

フェーズ1で得られた **feasible product** の集合から、事業者の利益の期待値が最大となるような **assortment** を選択、つまり、**assortment** に含める **feasible product** を選択する。本研究では、予約中の利用者から得られる利益の最大化を予約毎に繰り返すという近視眼的なアプローチをとる。

ここで、**product** $p_{n,m,l}$ に対して、決定変数 $p_{n,m,l}$ を導入する。すなわち、 $p_{n,m,l}$ を **assortment** に含めるのであれば、 $x_{n,m,l} = 1$ 、そうでなければ、 $x_{n,m,l} = 0$ となる。 $x_{n,m,l}$ のマトリクス X はある **assortment** を表す。

$$X = (x_{n,m,l}) \quad (7)$$

$$x_{n,m,l} \in \{0, 1\} \quad \forall n \in N, m \in M, l \in L$$

利用者から得られる利益は利用者の選択に依存するため、利用者の嗜好を考慮して、**assortment** を最適化しなければならない。利用者の嗜好を考慮するために、最適

化フレームワークに離散選択モデルを組み込む。

a) 選択モデル

利用者は多項ロジットモデル (multinomial logit model, MNL) に従って assortment の中から product の選択を行うと仮定する。各 product $p_{n,m,l}$ を選択した場合、および、全ての選択肢を却下した場合について、それぞれの効用関数の確定項 $V_{n,m,l}$, V_{reject} を次のように定義する。

$$\begin{aligned} V_{n,taxi,l} = & ASC_{taxi} - price_{n,taxi,l} \\ & - VOT^{IVTT} * IVTT_{n,taxi,l} \\ & - VOT^{SDE} * SDE_{n,taxi,l} \\ & - VOT^{SDL} * SDL_{n,taxi,l} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_{n,share,l} = & ASC_{share} - price_{n,share,l} \\ & - VOT^{IVTT} * (IVTT_{n,share,l} + \Delta IVTT_{n,share,l}) \\ & - VOT^{SDE} * SDE_{n,share,l} \\ & - VOT^{SDL} * SDL_{n,share,l} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_{n,bus,l} = & ASC_{bus} - price_{n,bus,l} \\ & - VOT^{IVTT} * IVTT_{n,bus,l} \\ & - VOT^{SDE} * SDE_{n,bus,l} \\ & - VOT^{SDL} * SDL_{n,bus,l} \\ & - VOT^{AET} * AET_{n,bus,l} \end{aligned} \quad (10)$$

$$V_{reject} = \beta_{dist} * STD \quad (11)$$

ここで、 ASC_m は各サービスの選択肢固有定数、 $price_{n,m,l}$ は料金、 $IVTT_{n,m,l}$ は乗車時間、各 VOT はそれぞれの要素に対する時間価値 (Value of Time)、 STD は最短旅行距離、 $\beta_{dist} (< 0)$ はパラメータである。 $AET_{n,bus,l}$ はミニバスの場合のアクセス・イグレス時間である。 $\Delta IVTT_{n,share,l}$ は乗合タクシーの場合、同乗者による迂回のために発生する追加の乗車時間である。 $SDE_{n,m,l}$ 、および $SDL_{n,m,l}$ は、リクエストで指定された希望時間の time window に対する予定時間の逸脱時間であり、De Palma ら¹⁶⁾に従い schedule delay と呼ぶ。time window より前側の schedule delay が $SDE_{n,m,l}$ 、time window より後側の schedule delay が $SDL_{n,m,l}$ であり、希望出発時刻を指定した場合、式 (12)、(13) で定義され、希望到着時刻を指定した場合は、式 (14)、(15) で定義される。

$$SDE_p = \max(0, (PDT^- - SDT_p)) \quad \forall p \in F \quad (12)$$

$$SDL_p = \max(0, (SDT_p - PDT^+)) \quad \forall p \in F \quad (13)$$

$$SDE_p = \max(0, (PAT^- - SAT_p)) \quad \forall p \in F \quad (14)$$

$$SDL_p = \max(0, (SAT_p - PAT^+)) \quad \forall p \in F \quad (15)$$

定義 (式 (3)-(6)) より、tight-feasible product の schedule delay はゼロであり、loose-feasible product の schedule delay は

正の値となる。

全ての選択肢を却下する場合は、利用者は FMOD 以外の交通手段を選択すると仮定する。FMOD 以外の利用可能な交通手段の効用を個別に求めることは困難であるため、ここでは、最短旅行距離に比例して、効用が低下するという簡易なモデルに集約している。

X で表される assortment を利用者に提示した場合に、product $p_{n,m,l}$ の選択確率 $Prob_{n,m,l}(X)$ は、式 (8)-(11) に基づき、式 (16) で求められる。

$$Prob_{n,m,l}(X) = \frac{x_{n,m,l} \exp(\mu V_{n,m,l})}{\exp(\mu V_{reject}) + \sum_{n' \in N} \sum_{m' \in M} \sum_{l' \in L} x_{n',m',l'} \exp(\mu V_{n',m',l'})} \quad (16)$$

ここで、 μ はスケールパラメータである。

b) 最適化モデル

feasible product の集合から、事業者の利益の期待値が最大となるような assortment を選択する問題は、前述の選択モデルを組み込んで、次式のように定式化できる。

$$\text{maximize } \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} r_{n,m,l} Prob_{n,m,l}(X) \quad (17a)$$

$$\text{subject to } \sum_{n \in N} \sum_{l \in L} x_{n,m,l} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (17b)$$

$$x_{n,m,l} \leq 0 \quad \forall p_{n,m,l} \notin F, \forall n \in N, \forall m \in M \quad (17c)$$

ここで、 $r_{n,m,l}$ は product $p_{n,m,l}$ から得られる利益である。

式 (17a) の目的関数は、決定変数 X で表される assortment を利用者に提示した場合に、得られる利益の期待値である。式 (17b) は、各サービスにつき、多くても 1 つの product が assortment に含まれるという制約条件である。式 (17c) は、feasible product でなければ assortment に含まれないことを保証する制約条件である。式 (17a)-(17c) は非線形混合整数計画問題であるが、Davis らの研究¹⁷⁾により線形計画問題に変換して解くことが可能である。

5. シミュレーション実験

FMOD の有効性を検証するために、シミュレーション実験を行った。FMOD のサーバは C++、および R、シミュレーションフレームワークは C++ で実装した。シミュレーション時間は 24 時間とし、その間、仮想世界に

発生させた利用者、および車両と、FMODのサーバとの間で発生する、予約やスケジュール割当のためのインタラクションを模擬した。道路ネットワーク上の交通状況の模擬は行っていない。

(1) 実験条件

a) 対象エリア

図-5に示すように、東京都日野市の東西約9km、南北約8kmを対象エリアとし、OpenStreetMapのデータを利用して、31,287ノード、63,463リンクで構成される道路ネットワークを構築した。

b) 供給パラメータ

総車両台数は60台とし、各車両の乗車定員は運転手を除き8人とした。各車両に運転手は常に割り当てられているとし、運転手の車両への割当スケジューリングは考慮しない。

前述した通り、交通状況は考慮していないため、全ての車両はスケジュール通りに遅延なく移動すると仮定した。ミニバスのルートは実際の路線バスのルートと同一とした。制約3における最大旅行時間 $IVTT^{max}$ はタクシーでの旅行時間の2倍とし、制約4における約束時刻と予定時刻との差の許容値 T^{max} は10分とした。また、予定時刻の希望時刻のtime windowからの最大逸脱時間 SD^{max} を90分とし、loose-feasible productを生成する際の時間間隔 $T^{interval}$ を15分とした。

料金については、タクシーは実際の料金体系を参考に設定し、乗合タクシーはタクシーの50%、ミニバスは一律300円とした(表-1)。また、運用コストについては、車両1台あたりの固定コストが20,000円/日、走行距離に比例した変動コストが20円/kmと仮定した。

b) 需要パラメータ

FMODに対する需要は、パーソントリップ調査(第5回東京都市圏)、国勢調査(平成22年度)などを参考に

生成した合成データを用いた。利用者数は、1日4,600人とした。出発地、目的地には、市内の任意地点、および駅、病院、市役所を設定した。任意地点の選択にあたっては、人口密度データ(500mメッシュ)に基づき、人口密度が高いエリア内から高確率で地点を選択するようにした。病院、市役所を起終点とする移動は日中の時間帯に一定の需要があると仮定した。システム上は、利用者は希望乗車時刻と希望到着時刻のどちらでも指定できるが、シミュレーションでは、全ての利用者が希望乗車時刻を指定するように設定した。希望乗車時刻のtime windowは30分とし、希望乗車時刻のtime windowの中心時刻とリクエスト時刻の差は、平均、標準偏差ともに1時間の正規分布に従うと仮定した。図-6に、希望出発時間で集計した時間帯別のリクエスト数の分布を示す。

ロジットモデルのパラメータは、既存研究を参考に設定した。まず、スケールパラメータ μ は、Koppelmanらの研究¹⁹⁾に基づき、0.5に設定した。次に、乗車時間の時間価値 VOT^{IVTT} の分布は、表-2のような離散確率分布に従うと仮定した。アクセス・イグレス時間の時間価値 VOT^{AET} は、加藤らの研究¹⁹⁾を参考に、 VOT^{IVTT} の1.7倍とした。通常、time windowの前側のschedule delay SDE よりも後側のschedule delay SDL の方が効用の低下度合いが大きい、つまり、 SDL の時間価値 VOT^{SDL} は、 SDE の時間価値 VOT^{SDE} よりも大きいと考えられる。したがって、 VOT^{SDE} 、 VOT^{SDL} をそれぞれ、 VOT^{IVTT} の20%、

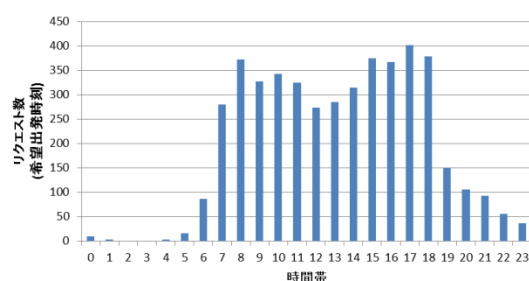


図-6 時間帯別のリクエスト数の分布

表-1 各サービスの料金

サービス	料金
タクシー	500円 + 50円(320m 毎)
乗合タクシー	250円 + 25円(320m 毎)
ミニバス	300円(定額)

表-2 VOT^{IVTT} の分布

VOT^{IVTT}	分布
10円/分	30%
20円/分	50%
30円/分	7%
40円/分	7%
50円/分	6%



図-5 対象エリア

80%に設定した。そして、乗合タクシーの場合の追加の乗車時間 $\Delta IVTT$ は履歴データに基づき、 $IVTT$ の40%と仮定した。

選択肢固有定数 ASC_{taxi} , ASC_{share} , ASC_{bus} は、それぞれ3, 1, 1に設定した。タクシーの値が他よりも高いのは、他の全ての条件が同じだった場合に、快適性などの面からタクシーの効用の方が高いと考えられるためである。最後に、全選択肢を却下した場合の効用に関するパラメータ β_{dist} は、タクシーにおける距離に比例した効用の低下度合に基づき、 -0.002 に設定した。

c) 評価シナリオ

FMODの有効性を示すため、様々なシナリオでの比較評価を行った。

FMODについては、2つのバージョンの最適化モデルを用意した。一つは、上述した通常モデルである。このバージョンをFMODとする。もう一つは、feasible productが存在する限りは、少なくとも各サービスについて1つのproductをassortmentに含めるモデル、すなわち、式(17b)を不等号から等号に変更したモデルである。このバージョンをFMOD-P1とする。

ベースケースとして、最適化を行わないモデル、すなわち、全てのfeasible productをassortmentに含めるモデルを考える。このモデルをNO-OPTとする。

次に、車両に割り当てるサービスを固定した場合を考える。つまり、ある車両は一つのサービスのみで運行され、途中で別のサービスを行うことはできない。ただし、FMODと同様、assortmentの最適化は行われることに注意されたい。この場合のシナリオとして、各サービスへ割り当てられる車両の台数を10台ずつ変化させた全28シナリオを用意した。この中には、全ての車両をそれぞれ、タクシーのみ、乗合のみ、バスの上に割り当てた特殊なシナリオも含まれる。

最初に、NO-OPT, FMOD, FMOD-P1の間での比較を行う(実験1)。これは、assortmentを最適化する効果を調べるためである。次に、サービスの割り当てを固定した全28シナリオと、NO-OPT, FMOD, FMOD-P1との比較を行う(実験2)これは、車両に動的にサービスを割り当てる効果を調べるためである。

(2) 実験結果

a) 実験1

図-7に、NO-OPT, FMOD, FMOD-P1のそれぞれにおける事業者の利益を示す。ここでは、NO-OPTの利益が1となるように正規化している。この結果から、FMOD, および FMOD-P1 は、NO-OPT に比べると、それぞれ 19%, 8%の利益の向上を達成していることが分かる。したがって、assortmentの最適化が利益

向上に大きく寄与していることが確認できた。

図-8に、利用者に提示したassortmentの構成を示す。図中のT, S, Bはそれぞれタクシー, 乗合タクシー, ミニバスのproductがassortmentに含まれることを示しており、例えば、TSBは、全てのサービスのproductがassortmentに含まれることを意味する。図から、NO-OPT, FMOD-P1は、ほとんどの場合に全てのサービスのproductがassortmentに含まれるのに対し、FMODでは、ミニバスがassortmentに含まれない割合が多い。

図-9に、利用者が選択したサービスの割合を示す。FMODとFMOD-P1では、assortmentの構成は大きく異なるにも関わらず、選択割合は非常に類似している。NO-OPTと比較すると、FMOD, FMOD-P1では、ミニバスの選択割合が減少し、タクシーの選択割合が増加し、全選択肢が却下される割合が増加している。FMOD-P1は、assortmentにミニバスが含まれるのにもかかわらず、選択割合が少ないことを考えると、assortmentに含まれるのは効用が小さく選択確率の低いミニバスのproductであると思われる。これらの結果から、FMOD, FMOD-P1

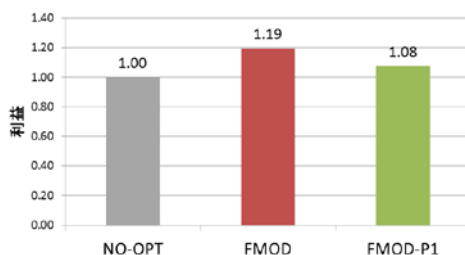


図-7 利益の比較 (実験1)

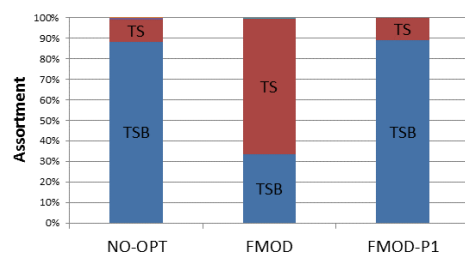


図-8 assortmentの構成 (実験1)

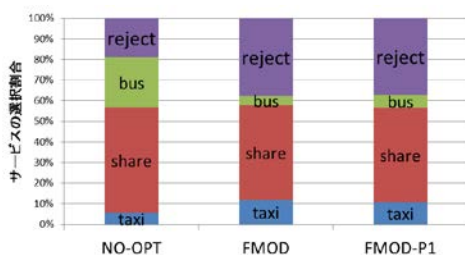


図-9 サービスの選択割合 (実験1)

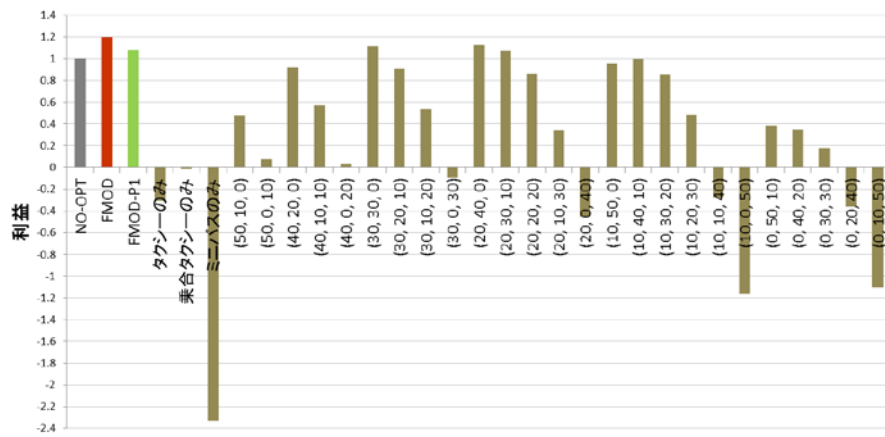


図-10 利益の比較 (実験 2)

ともに、利用者がミニバスではなくタクシーを選択するように **assortment** を最適化する傾向がみられる。これは、最適化モデルが、予約毎に、予約中の利用者から得られる利益の最大化を繰り返すという近視眼的アプローチをとっているため、将来需要による利益の見込めるミニバスを過小評価しているためだと考えられる。

b) 実験 2

図-10 に、NO-OPT, FMOD, FMOD-P1, および車両に割り当てるサービスを固定した 28 シナリオにおいての事業者の利益を示す。ここでも、実験 1 と同様に、NO-OPT の利益が 1 となるように正規化している。図中の、タクシーのみ、乗合タクシーのみ、ミニバスのみ、というシナリオは、それぞれ、全ての車両をタクシー、乗合タクシー、ミニバスに割り当てたケースである。また、図中の 3 つの数字の組は、タクシー、乗合タクシー、ミニバスに割り当てられた車両台数を示す。例えば、(30, 20, 10) は、タクシーに 30 台、乗合タクシーに 20 台、ミニバスに 10 台を割り当てたシナリオを意味する。

この結果から、まず、全ての車両をタクシー、乗合タクシー、ミニバスに割り当てたケースでは、利益を出せていないことが分かる。また、ミニバスの台数が多い場合は、大きく利益が下がっているのが分かる。FMOD は、全シナリオ中で最も利益が高い (20, 40, 0) と比較しても、6%の利益を向上しており、**assortment** の最適化の効果には劣るものの、車両に動的にサービスを割り当てることが利益向上に一定の効果があることを確認できた。

一般的に言えば、車両への動的なサービス割り当ての効果は、時間的な需要の変動や空間的な需要の偏在が大きい時に増加すると予想される。しかしながら、今回、入力とした需要は、オンピーク、オフピークでの需要の差は比較的小さく、移動方向による需要の差も生じていない。したがって、需要の発生パターンによっては、車両への動的なサービス割り当ての効果がさらに向上する

ものと考えられる。

6. おわりに

本論文では、我々の提案するオンデマンド交通システムである FMOD について紹介した。また、シミュレーションによる評価により FMOD の有効性を検証した結果について報告した。FMOD は、利用者に提示する **assortment** の最適化と、車両への動的なサービス割り当てを大きな特徴としている。シミュレーション評価により、**assortment** の最適化、車両への動的なサービス割り当てのそれぞれが、事業者利益の向上に寄与することが明らかになった。

今後の方向性としては、利用者に提示する **assortment** の最適化をさらに進めることが挙げられる。今回、予約中の利用者から得られる利益の最大化を予約毎に繰り返すという近視眼的なアプローチをとっているが、時間的、空間的な需要予測に基づいて、1 日の総利益を最大化するという大局的なアプローチが必要である。また、何らかの形のインセンティブも含め、動的な料金の最適化も検討していく。さらには、バスルートの最適化も必要である。FMOD は、路線バスに比べて小型の車両を用いるため、従来のバスが走行できなかった細街路も走行可能になることから、より利便性の高いサービスを提供できる可能性がある。評価に関しては、今回、利用者による FMOD 以外の交通機関の選択行動を簡易な手法によりモデル化したが、実際には個人毎に異なる交通手段の選択肢集合を考慮したモデルを用いて評価する必要がある。さらには、実証実験を通した有効性評価も進めていく予定である。

参考文献

- 1) バス産業勉強会：バス産業勉強会報告書 ～ バス産業の向かうべき方向性 ～，国土交通省，2009
- 2) 東京ハイヤー・タクシー協会：東京のタクシー，2013.
- 3) 乗り合い型交通システムコンビニクル：
<http://www.nakl.t.u-tokyo.ac.jp/odt/>
- 4) Uber: <https://www.uber.com/>
- 5) Lyft: <http://www.lyft.me/>
- 6) Sidecar: <https://www.side.cr/>
- 7) R. B. Dial: Autonomous dial-a-ride transit introductory overview., *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 3(5), pp. 261-275, 1995.
- 8) Coslovich, R. Pesenti, and W. Ukovich. A two-phase insertion technique of unexpected customers for a dynamic dial-a-ride problem. *European Journal of Operational Research*, Vol.175(3), pp.1605-1615, 2006.
- 9) L. Fu: Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.36: pp. 485-506, 2002.
- 10) J. F. Cordeau, and G. Laporte: A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.37(6), pp.579-594, 2003.
- 11) J. F. Cordeau, and G. Laporte: The dial-a-ride problem: models and algorithms, *Annals of Operations Research*, Vol.153, pp.29-46, 2007.
- 12) J. Davis, G. Gallego, and H. Topaloglu: Assortment optimization under variants of the nested logit model., Technical report, Cornell University, School of Operations Research and Information Engineering, 2013.
- 13) K. Talluri and G. van Ryzin: Revenue management under a general discrete choice model of consumer behavior., *Management Science*, Vol.50(1), pp.15-33, 2004.
- 14) P. Rusmevichientong, Z. J. M. Shen, , and D. B. Shmoys: Dynamic assortment optimization with a multinomial logit choice model and capacity constraint. *Operations Research*, Vol.58(6), pp.1666-1680, 2010.
- 15) M. E. Ben-Akiva and S. Lerman: *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand.*, MIT Press, 1985
- 16) A. De Palma, M. E. Ben-Akiva, C. Lefevre and N. Litinas: Stochastic Equilibrium Model of Peak Period Traffic Congestion, *Transportation Science*, Vol. 17, No. 4, pp. 430-453, 1983
- 17) J. Davis, G. Gallego, G. and Topaloglu, H.: Assortment planning under the multinomial logit model with totally unimodular constraint structures. Working paper, 2013.
- 18) F. S. Koppelman, and C. Bhat: A self-instructing course in mode choice modeling: Multi-nomial and nested logit models, Prepared for U. S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, 2006.
- 19) H. Kato, M. Tanishita and T. Matsuzaki: Meta-analysis of value of travel time savings: Evidence from japan., 14th World Conference on Transport Research, 2010.
- 20) C. H. Bhat: Incorporating observed and unobserved heterogeneity in urban work travel mode choice modeling, *Transportation Science*, Vol. 34(2), pp.228-238, 2000.
- 21) L. Yang: Modeling preferences for innovative modes and services: A case study in lisbon, 2010.
- 22) T. Ikeda, B. Atasoy, X. Song and M. E. Ben-Akiva: The Concept and Impact Analysis of a Flexible Mobility on Demand System, Working paper, Massachusetts Institute of Technology, 2014.

(2014.? 受付)

Flexible Mobility On Demand: Design Concept and Simulation Evaluation for Innovative Demand-Responsive Transportation Service

Takuro IKEDA, Takushi FUJITA and Moshe E. Ben-Akiva

For a profit-making business, an innovative transportation service is required that provides high user satisfaction in terms of both convenience and fares and is viable. This paper introduces an innovative demand responsive transportation service called Flexible Mobility on Demand (FMOD) that has flexibility in terms of vehicle allocation and provides a menu of travel options to users. FMOD dynamically allocates a fleet of vehicles to different transportation services such as taxi, shared taxi and minibus. It offers convenient and reasonably fared transportation services through an optimization framework where services are assigned based on a choice model in order to maximize profit. FMOD is expected to improve both user satisfaction and business profits as compared to conventional means of transportation. This paper presents the concept of FMOD and provides experimental results as a proof of concept using a simulation framework.