

令和5年度 課題研究

ライドヘイリングシステムの待ち時間を計算する簡便
な方法

2025年2月

長岡技術科学大学 工学部
環境社会基盤工学課程 都市交通研究室

DE LEON BERMUDEZ HECTOR DANIEL

指導教員 加藤 哲平

1. 序論

1.1 背景

都市化の進展により、世界各地で都市が急速に拡大し、効率的で信頼性の高い交通システムが急務となっている。都市の人口が増加するにつれ、モビリティへの需要が高まり、既存の公共交通インフラに大きな負担がかかる。公共交通システムは伝統的に都市のモビリティを支える基幹システムであり、多数の人々を移動させるための費用対効果に優れた大容量のソリューションを提供してきた。しかし、こうしたシステムの導入と維持には、インフラ、運行コスト、長期計画に多額の投資が必要である。多くの急成長都市では、都市拡大のペースが公共交通インフラの整備を上回ることが多く、不十分なサービスや代替交通手段の出現につながっている。

公共交通機関は固定ダイヤとあらかじめ決められたルートで運行されるが、人口密度の低い地域やオフピーク時間帯には非効率な場合がある。例えば、郊外や農村部では、公共交通機関の運行頻度が低いか、存在しない場合があり、住民の移動手段は限られている。同様に、ラッシュ時以外の時間帯は、公共交通機関の運行頻度が低下することが多く、乗客の待ち時間が長くなる。こうした制約から、ライドヘイリングサービスのような、利用者にとってより柔軟で利便性の高い代替交通手段が台頭してきた。

ライドヘイリングサービスは、従来の公共交通機関に代わる人気サービスとして台頭してきた。これらのサービスでは、利用者はオンデマンドで乗車依頼をすることができ、ドライバーは数分以内に利用者のいる場所に到着し、目的地まで直接移動する。公共交通機関とは異なり、ライドヘイリングサービスは需要主導型であるため、利用者の特定のニーズや好みに合わせることができる。この柔軟性により、ライドヘイリングサービスは、公共交通機関が不十分な地域や利用できない地域において特に魅力的なものとなっている。

ライドヘイリングサービスの急速な成長は、研究者や政策立案者の間で大きな関心を引き起こし、こうしたサービスが都市のモビリティに与える影響を理解しようとしている。ライドヘイリングサービスの成功に影響を与える重要な要因の一つは、待ち時間である。待ち時間は、サービスの利用経験全体に直接影響するため、利用者の満足度を決定する重要な要素である。調査によると、利用者は待ち時間の短縮に高い価値を置いており、多くの場合、待ち時間の短縮は運賃の値下げと同じである。例えば、Guoら（2020）の研究によると、標準化された1単位の待ち時間を節約する価値は、平均的な乗客の標準化された0.97単位の料金を下げることに匹敵する。このことは、ライドヘイリングシステムにおいて待ち時間を最小化することが、利用者の満足度を高め、サービスの継続的な利用を促すために重要であることを強調している。

ライドヘイリングサービスは、特にサービスの信頼性と効率性の面で、独自の課題に直面している。最も大きな課題の一つは、待ち時間の正確な計算と予測である。公共交通機関とは異なり、ライドヘイリングシステムにおける待ち時間は、ドライバーの稼働率、交通状況、需要パターンなど、さまざま

まな要因の影響を受ける。これらの要因は時間や空間によって大きく変化するため、待ち時間を高い精度で予測することは難しい。

ライドヘイリングシステムにおける待ち時間の計算は複雑であるため、待ち行列モデルから機械学習アルゴリズムに至るまで、様々なモデリング手法が開発されてきた。しかし、既存の手法は多くの場合、多大な計算リソースと過去のデータを必要とするため、広範囲に、あるいは迅速に導入することは現実的ではありません。このため、大規模な計算能力や事前情報を必要とせずに、信頼性の高い待ち時間の推定値を提供できる、わかりやすい手法が求められている。

このような課題を踏まえ、本研究では、ライドヘイリングシステムにおける待ち時間を計算するための簡便な手法を開発することを目的とする。提案手法はネットワークベースのアプローチを用いており、都市部は相互に接続されたノードとして表現され、ゾーン間の最短移動時間を計算するためにフロイド・ウォーシャル・アルゴリズムなどの最短経路アルゴリズムが採用されている。この方法では、需要と供給も考慮し、需要が高く、移動時間の短いゾーンを優先的に割り当てることで、車両の割り当てを最適化し、待ち時間を短縮する。この研究は、単純で計算効率の高いアプローチを用いることで、ライドヘイリングシステムにおける待ち時間を分析するための実用的なソリューションを提供しようとするものである。

1.2 目的

この研究の主な目的は以下の通りである：

- 簡便な方法を開発する：ライドヘイリングシステムにおける待ち時間を計算するための、簡単に計算効率の良い方法を作成する。
- 数理モデル：ネットワークトポロジーに基づいて需要ノードでの待ち時間を計算する数学モデルを実装する。
- 確率的分析 システムの変動性を把握するためにランダムな値を使用して待ち時間の確率分析を実行する。
- パターンの特定 待ち時間分布のパターンを特定し、将来の配車システムの最適化に役立てる。
- 評価 ヒストグラムと統計分析を用いて、提案手法のパフォーマンスを評価する。

2. 簡易待ち時間算出法

2.1 簡易条件

本研究では、ライドヘイリングシステムを簡略化し、都市部を相互に接続されたノードとして表現する。各ノードは特定のエリアを表し、ノード間の接続は、各ノードへの移動時間と関連する移動経路を表す。ノードは供給ノードと需要ノードに分類される。それぞれ、車両が人を上回るか、人が車両を上回ると判断される。

2.2 待ち時間

計算値を適用することで、それぞれの移動時間に基づいて乗客の予想待ち時間を決定することができる。この計算は、最初に設定されたルートに従った車両の分布によって可能になる。需要ノードの待ち時間は次の式で計算される：

$$WT_M = \frac{(V_{NM} \cdot T_{NM}) + (V_{LM} \cdot T_{LM}) + (\dots)}{D_M} = \frac{\sum(V_{XM} \cdot T_{XM})}{D_M} \quad (1)$$

ここで

WT_M	需要ノード「M」の待ち時間
V_{NM}	ルート「N」から「M」までの配車時間
T_{NM}	ルート「N」から「M」までの移動時間
V_{LM}	経路「L」から経路「M」に分布する車両
T_{LM}	ルート「L」から「M」までの移動時間
D_M	ノード「M」の需要

その積は、各ルートの配車と移動時間の合計である。この計算は、その待ち時間に耐える人の数を表し、その後、ノードの需要で表される人の総数との関係を決する。

2.3 供給と需要

前述したように、各ノードにおける人と車の差は、それが供給か需要かを決定し、需給バランス問題を引き起こす。各ノードの需要と供給は次の式で計算される：

$$Supply_{Node} = Vehicles_{Node} - People_{Node} \quad (2)$$

$$Demand_{Node} = People_{Node} - Vehicles_{Node} \quad (3)$$

2.4 移動時間の計算

待ち時間の計算には、ノード間の移動時間が必要な要素の1つとして組み込まれている。その目的は、供給ノードから需要ノードへの余剰車両の移動を改善し、サービスの提供を保証することである。移動時間の必要性は、最短経路問題として知られる基本的なネットワーク問題を引き起こす。Floyd-Warshall アルゴリズムは、ネットワーク内のすべてのノードのペア間の最短移動時間を計算するために使用される。ノード間の最短移動時間を表す移動時間行列が生成される。

2.5 車両分布の計算

車両の分布は、提案する待ち時間計算手法の構成要素である。効率的な車両配分は、待ち時間を最小化し、サービス効率を最大化する方法で、供給が需要を満たすことを保証する。このセクションでは、主要概念、計算式、反復プロセスなど、配車計算の詳細について説明する。

2.5.1 路線配分比率

車両配分の主な目標は、余剰車両を供給ノードから需要ノードに割り当てることである。これを達

成するために、システムは、供給ノードと需要ノード間のすべての可能な経路を表す分配経路を確立する。各経路は供給ノードから需要ノードへの経路として定義され、経路の数は供給ノードと需要ノードの数の積によって決定される。各ルートには、そのルートに割り当てられる車両の割合を決定するルート配分比率が割り当てられる。

2.5.2 ノード分配比率

ルート配分比率が各ルートに割り当てられる車両の割合を決定するのに対して、ノード配分比率は各ノードに割り当てられる車両の割合を決定する。ノード配分比率は、特定のノードを含むすべてのルートのルート配分比率を合計することで計算される。ノード配分比率は、車両配分がネットワーク全体でバランスしていることを保証するために不可欠です。また、需要が高いか供給が限られているため、追加的な注意が必要なノードを特定するのにも役立ちます。

2.5.3 最適制限と反復

車両配分プロセスには、すべての供給ノードと需要ノードが適切にサービスされるようにするための反復アプローチが含まれる。目標は、各ノードにおける需要と供給の限界を尊重しながら車両を分配することである。このプロセスは、各ノードの最適制限を計算することから始まります。これは、そのノードの需給に基づいてそのノードに割り当てられる車両の最大数を表します。各ノードの最適制限値が計算されると、システムは最適制限値が最小のノードを特定する。このノードは最初に割り当て限界に達するため、ネットワークのボトルネックとみなされる。システムは次に、ルート配分比率に基づいてすべてのルートに車両を割り当て、次の反復に移る前にボトルネック・ノードが完全にサービスされるようにする。各反復の後、各ノードの需給値は、割り当てられた車両を反映して更新される。反復プロセスは、すべての需給ノードが完全に整備されるまで続けられる。各反復で、システムはルートとノードの配分比率を再計算し、車両の割り当てがネットワークの現在の状態に最適化されるようにする。

3. 待ち時間の確率分析

3.1 分析条件

待ち時間の確率論的分析は、さまざまなシナリオのもとでの待ち時間の変動性や挙動を探ることができるため、本研究の重要な要素である。確率モデルは、可能性のある結果を幅広くシミュレートするために、ランダム性を組み込んだものである。このアプローチは、需要、供給、所要時間などの要因が本質的に変動しやすく、予測不可能な場合に特に有効である。確率分析を行うことで、ライドヘイリングシステムのダイナミックな性質を捉え、ネットワーク内の異なるノード間の待ち時間の分布に関する洞察を得ることを本研究の目的としている。

確率論的分析は、シミュレーションの初期条件を定義することから始まる。この研究では、ネットワークは、相互に接続されたノードの集合として表現され、各ノードには特定の数の車両と乗客が存在する。各ノードにおける車両と乗客の数は、正規分布に従ってランダムに生成される。この分布が

選ばれたのは、実世界のシステムで観察される自然な変動性を反映しているからで、ほとんどの値は平均値の周りに集まり、極端な値は少ない。

各ノードの平均値は 50、標準偏差は 16 に設定され、生成された値の 99.7% が妥当な範囲 (2~98) に収まるようにする。このアプローチにより、乗客の少ない低需要期から、乗客が多く車両の利用可能性が限られた高需要期まで、幅広いシナリオをシミュレートすることができる。

3.2 パターンの反復

確率論的分析の信頼性を確保するため、シミュレーションは複数回繰り返される。この研究では、シミュレーションは 10,000 回実行され、各反復で各ノードの車両数と乗客数の新しいランダム値セットが生成される。このように多くの反復を行うことで、統計的に有意な結果が得られ、システムの挙動を包括的に理解することができる。

各反復の後、各需要ノードの待ち時間は、セクション 2 で説明した数学モデルを使用して計算される。これらの計算結果は保存され、各ノードでの待ち時間の分布を視覚的に表現するヒストグラムの生成に使用される。ヒストグラムに加えて、ストキャスティクス分析では、共分散表と相関表も生成され、異なるノードの待ち時間間の関係を知ることができる。共分散は 2 つの変数と一緒にどれだけ変化するかを測定し、相関は 2 つの変数間の関係の強さと方向を測定します。これらの表は、あるノードでの待ち時間の変化が、他のノードでの待ち時間にどのように影響するかを理解するために使用される。

3.3 反復分析

確率論的分析の結果、待ち時間の分布にいくつかの重要なパターンがあることがわかった。重要な発見のひとつは、待ち時間がネットワークのトポロジー、特にノード間の接続性と移動時間に大きく影響されることである。接続性が高く、移動時間が短いノードは、需要に応じて車両を迅速に配車できるため、待ち時間が短くなる傾向がある。対照的に、接続性が低く移動時間が長いノードは、車両が到着するまでに時間がかかるため、待ち時間が大幅に長くなる。確率論的分析から生成されたヒストグラムは、各ノードでの待ち時間が一様に分布しているのではなく、複数のピークを示すことを示している。これらのピークは、ノード間の移動時間の影響を受けた待ち時間の異なるクラスターに対応している。このクラスタリング効果は、待ち時間の決定における移動時間の重要性を浮き彫りにし、待ち時間を短縮するために移動経路を最適化する必要性を強調している。確率論的分析から得られたもう 1 つの重要な発見は、接続性が制限され、他のノードからのアクセスが困難な孤立ノードの存在である。このようなノードは、車両が到達するために長い距離を移動しなければならないため、十分に接続されたノードに比べて待ち時間が大幅に長くなる傾向がある。

確率論的分析から生成された共分散表と相関表は、異なるノードでの待ち時間の関係をさらに深く洞察している。この表は、異なるノードでの待ち時間は正の相関があることを示している。つまり、あるノードでの待ち時間の増加は、通常、他のノードでの待ち時間の増加を伴うということである。

しかし、この相関の強さは、ノード間の移動時間によって異なる。移動時間が似ているノードは、同じクラスターに属している可能性が高いため、相関が強くなる傾向があります。対照的に、移動時間が長い孤立したノードは、その限られた接続性と高い待ち時間を反映して、他のノードとの相関が弱くなる。

確率論的分析は、ライドヘイリングシステムを最適化する上で、いくつかの重要な実用的意味を持つ。重要な洞察の1つは、戦略的な車両割り当てによって、特に需要の高いノードでの待ち時間を大幅に短縮できることである。主要なノードにおける車両の供給量を増やすことで、車両は需要に合わせて迅速に配車され、待ち時間が短縮され、利用者の満足度が向上する。分析では、特にアクセスが限られている孤立したノードの場合、ネットワークの接続性を改善することの重要性も強調されている。ノード間のリンクを追加したり移動時間を短縮したりすることで、ライドヘイリング会社はシステムの効率を改善し、ネットワーク全体の待ち時間を短縮することができる。分析によると、待ち時間は需要と供給のバランスによって大きく変化し、需要の高い時間帯は待ち時間が長くなる。待ち時間の確率論的分析は、さまざまなシナリオ下でのライドヘイリングシステムの挙動について貴重な洞察を与えてくれる。シミュレーションにランダム性を取り入れることで、ライドヘイリングシステムのダイナミックで予測不可能な性質を捉え、待ち時間に影響を与える要因を包括的に理解することができる。分析の結果、待ち時間の短縮とシステム効率の向上におけるネットワークトポロジー、配車、需要管理の重要性が浮き彫りになった。これらの洞察は、ライドヘイリングシステムを最適化し、高いサービス品質を維持しながら利用者のニーズを満たすための戦略開発に役立つ。

4. 結論

本研究は、ライドヘイリングシステムにおける待ち時間を計算する簡便な方法を開発することに成功し、都市交通ネットワークの動的で予測不可能な性質がもたらす課題に対処した。利用者の満足度とサービス効率に大きく影響する待ち時間という重要な要素に着目することで、ライドヘイリングシステムを分析し最適化するための実用的で計算効率の高いフレームワークを提供した。ネットワークベースのアプローチに基づく提案手法は、正確さと単純さのバランスを提供し、迅速な意思決定や大規模な実装に利用しやすくなっている。

本研究の主な貢献は、ネットワークのトポロジー、需給ダイナミクス、移動時間に基づいて待ち時間を計算する数学的モデルの開発である。このモデルでは、都市部を相互に接続されたノードとして表現し、ノード間の最短移動時間を決定するためにフロイド・ウォーシャル・アルゴリズムを使用することで、ライドヘイリングシステム内の複雑な相互作用を単純化している。このアプローチにより、供給ノードから需要ノードへの効率的な車両の割り当てが可能になり、待ち時間を最小化し、全体的なサービスの質を向上させることができる。また、この研究では、異なるシナリオの下での待ち時間の変動性を捉える確率解析のフレームワークも導入している。供給と需要にランダムな値を設定して10,000回の反復シミュレーションを行うことで、ネットワーク全体の待ち時間の分布を包括的に理解

することができる。この分析結果は、ヒストグラムと共分散・相関表で示され、待ち時間行動の重要なパターンと傾向を明らかにし、車両配分の最適化と待ち時間の短縮のための貴重な洞察を提供する。もう一つの大きな貢献は、ネットワークの接続性、移動時間、需給の不均衡など、待ち時間に影響を与える主な要因を特定したことである。この研究により、待ち時間を最小化するためには、移動時間の短いルートを優先し、ネットワーク全体の需給バランスをとることの重要性が浮き彫りになった。さらに、主要なノードで車両の供給を増やすことで、特に需要の高いエリアで待ち時間を大幅に短縮できることも実証された。

確率論的分析は、ネットワークの設計やインフラの改善についても貴重な洞察を与えてくれる。この研究では、接続性が限られ、移動時間が長いノードでは、待ち時間が大幅に長くなることが示されており、ネットワークの接続性を改善する必要性が強調されている。都市計画者や政策立案者は、このような洞察を利用して、新たな経路の作成やノード間の移動時間の短縮など、リンクの追加やインフラの改善が必要なエリアを特定することができる。これらの改善により、ライドヘイリングシステムの全体的な効率を高め、ネットワーク全体の待ち時間を短縮することができる。

提案された方法は単純さと計算効率の点で大きな利点を提供するが、制限がないわけではない。主な限界の1つは、固定された移動時間や静的な需給値など、ライドヘイリングシステムに関する単純化された仮定に依存していることである。現実には、移動時間は交通渋滞、天候、道路閉鎖などの要因によって変化し、需給は一日を通して動的に変動する。将来的には、リアルタイムのデータと動的変数をモデルに組み込むことで、これらの限界に対処し、待ち時間をより正確かつ迅速に計算できるようになるだろう。

もう一つの限界は、待ち時間を最小化することを第一の目標とする単一目的最適化に焦点を当てていることである。実際には、ライドヘイリングシステムは、移動時間の最小化、運用コストの削減、利用者の満足度の最大化など、複数の目的のバランスを取る必要がある。今後の研究では、これらの競合する目的を同時に考慮し、ライドヘイリングシステムを最適化するためのより包括的なフレームワークを提供する、多目的最適化技術を探求することができるだろう。

さらに、この確率論的分析は単一のネットワーク構成に基づいているため、現実のライドヘイリングシステムの変動性を十分に把握できない可能性がある。将来的には、異なる都市配置やさまざまな接続レベルなど、複数のネットワーク構成を含むように分析を拡張することで、待ち時間の挙動をより強固に理解することができるだろう。このアプローチでは、公共交通機関の利用可能性や競合するライドヘイリングサービスの存在などの外的要因が、待ち時間やシステムのパフォーマンスに与える影響も調べることができる。

この研究結果は、都市のモビリティと交通システムの将来にとって、より広範な意味を持つ。都市が成長を続け、都市化が加速するにつれ、効率的で信頼性の高い交通ソリューションへの需要は高まる一方である。柔軟性と適応性を備えたライドヘイリングサービスは、この需要に応える上で重要な役割を果たす立場にある。しかし、これらのサービスが成功するかどうかは、迅速で信頼性の高い輸

送を提供できるかどうかにかかっており、ひいては待ち時間を最小限に抑えられるかどうかにかかっている。

提案する方法は、ライドヘイリングシステムを最適化するための実用的なソリューションを提供し、高いサービス品質を維持しながら利用者のニーズを満たすことを保証する。待ち時間を短縮し、システムの効率を改善することで、ライドヘイリングサービスは利用者の満足度を高め、継続的な利用を促し、都市交通システム全体の持続可能性に貢献することができる。さらに、この研究から得られた洞察は、ライドヘイリングサービスを公共交通機関や他の交通手段と組み合わせて、シームレスで効率的な都市モビリティネットワークを構築する、統合モビリティソリューションの開発に役立てることができる。

結論として、本研究はライドヘイリングシステムにおける待ち時間の理解と最適化に大きく貢献した。待ち時間を計算するための簡略化された手法を開発し、包括的な確率分析を行うことで、待ち時間に影響を与える要因に関する貴重な洞察を提供し、システムのパフォーマンスを改善するための実践的な戦略を提示した。提案された手法はライドヘイリングシステムに適用可能であるだけでなく、都市交通ネットワークに関する今後の研究の基礎となり、幅広い文脈における待ち時間の分析と最適化の枠組みを提供する。

都市交通システムが進化し続ける中、待ち時間を迅速かつ正確に分析する能力は、ライドヘイリングサービスの効率性と信頼性を確保するために不可欠である。本研究の成果は、この目標を達成するための重要な一歩であり、ライドヘイリングシステムを最適化し、都市モビリティ全体の質を向上させるための実用的で利用しやすいツールを提供するものである。

6. 参考文献

- Q&Me Vietnam (2021) Ride hailing vs traditional transportation: Demand difference in Vietnam, SlideShare. <https://es.slideshare.net/slideshow/ridehailing-vs-traditional-transportation-demand-difference-in-vietnam/248856252>.

- Tengilimoglu, O., & Wadud, Z. (2021). Evaluating the mileage and time efficiency of ride sourcing services: Austin, Texas case. <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.1892936>

- Bansal et al. (2019). Can Mobility-on-Demand services do better after discerning reliability preferences of riders? <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.07987>.

- Guo et al. (2020). The Value of Time: An Empirical Study on a Ride-Sharing Platform <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3702075>.

- Zhou et al. (2023). A Queueing Model of Dynamic Pricing and Dispatch Control for Ride-Hailing Systems Incorporating Travel Times. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.02265>.

- Geržinič, N (2023). An instance-based learning approach for evaluating the perception of ride-hailing waiting time variability. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2023.100616>.