

## 論文審査の結果の要旨

氏名：田 川

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：個別輸送システムにおける輻輳現象のモデル化と解析に関する研究

審査委員：（主査） 教授 塩 野 光 弘

（副査） 教授 泉 隆 特任教授 浜 松 芳 夫

茨城大学教授 坪 井 一 洋

交通システムは都市の発達に伴い多様化し、モビリティが要求されるようになれば交通需要も増大することになる。20 世紀は車社会とも呼ばれ、自動車の増大は交通環境問題を深刻化させている。これを解決に導く新交通システムが必要であり研究が開始されている。新交通システムは、新しい機能・特性を有した主に中量輸送を対象とした交通手段であり、AGT (Automated Guideway Transit) を指す場合が多い。AGT は無人運転を前提に開発され、専用軌道を走行するため定時性が確保された中量輸送システムとして着目されている。

本研究では、AGT の中でも少人数乗り、自動運転を基本とする個別輸送システム PRT (Personal Rapid Transit) を対象とした軌道ネットワークと自動運転制御方式を取り扱う。自動運転制御方式には点追従制御と車両追従制御があり、本論文では、各車両がある程度の自立性を持ち車両追従制御のすべての合流点での同期がとれないので、合流点の手前で同期をとる準同期制御を採用している。

軌道ネットワークにおいては、PRT の円滑な運行を妨げる合流部やインターチェンジにおける効率的な合流制御方式を検討することは重要な課題である。合流部に関する問題は、すでに数多くの研究が行われているが、走行する車両間の Gap に他の車両を合流させるものである。本研究では、軌道走行の路線容量が限定されている中で輸送能力を向上させることを目的として、1 台の車両が単独に走行するのではなく、場合によっては合流部にて車両を連結し列車編成の状態で行うことを検討している。

一般的に合流部は PRT システム全体の一部であり、軌道ネットワーク内に複数の合流部が存在し、高速路および低速路の重なり合った二重構造となっており、実際にはインターチェンジの構造となっている。このようにインターチェンジを含む軌道ネットワーク全体の輻輳解析を行うことは、システムを実現する立場からも重要な課題と位置づけている。インターチェンジに関する研究では、インターチェンジの形態から、高速路同士、低速路同士、および高速路と低速路とのインターチェンジの3種類が報告されている。これらのうち、本研究では高速路と低速路とのインターチェンジを取り扱う。このインターチェンジは一般的に立体交差であり、合流部においては高速路上の車両が低速路上の車両よりも優先される点が他の2種類のインターチェンジとは異なる。従来研究では、数理モデルの構築が困難などの理由から、低速路から高速路への合流のみを考慮したインターチェンジモデルであり、高速路から低速路への合流は考慮されていない。そこで、本研究ではこの点を考慮するところに特長があり、今まで困難とされた数理モデルを隠れマルコフ連鎖の手法を用いてモデル構築し輻輳解析を行っている点に新規性がある。

本論文は5章から構成されている。以下に各章で得られた主な成果を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景、これまでの研究と本研究の位置づけと目的、概要について述べている。

第2章「個別輸送システムのモデル」では、本論が扱うモデルとして、合流部とインターチェンジを取り上げ、それぞれについての概略図を示し説明している。合流部モデルでは、走行車両の運行制御方式として点追従制御を選び、車両の運行制御をつかさどる地上計算機が仮想的な移動セルを発生し、移動セルの前端をムービングターゲット MT (Moving Target) とし追従すべき指標を用いて輻輳解析する。本線と副線を有するインターチェンジモデルでは、計算機により仮想的な MT を発生させ、この MT に車両1台を割り付けて走行させ、各側線から本線及び副線に合流させる場合、本線と副線では車両の走行速度が異なるので、点追従制御方式に加え準同期制御方式における輻輳解析となる。

第3章「待ち台数制限を設けた連結走行する個別輸送システム合流部の解析」では、1台の車両が単独に走行するのではなく、合流部にて車両を連結するシステムとしている。そこで、合流制御戦略を用い、合流部に到来する車両に待ち台数に制限（制限台数）を設けている。合流部の数理モデルの構築には、マル

コフ連鎖の手法を用い、合流する2本のLine上にそれぞれZoneを設定し、各Zoneの状態を表す2種類の確率変数を使って状態推移を定式化している。解析には、定式化により求めたマルコフ連鎖の推移確率行列と平衡状態確率分布からなる連立方程式を解いて得られた各平衡状態確率を用いる。これらを利用して、平均待ち時間台数、および制限台数を求め、諸条件におけるシミュレーションによる解析を行う。シミュレーションはシステムの単位時間を $\Delta t$ とし、 $\Delta t$ ごとにMTを発生させ、一様乱数を用いて確率的にMTに車両を割り付けることにより行った。乱数の初期値を変え、50万 $\Delta t$ のシミュレーションを5回行った。その結果、シミュレーション値と理論値はよく一致しており、数理モデルの妥当性を確認した。この章ではシミュレーションによる合流部における輻輳解析を行い、次の結論を得た。

- (1) 車両が連結して走行する輸送システム合流部において、マルコフ連鎖の手法を用いて数理モデルを構築し、平衡状態確率分布および各Lineの平均待ち台数を解析的に求めた。
- (2) 各Lineの平均待ち台数の式と待ち行列システムとの対応関係、各Lineの待ち台数の値が互いに影響し合う相互関係が存在することなどを明らかにした。
- (3) 構築した数理モデルにより、平衡状態確率分布を解析的に求め、各Lineの平均待ち台数や平均通過遅れ時間などの車両挙動に関する諸量を求めた。
- (4) シミュレーションによる数値計算例と解析解を比較することで、構築した数理モデルの妥当性を確認した。各Lineの車両到来確率が等しいとき、1台で出力される車両の割合が最小になり、制限台数と1台で出力される車両の割合との関係を定量的に示した。

第4章「待ち時間制限を設けた個別輸送システムのインターチェンジの解析」では、高速路上の車両が低速路上の車両よりも優先させる数理モデルを構築し、システム評価の指標となる平均待ち台数や平均通過遅れ時間などの諸量を解析的に求め、制限待ち回数の効果を検討している。本章で扱う準同期制御方式では、副線から本線に合流する場合、本線上の合流点に到達する車両がいれば副線上の車両は減速し、本線上の新たなMTを割り付けることで、合流点に到達する時刻は変化しないとしている。一般にPRTでは、客の乗降を行う駅以外で車両が完全に停止することは想定されていないが、待ち行列の先頭車両は迂回することができないため待ち時間が長くなるほどほぼ停止してしまう可能性がある。そこで、迂回の自由度を持たせ、待ち時間のある程度抑えるために制限待ち回数を設定し、これを超える場合、直進希望車は分岐させ、分岐希望車は直進させて迂回できるものとする。インターチェンジの数理モデルは隠れマルコフ連鎖の手法を用いて構築する。本モデルでは、まず、インターチェンジの側線への分岐点にチェックポイントCP (Check Point) を設け、CPに車両が到達してから合流可と判定されるまでの時間を合流待ち時間と称し、期待値の定義式から平均合流待ち時間を求める。次に、本モデルの状態推移は、合流待ち時間内に待ち行列に到来する車両台数とCPを離れる車両台数によって記述でき、その推移確率を用いて隠れマルコフ連鎖モデルの推移確率行列を表す。さらに、隠れマルコフ連鎖が平衡状態にあるとき、平均待ち台数、平均通過遅れ時間および平均待ち時間の具体的な数値を求める。平均待ち台数を減少させるために待ち回数に制限を設けると迂回が発生するので、迂回率を定義し、副線に到来する直進希望車および分岐希望車の迂回率をそれぞれ求め、解析するためのパラメータとする。シミュレーションは3章と同様な手法で行った。その結果、シミュレーション値と理論値はよく一致しており、数理モデルの妥当性を確認した。この章ではシミュレーションによるインターチェンジにおける輻輳解析を行い、次の結論を得た。

- (1) 個別輸送システムのインターチェンジにおいて、本線から副線に合流する車両も考慮した数理モデルを隠れマルコフ連鎖の手法を用いて構築した。
- (2) 平均待ち台数や平均待ち時間などのシステム評価の諸量を解析的に求めることを明らかにした。
- (3) シミュレーション結果と比較することにより数理モデルの妥当性を確認し、PRTシステムの設計や制御方式の検討に際して有用な資料を提供することができた。
- (4) 少しの迂回により平均待ち台数を大幅に減少させられることを定量的に明らかにし、具体的に制限待ち回数の値を検討するための手がかりを示した。

第5章「結論」では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べている。

以上、本論文の成果を通観すると、PRTシステムのボトルネックとなる合流部やインターチェンジにおいて、それぞれの数理モデルを構築し輻輳現象を解析した成果は、PRTの輸送能力を向上させることに対して新しい道を切り開いたことを意味する。さらに、PRT以外の生産システムにおいて、工場や倉庫の無人化に有用なAGVS (Automated Guided Vehicle System) への応用も期待される。

このことは、論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示している。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成29年2月16日