HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Uncertainty-Aware Path Optimization and Multi-Scale Traffic Flow Modeling in Dynamic Transportation Networks
Author(s)	Wang, Yifan
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16850号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16850
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99695
Type	doctoral thesis
File Information	Wang_Yifan__review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　Wang Yifan

審査担当者　主　査　教　授　内田 賢悦
副　査　教　授　吉井 稔雄
副　査　准教授　古川 陽
副　査　准教授　峪 龍一

学位論文題名

Uncertainty-Aware Path Optimization and Multi-Scale Traffic Flow Modeling in Dynamic Transportation Networks
(動的交通ネットワークにおける不確実性考慮型経路最適化とマルチスケール交通流モデリング)

確率的な移動時間、行動の異質性、ならびに外部環境からの攪乱に起因する交通ネットワークの不確実性は、ネットワーク運用の信頼性確保および効率的な最適化を実現する上で、極めて重要な課題となっている。この課題に対応するため、本論文では、行動モデリング、確率的表現、信頼性指向の最適化を統合した包括的な 3 層フレームワークを構築した。本フレームワークは、個人レベルの意思決定メカニズムとシステムレベルの最適化ロジックを結び付け、不確実性を考慮した交通システムモデリングのための統一的な理論的・方法論的基盤を提供するものである。

行動レベルでは、トリップの中止を伴わない洪水攪乱下におけるドライバーの異質な反応を捉えるため、マルチクラス型リスク感応的経路選択モデルを開発した。本モデルは、不確実性に対する利用者の感応度を表すリスク回避係数を導入し、「知覚移動時間」、「知覚洪水リスク」、「経路選択慣性」の 3 要素から成る複合・確率的効用関数を構築した。前 2 者は客観的コストを表し、後者は主観的・心理的傾向を捉えるものである。さらに、Gumbel 分布および一様分布に従う二つの独立な確率項を導入し、認知的不確実性と行動の非対称性を表現することで、閉形式の経路選択確率を導出可能とした。また、動的に調整される「許容可能」および「非許容」経路集合を定義し、高リスクと認知される、あるいは心理的に忌避される経路を実行可能な選択集合から除外する。シミュレーション結果から、本モデルが利用者のリスク回避的意思決定パターンと、それがネットワーク交通流分布の空間的・時間的変化に及ぼす影響を効果的に再現できることが確認された。

確率的表現レベルでは、有限個の整数次モーメントから確率変数の分数次モーメントを推定するための新しい分数畳み込みモーメント変換 (Fractional-Folding Moment Transform:FFMT) 手法を提案した。分数次モーメントは、交通システムで一般的に観測される非ガウス型、ファットテール分布、あるいは長期記憶特性をもつ確率過程を柔軟かつ高感度に特徴付けることができる。FFMT 手法はラプラス変換と分数階微積分を組み合わせ、分数次モーメントの解析的および数値的表現を導出した。理論解析により、明示的な誤差評価、パラメータ選択基準、ならびに最適パラメータの存在性と一意性が示された。さらに、計算効率を高めるために短期記憶原理を導入した。数値実験により、FFMT 手法は従来のテイラー展開法やモンテカルロ法と比較して、より高い安定性と精度を有し、複雑かつファットテール分布に対しても収束性を維持することが確認された。本手法は、確率的移動時間を表現するための統一的かつ効率的な計算アプローチを提供し、行動層と最適化層

の間で一貫した情報伝達を可能にした。

最適化レベルでは、相関を有するネットワークにおける信頼性経路最適化を対象とし、平均–分散 (m-v) および平均–標準偏差 (m-s) の両定式化について検討した。相関下では非加法的かつ非線形となる m-v 信頼性経路探索問題を、フロー保存制約および拡張ハイパーグラフ変換の導入により線形計画法問題として再定式化した。制約行列が完全単模であることを証明し、整数最適解の存在を保証するとともに、高い計算効率が確保されることを示した。この知見のもとで、m-s 信頼性経路探索問題を凹最小化問題として定式化し、線形計画フレームワークに基づく大域的最適化アルゴリズムを開発することで、大域最適性が保証されることを示した。数値計算から、提案モデルおよびアルゴリズムが高い収束性、頑健性、ならびにスケーラビリティを有し、相関を伴う確率環境下での信頼性経路最適化に対して厳密かつ効率的な手法であることが示された。

これら 3 つの研究は、体系的に統合化され、首尾一貫した階層的連関メカニズムを形成している。行動モデルが確率的な行動入力を提供し、FFMT 手法がそれを測定可能な統計パラメータへと変換し、信頼性最適化モデルがそれらをシステムレベルの意思決定に適用する。提案する多層フレームワークは、行動層・確率層・最適化層の間における論理的一貫性と連続的な情報伝達を保証し、交通システムにおける不確実性の伝播および相互作用を統一的に表現することを可能にする。

これを要するに、著者は、リスク感応的行動モデリング、分数次モーメントに基づく確率的表現、ならびに信頼性経路最適化という 3 つの側面において、理論的・方法論的貢献を行ったものであり、交通計画、交通工学に貢献するところに大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。