

# スマート交差点におけるカオス境界: 人間ドライバーと自動運転車の混合交通流に伴うリスク動態分析

台湾海洋大学(台湾) ○黄 昱凱 日本大学 生産工学部 豊谷 純  
シンガポール社会科学大学 謝 承憲  
(元)国立交通大学 徐 淵靜 中国科技大学(台湾) 阿部 忠

## 1. まえがき

交差点は、その複雑な空間構造、高い人車流密度、そして多様な利用者が同時に通行する必要性から、長年にわたり都市の交通事故が最も頻繁に発生するハイリスクエリアと見なされてきました。

自動運転技術 (Autonomous vehicles, AVs) の段階的な実現に伴い、将来の交差点は「人機混在交通」の時代へと移行しています。AVs は、その知覚能力と AI 技術を核とした反応能力によって交通安全を向上させることが期待されていますが、実際の運用においては、AVs と人間が運転する車両 (Human-driven Vehicle, HV) との相互作用が、かえって新たな、より潜在的なリスク源を生み出す可能性があります。このような状況下の交差点は、もはや交通信号や規則に支配された物理的な空間であるだけでなく、複雑な社会-技術的な相互作用システムなのです。

人間が運転する場合の意思決定は、経験、感情、直感、不確実性に満ちています。一方、AVs は内部アルゴリズムに厳密に従って、知覚、予測、計画を実行します。この両者が交差点で交錯する際、互いに対する推測、信頼の齟齬、リアルタイムでの駆け引き、戦略的な誤判断などが生じ、高度に非線形な動的システムを形成します。

この相互作用の複雑さにより、従来の統計や線形仮定に基づいた交通モデルでは、もはや対応しきれいていません。これらのモデルでは、なぜ微少な擾乱や誤判断が破滅的なバタフライ効果を引き起こすのか、また、なぜ人機協調システムが円滑な状態から、突然、意思決定の不安定化や全体効率の崩壊といったカオス的な状態へ転じるのかを説明できま

せん。

したがって、この新時代の交通リスクを深く理解し、効果的に制御するためには、非線形動力学とカオス理論を統合した新しい分析フレームワークが緊急に必要とされています。本研究は、自動運転車 (AV) と人間ドライバーが混在する交通流における非線形な相互作用行動に焦点を当て、特定の状況下で交通システム全体がカオス状態に陥る可能性があるかを分析します。これにより、衝突や事故のリスクが増大するかどうかを検証し、予測可能かつ制御可能なスマートな交通管理メカニズムを提案することを目的とします。本研究は、AI を応用した交通リスク分析フレームワークを創出することを期待しています。また、交通安全分析の次元を従来の「事後的な統計」から「事前の予測と動的な予防」へと向上させ、人間と機械が共存する時代の複雑なリスクを理解するための新しい科学的視点を提供します。

## 2. 研究システムの概要

本研究の対象とするのは、都市のスマート交差点における人 (歩行者・自転車)、一般車両 (マニュアル運転車)、そして自動運転車 (自律走行車) が混在する交通流システムです。このシステムは、単なる静的な交差点設備や、個々の車両の挙動を指すものではありません。むしろ、多層的な動的相互作用を含む複合的な構造システムとして捉える必要があります。その構成要素と内包する動態は、以下の4つの側面から説明できます。

(1). 異質な交通参加者: システムには、人間の運転する車両 (マニュアル車)、異なる自動運転レベルの車両 (Level 2からLevel 4)、歩行者、自転車など、多様で異質な参加者が含まれます。動態の特性: 参加者の種類ごとに、反応時間、行動ロジック、リスク認知の仕方が

Chaos Boundaries in Smart Intersections: Dynamic Risk Analysis of Mixed Traffic Flow Involving Human and Autonomous Drivers  
Yu-Kai HUANG, Cheng-Hsien HSIEN, Jun TOYOTANI, Tadashi ABE and Yuan-Ching HSU

異なります。これらの相互作用は動的で不確実性が高く、非線形な反応や突発的な事象が発生しやすい状態にあります。

(2). スマート交差点インフラ:交差点には、AI意思決定モジュールを搭載した信号制御システム(例:交通流に応じて信号時間を自動調整するもの)や、センサー、エッジコンピューティング機器、そしてV2X通信技術が導入されています。動態の特性:これらの要素が、複数の情報源(マルチソース情報)をリアルタイムで受信・処理できる「スマートセンシング・意思決定レイヤー」を構成し、システム全体の適応的な制御を支えています。

(3). 人機相互作用制御ループ:人間の運転と自動運転システムが共存する環境では、制御権(運転操作権)が瞬時に切り替わる可能性があります。動態の特性:自動運転車が状況の境界線(例:認識できない歩行者の動作)に遭遇した際、制御権を人間へ移行する「制御権のテイクオーバー(変換)」が発生します。この過程には、反応時間遅延、システムへの信頼の移行、責任の所在など、心理的および制度的なリスクが伴います。

(4). 交通流の動態とシステム境界:この混合交通システムは、開放系で多重に結合した動的システムです。外部要因(例:天候)と内部メカニズム(例:アルゴリズムの挙動)の双方から影響を受けます。動態の特性:システムは、安定状態、振動、突然変異、そしてカオスなど、多様な挙動を示す可能性があり、複雑適応系の典型例とみなされます。

この混合交通システムの最大の特徴は、制御権の多中心性とリスク発生源の非単一性にあります。従来の交通リスクは、運転手の過失や信号設計の問題に起因していましたが、本システムではリスクが人機間の認知の相違、アルゴリズムの誤判断、システム遅延、またはマルチエージェントの行動連鎖によって引き起こされる可能性があります。

すなわち、リスクは単なる運転ミスや機器故障からではなく、多元的な参加者間の動的結合関係と非線形な相互作用から生じます。これらのリスクは以下の三大特性を持ちます。

#### (1). 非予測性

具体例:人間と自律システムの責任分担の曖昧さ、テイクオーバー時の反応遅延、またはAIの判断ミスが発生すると、突然の意思決定エラーが引き起こされ、それまで安定していた交通流が一気に混乱状態へ変異する可能性があります。

#### (2). 累積性

具体例:通信遅延やセンサーの異常といった微小なエラーは、短期的には影響がないように見えても、システム内で一定の閾値まで蓄積されると、ある時点で全体的なシステム障害を突然引き起こす可能性があります。

#### (3). 位相転移

具体例:交通流密度、テイクオーバー時間差、自動運転車の比率といった特定のパラメーターが変動すると、システムは安定状態から振動やカオス状態へと突然ジャンプします。これは不可逆的なリスク拡散現象を生じさせます。

この種の現象は、システム全体的な崩壊や臨界的な転換点の核心であり、カオスシステムでよく観察されます。本研究は、リアプノフ指数、分岐図、ポアンカレ断面図などのカオス分析手法を用いて、これらの交通システムにおける潜在的なカオスの境界を特定し、早期警戒とリスク制御のための科学的根拠を提示することを目指しています。

### 3. カオス理論の概要と核となる概念

カオス理論は、一見ランダム(無作為)に見えるが、実際には決定論的な(deterministic; 規則に支配された)法則によって統御されているシステムの振る舞いを記述する理論です。その核心は「秩序の中に潜む無秩序(深蔵於秩序中の混乱)」と言えます。この理論で最も広く知られている特徴が「バタフライ効果(蝴蝶効果)」です。これは、非線形な力学系において、初期条件のごくわずかな変動が指数関数的に増幅され、結果として長期的な結果に巨大な差異をもたらす、予測不可能性を生じさせる現象を指します。

しかし、カオス的なシステムの軌道が永久に繰り返さず、予測が困難であるにもかかわらず、その振る舞いは無限に発散することはありません。代わりに、その動きは「ストレンジ・アトラクター(奇異吸引子)」と呼ばれる複雑なフラクタル構造の内部に限定されます。システムの状態は、このアトラクターの範囲内で永遠に、しかし非周期的に動き続けます。

このような複雑な振る舞いを研究し、定量化するために、従来、カオスシステムを解析する際によく用いられる分析ツールとして、「ポアンカレ断面図」「分岐図」「リアプノフ指数」の3つがあります。

#### 1. ポアンカレ断面図

「ポアンカレ断面図」は、システムの動的な振る舞いを可視化する手法です。高次元の相空間(状態空間)を横切る低次元の断面(超

曲面)を設定し、システムの軌道がその断面を通過する点のみをプロットします。連続的なシステムのダイナミクスを離散的な点列として捉えることで、解析を容易にします。プロットされた点のパターンを観察することで、その力学的な特性を判断できます。点が安定な固定点に収束するか、単純な閉曲線を描くか、あるいはストレンジ・アトラクターのような複雑なフラクタル構造を描くかによって、システムの挙動が安定か周期的かカオス的かを判別します。

## 2. 分岐図

「分岐図」は、ある制御パラメーターが変化するにつれて、システムが安定した状態から、一連の分岐を経て、最終的にカオス状態へと移行する完全な道筋を明確に示します。パラメーターの値に対するシステムの漸近的な振る舞い(アトラクター)をプロットします。この図により、システムが周期的な動きから倍周期分岐などを経て、カオス領域へ突入する「カオス遷移のプロセス」を一目で把握できます。

## 3. リアプノフ指数

カオスを判定するための最も重要な数学的指標として、「リアプノフ指数(最大リアプノフ指数)」が用いられます。これはバタフライ効果の強度を正確に定量化するためのものです。

カオスの定義: この指数が正の値である場合、初期条件の微小な差が指数関数的に急速に離れていくことを意味します。これこそがカオスの振る舞いの最も明確な数学的証拠とされています。指数が負であれば、軌道は収束し安定した挙動を示し、ゼロであれば、単純な周期軌道や準周期軌道など、中立的な安定性を示します。

## 4. 分析結果および検討

本研究では、AI輸送システムのリスクを記述する二つの主要な変数を例にとり、それらの間に現れる典型的な非単調(Non-monotonic)な結合関係を考察します。この関係は、経済学における後彎労働供給曲線の特性と極めて類似しています(図1参照)。ここでいう曲線  $R=f(P)$  は、AI能力・AI主導性(P軸)が人機協調におけるハンドオフ累積リスク(R軸)に与える複雑な影響を明らかにします。

人間がAIの能力に懐疑的であり、AIの能力が未だ完全ではないにもかかわらずAIに主導性を与え続けると、システムはリスク増大段階

にあります。この段階でシステムがAIにより高い主導権と意思決定権を与え続けると、人とAIの間に監視のミスマッチや協調の摩擦が生じます。例えば、人間の警戒心は高いものの、AIの判断を完全に信頼することが難しく、重複したチェックや不必要な介入を引き起こします。また、AIの主導性と人間の懸念が緊張状態を生み、不確実な意思決定の度に信頼の危機や潜在的なヒヤリハットが蓄積する可能性があります。この時、人間はAIの能力と信頼性に疑念を抱き、AI主導性が増すにつれて(P1→P2)、人機協調の信頼リスクは増大します(R1→R2)。

しかし、AI能力・AI主導性が臨界点(P2)を超えると、AIが一定レベルに達し、人間が信頼できるようになったことを示します。この段階では、AIはより自律的かつ高効率で動作することができ、人間の認知負荷は実質的に軽減され、誤った介入や監視のミスマッチの可能性が大幅に低下します。この時、システムがAIにさらに主導性を与え続ける(P2→P3)ことで、かえって人機協調の信頼リスクは低減します(R2→R3)。

図1の静的関係を単一変数反復(イテレーション)に類推することは合理的です。なぜなら、図1における「AI能力 P が人機リスク R に与える影響の方向が反転する」という重要な非単調性が、AIシステムの進化に内生的な自己制約メカニズムが存在することを証明しているからです。私たちは、リスク R を外的な変数として抽象化し、この「成長と制約」のメカニズムを  $P$  変数自身の反復的な動力として内在化させます。そして、この内在的な複雑性の動的進化を、 $P_{n+1} = r \cdot P_n (1 - P_n^\beta)$  という最も簡潔な単峰非線形関数を用いて表現するのです。

この非単調な関係は、AI輸送システムにおける重要な非線形臨界点(Critical Threshold)の存在を浮き彫りにします。臨界点 P2までの領域では、AI主導性の増加はリスクを増幅させますが、AI能力が人間の能力を超えた時点では、AI主導性の増加はリスクを最適化(抑制)させます。この分析は、AIが高自動化システムにおいて主導権を与えられるべき安全境界を正確に定める上で、重要な意義を持ちます。

図2では、AI能力 P の増加に伴い、人機リスク R への影響の方向が反転する(リスクが一度増加してから減少に転じる)という現象が示されています。図2は( $\beta=1.5$ )、ロジスティック写像(Logistic Map)に基づいた、これら二つ

の変数に対する写像によって得られたカオス的振舞いの特徴分析であり、分岐図とリアプノフ指数を含みます。

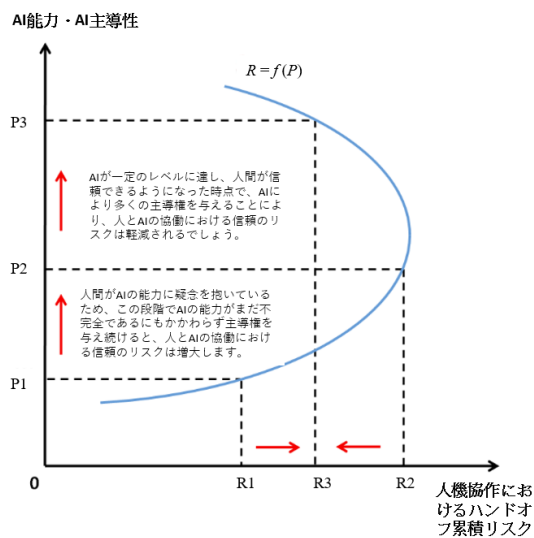


Fig.1 人とAIの協調におけるリスクと、AIの能力および主体性（主導性）の関係分析

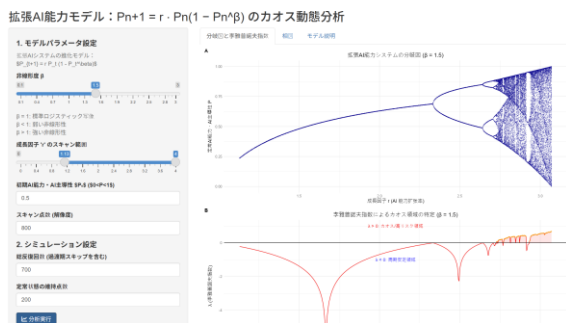


Fig.2 モデルの カオス的 特徴

## 5. まとめ

自動運転技術と人工知能（AI）システムの目覚ましい発展に伴い、現代の交通輸送システムは「人機共存」という新たな段階へと移行しつつあります。高度道路交通システム（Intelligent Transportation Systems, ITS）は、すでにAIを交通状況の予測、事故予防、交通流制御など多岐にわたる分野に応用し、システムの効率と安全性の向上に貢献してきました。しかし、このような技術の導入は同時に、これまで過小評価されてきた課題をもたらししています。それは、人間の運転者とAIシステムが同一の空間で協調（コラボレーション）せざるを得ない状況下で、両者の相互作用が非線形で予測不可能なリスク動態を生み出す可能性があるという点です。

本研究の目的は、将来の「人機混合交通」時代における交差点で潜在するシステム的リスクを究明することにあります。非線形動力学やカオス理論を応用することで、人機間の相互作用の不安定化によって引き起こされる可能性のある、新しい形態のシステム的な「カオスの崩壊」を予測し、抑制することを試みます。これは単なる交通事故の予防に留まらず、未来のスマートシティに対する一種の「システムの災害予防」を意味します。

本研究の成果は、以下の点において交通管理機関や関連産業に貢献します。

- (1). 複雑性の解明: 交通管理当局が、人機相互作用の複雑性を明確に理解するのに役立ちます。
- (2). 設計への提言: 研究結果は、自動運転システムの倫理規定、アルゴリズム設計などの重要な課題に対して、具体的な参考情報を提供します。
- (3). 法規整備への寄与: 将来的な交通安全法規の設計を支援するための科学的根拠と実務的な提言を提供し、事故リスクの低減と公共交通全体の信頼性向上に貢献します。

## 参考文献

- 1) Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI). IEEE access, 6, 52138-52160.
- 2) Hwarng, H. B., & Xie, N. (2008). Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective. European Journal of Operational Research, 184(3), 1163-1178.
- 3) Kinsner, W. (2006). Characterizing chaos through Lyapunov metrics. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 36(2), 141-151.
- 4) Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International journal of man-machine studies, 24(1), 65-75.
- 5) Papageorgiou, E. I. (2011). Learning algorithms for fuzzy cognitive maps—a review study. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 42(2), 150-163.