

車群安定性に着目した交通流モデルの提案

首都大学東京大学院 知能機械システム学域 M2 曾根 雄太 (児島研究室)

1. はじめに

交通渋滞問題を解決するために交通流シミュレーションは有効であり、交通施策の事前検証や渋滞発生メカニズムの解明が期待される。本研究では、MLDシステムを用いて車線変更と追い越しの挙動を表現する。

MLD (Mixed Logical Dynamical System) システム

離散事象と連続事象を同時に扱えるため、モード遷移が可能。車両の動特性や車線変更のモードを記述するため導入。

研究目的

- 車線変更を考慮した2車線交通流シミュレータの構築
- 構築したモデルをもとに、車線変更が渋滞発生の要因の1つとなる可能性の検証

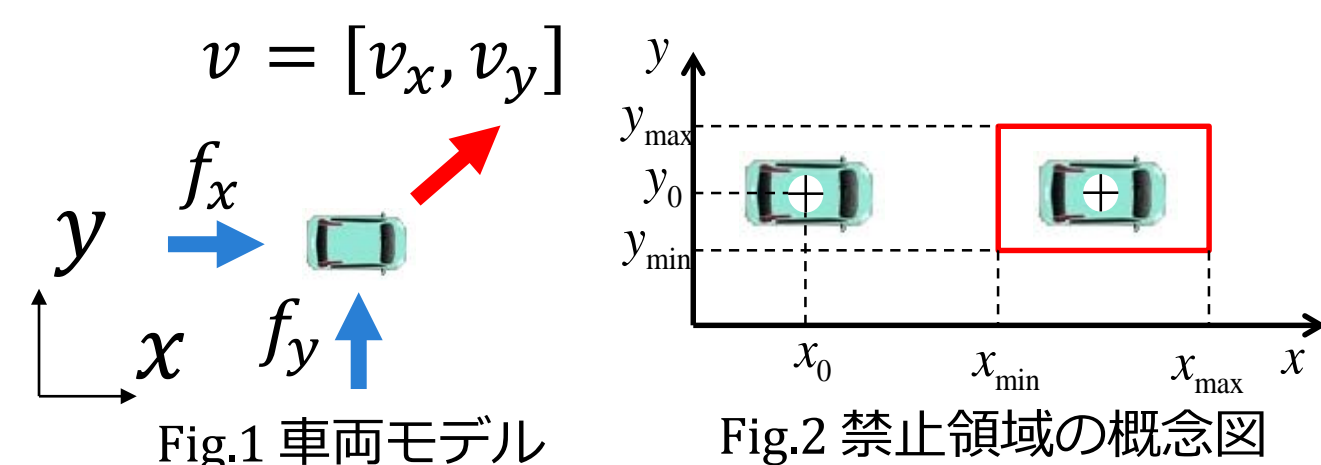
2. 車両の基本モデル

車両の運動を、質点 m [kg]の運動と捉え、自車以外の車両を障害物とした回避行動をMLDシステムを用いて表現する。速度制約、入力制約、障害物回避制約などを考慮し、モデル予測制御を用いて自車が目標点へ向かう最適な挙動を記述する。[1]

状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{s} &= As + Bu \\ s &= [x, y, v_x, v_y]^T \\ u &= [f_x, f_y]^T \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix}$$



障害物回避条件

$$\begin{aligned} x(t+k|t) &\leq x_{min} + M\delta_1(t+k|t) \\ x(t+k|t) &\leq -x_{max} + M\delta_2(t+k|t) \\ x(t+k|t) &\leq y_{min} + M\delta_3(t+k|t) \\ x(t+k|t) &\leq -y_{max} + M\delta_4(t+k|t) \\ \sum_{i=1}^4 \delta_i(t+k|t) &\leq 3 \end{aligned}$$

評価関数

$$J = \sum_{l=0}^{N-1} \{ (s(t+l|t) - s_f)^T Q (s(t+l|t) - s_f) + u(t+l|t)^T R u(t+l|t) \}$$

s_f : 目標点

モデル予測制御

$$\min_u J, U = \{u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N-1|t)\} \quad \text{subj. to} \begin{cases} \text{状態方程式} \\ \text{速度・加速度制約} \\ \text{障害物回避条件} \end{cases}$$

車線変更モデル

車線変更には追越車線への変更と走行車線への回復の2通りがあり、それぞれの条件を満たした時、目標値を切り替えることで車線変更を再現する。

追越車線(Lane2)への変更

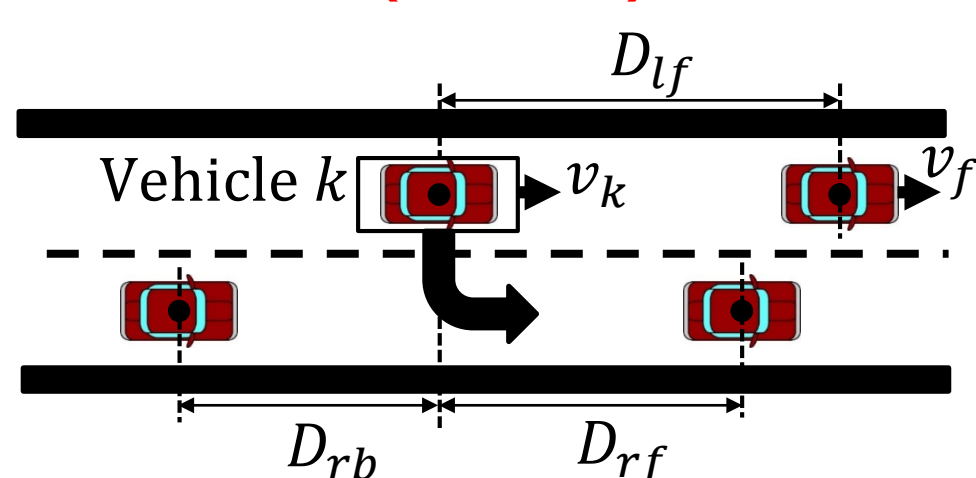


Fig.3 車線変更概略図 1

走行車線(Lane1)への回復

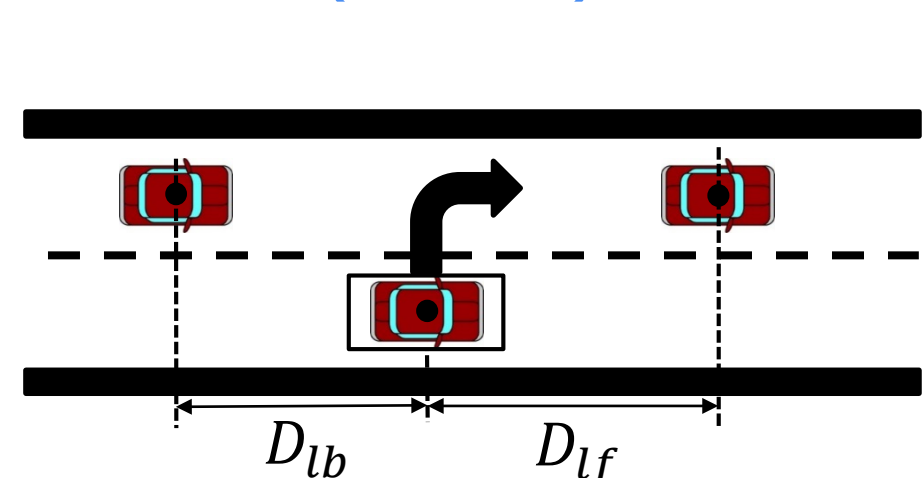


Fig.4 車線変更概略図 2

$$\begin{aligned} D_{rf} - v_k \cdot h &\geq G \quad \text{and} \\ D_{rb} &\geq G_{rb} \quad \text{and} \quad v_k - v_f \geq 1.0 \end{aligned}$$

$$D_{lb} \geq G_{lb} \quad \text{and} \quad D_{lf} \leq G$$

3. シミュレーション

走行車線(Lane 1)では40 [m], 追越車線(Lane 2)では90 [m]の車間で走行させ、終端にボトルネック区間を設置し、シミュレーションを行う。基本図と車両軌跡図の結果から車線変更が交通流へ及ぼす影響を調べる。

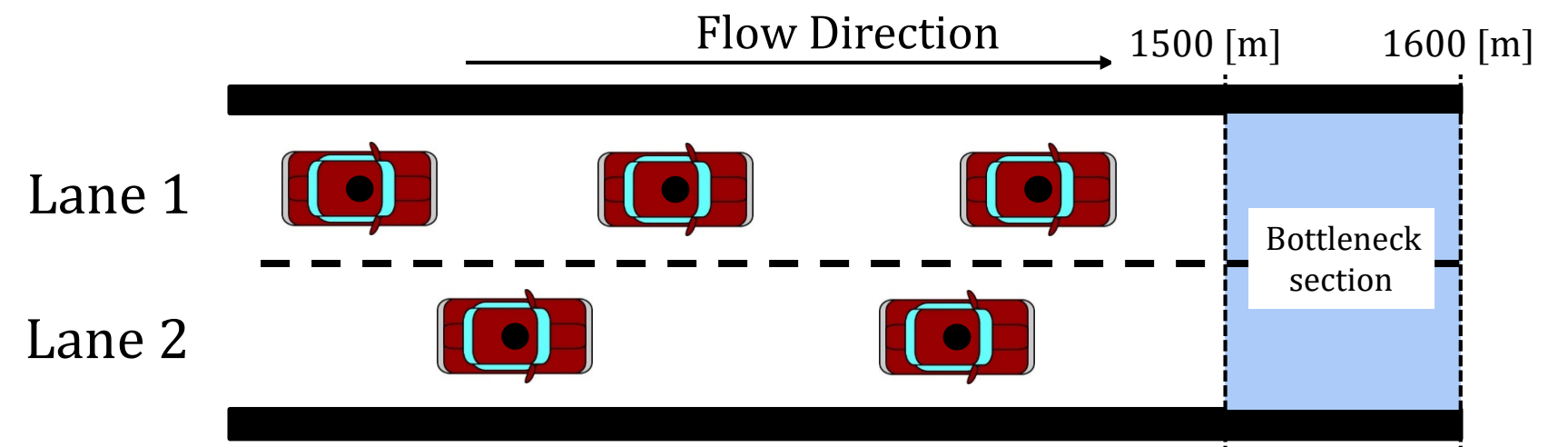


Fig.5 シミュレーションレイアウト

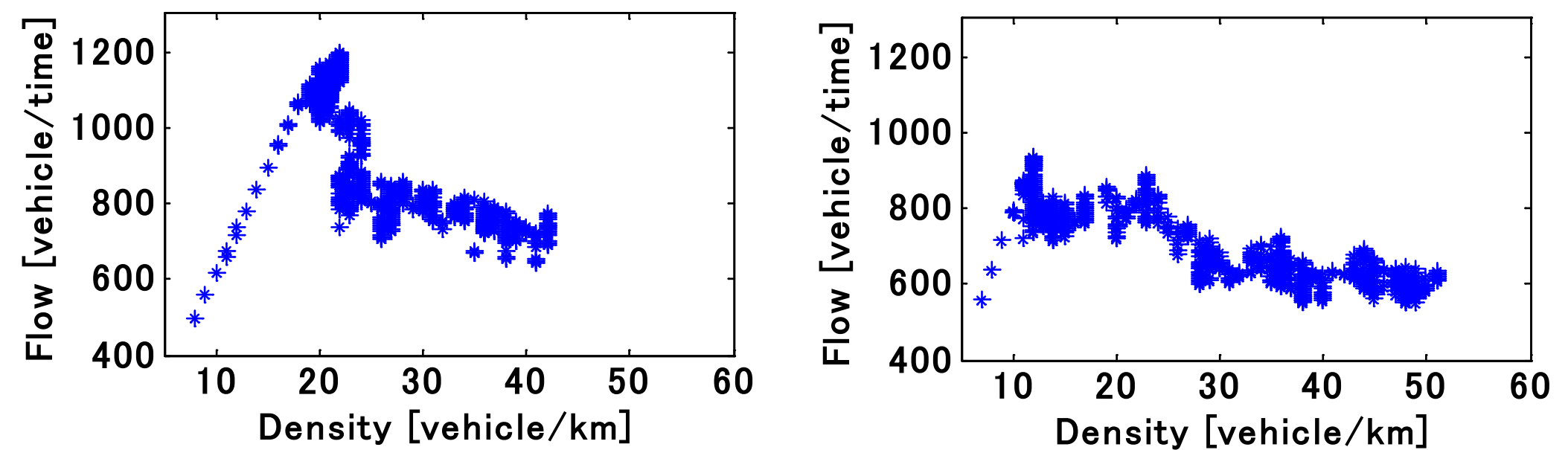


Fig.6 基本図(左: Lane 1, 右: Lane 2)

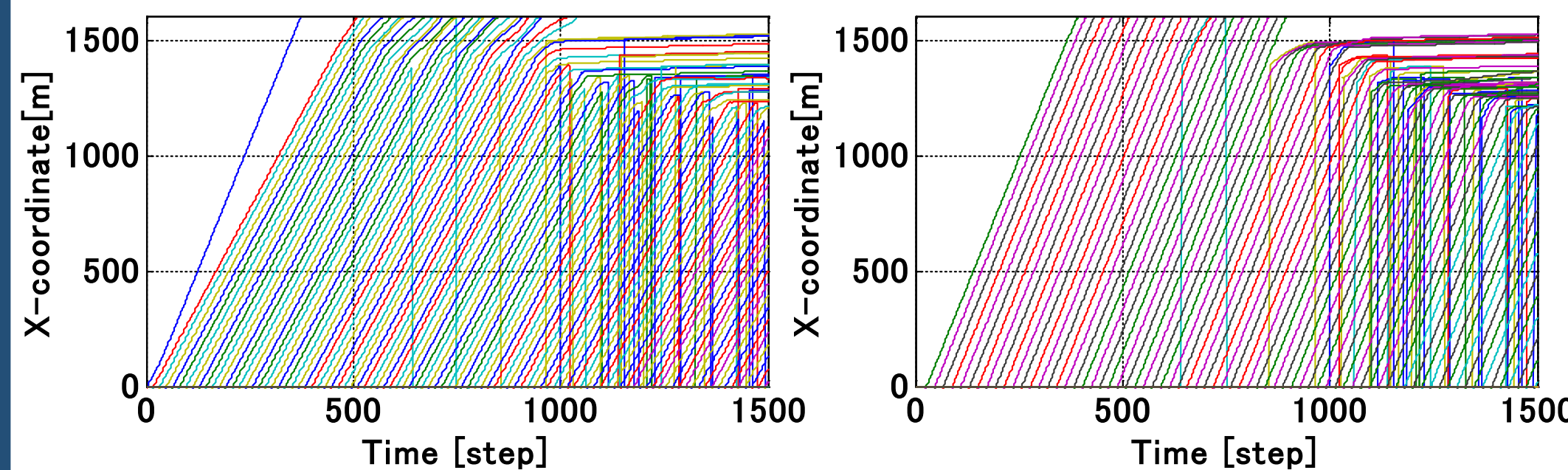


Fig.7 車両軌跡図(左: Lane 1, 右: Lane 2)

- 走行車線より先に追い越し車線で渋滞発生することを確認
→ 走行車線から追い越し車線に変更してきた先行車の影響を受けて、ブレーキを踏む回数が増加した。
- 両車線での渋滞現象の確認
→ 追い越し車線での渋滞を確認した車両が走行車線へ移動し、走行車線の交通量が増加した。

4. まとめと今後の展望

- 車線変更モデルを導入した交通流シミュレータの構築を行った。
- 車線変更が渋滞発生要因の1つとなることを確認した。
- ACC(Adaptive Cruise Control)車の普及に伴う、渋滞抑制効果の検証を行う。
- ACC車と通常車の混在したシステムの車群安定性を検討する。

車群安定性

$$\frac{v_0(s)}{v_{n-1}(s)} = G_0(s) \cdot G_1(s) \cdot \dots \cdot G_{n-2}(s)$$

車間距離制御特性が先行車の車速変化を後続車に増幅して伝搬しない、すなわち車群安定となることが重要と考えられている。[2]

参考文献

- [1] 横江, 児島: ハイブリッドシステム表現に基づく交通流モデルの構築, 首都大学東京, 修士論文 (2013)
[2] 山村, 瀬戸, 永井: 車間通信を利用した車群安定ACCの研究, 日本機械学会論文集(C編), vol.73, No.726(2007)

車群安定性に着目した交通流モデルの提案

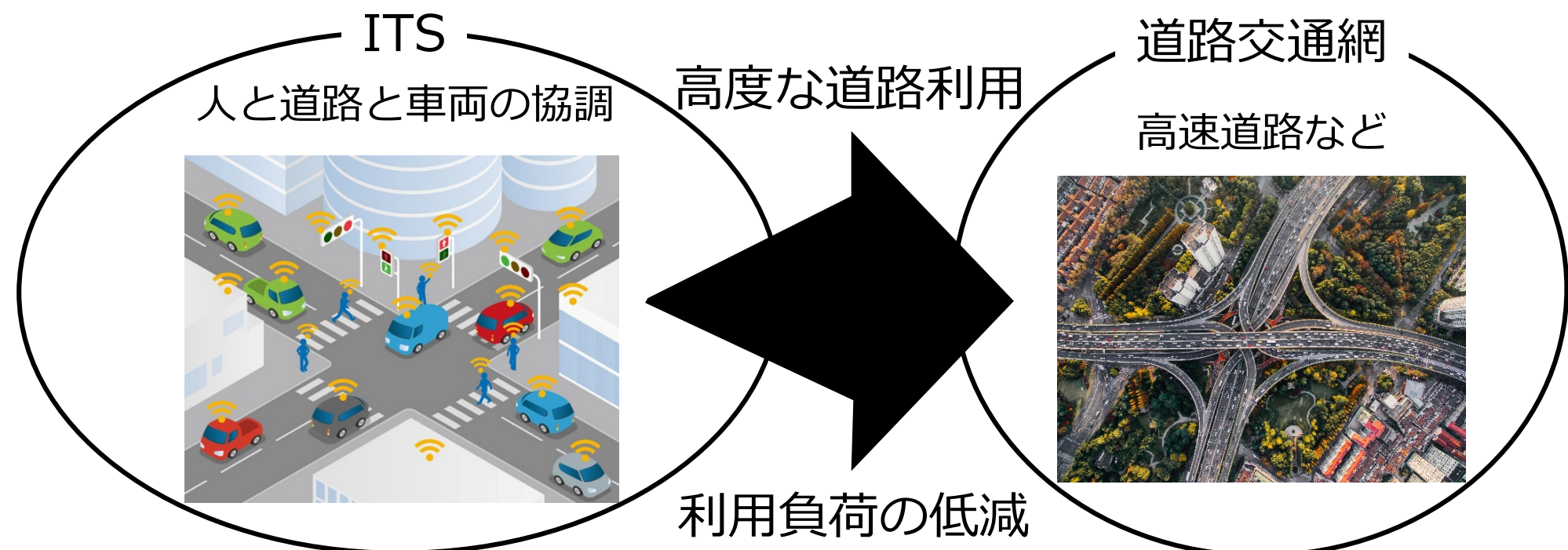
首都大学東京大学院 知能機械システム学域 M2 曾根 雄太 (児島研究室)

1.はじめに

近年、渋滞対策の1つとしてITS(Intelligent Transport Systems)の研究が大きな注目を集めており、中でもACC(Adaptive Cruise Control)車両を用いた車群走行が期待されている。

車群走行のメリット

- 道路容量の効率化 ● 燃費の向上 ● ヒューマンエラーの排除



ITS技術などを**実験により評価**することは困難

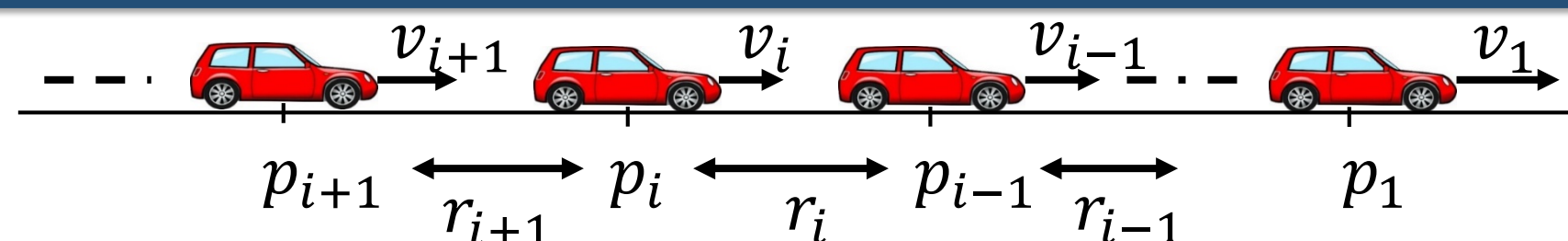
モデルに基づいて予測し、交通システムを設計することが重要
システム制御の分野では… MLD (Mixed Logical Dynamical) システム表現による交通流シミュレーション

MLD (Mixed Logical Dynamical) システム

⇒ 離散事象と連事象を同時に扱えるため、モード遷移が可能。車両の動特性や車線変更のモードを記述するため導入。

ACCやCACC (Cooperative ACC) 車両といった**新技術を導入した車両をモデル化し、様々な条件を同時に扱ったシミュレーション**が期待されている。

2. 車群安定性 (String Stability) [1]



ACC車両を用いて車群走行を行う場合に求められる性能

- 前走車との車間距離を維持
- 車群として安全に走行できる (車群安定性)

$$\frac{V_i(s)}{V_{i-1}(s)} = G_V(s) \rightarrow |G_V(j\omega)|$$

>1: 満たしていない場合 ≤1, ∀ω: 満たしている場合

車間距離変動が後続車に増幅伝搬し、**渋滞**に繋がる。

車間距離変動が**減衰伝搬**し、一定の距離が保たれる。

ACC車両を設計する場合、相対距離と相対位置の関係から運転計画を考えることが重要である[1]。この際、相対位置係数と相対速度係数の値を適切に定めることで、車群安定性は保証される。

ACC車両の入力

$$u_i = k(p_{i-1} - p_i - hv_i) + c(v_{i-1} - v_i) + \tilde{u}$$

k: 相対位置係数, c: 相対速度係数, h: 車間時間

評価関数[2]

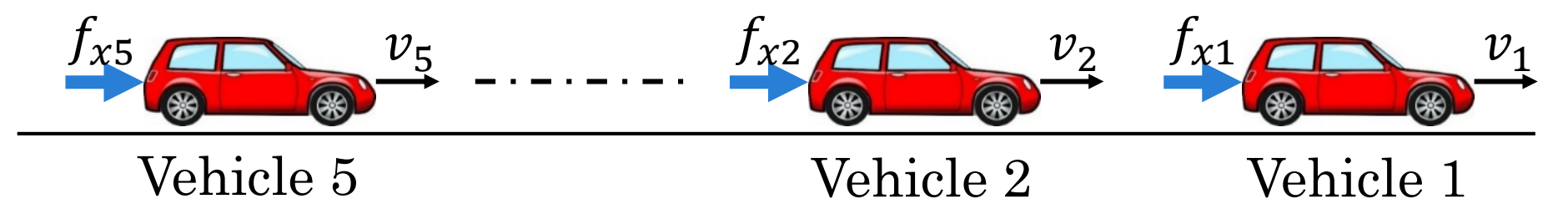
$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{u}(t+k|t)^T q \tilde{u}(t+k|t) \quad \tilde{u}: \text{入力の調整量}$$

モデル予測制御

$$\min_u J, U = \{u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N-1|t)\} \quad \text{subj. to} \begin{cases} \text{状態方程式} \\ \text{速度・加速度制約} \\ \text{障害物回避条件} \end{cases}$$

3. シミュレーション

5台の車両が隊列走行している状況を想定し、先頭車両(非ACC車両)を100km/hから減速させた場合のシミュレーションを行い、車群安定性を満たした車両が車群走行することによる効果を確認し、パラメータ設定の妥当性を検証する。



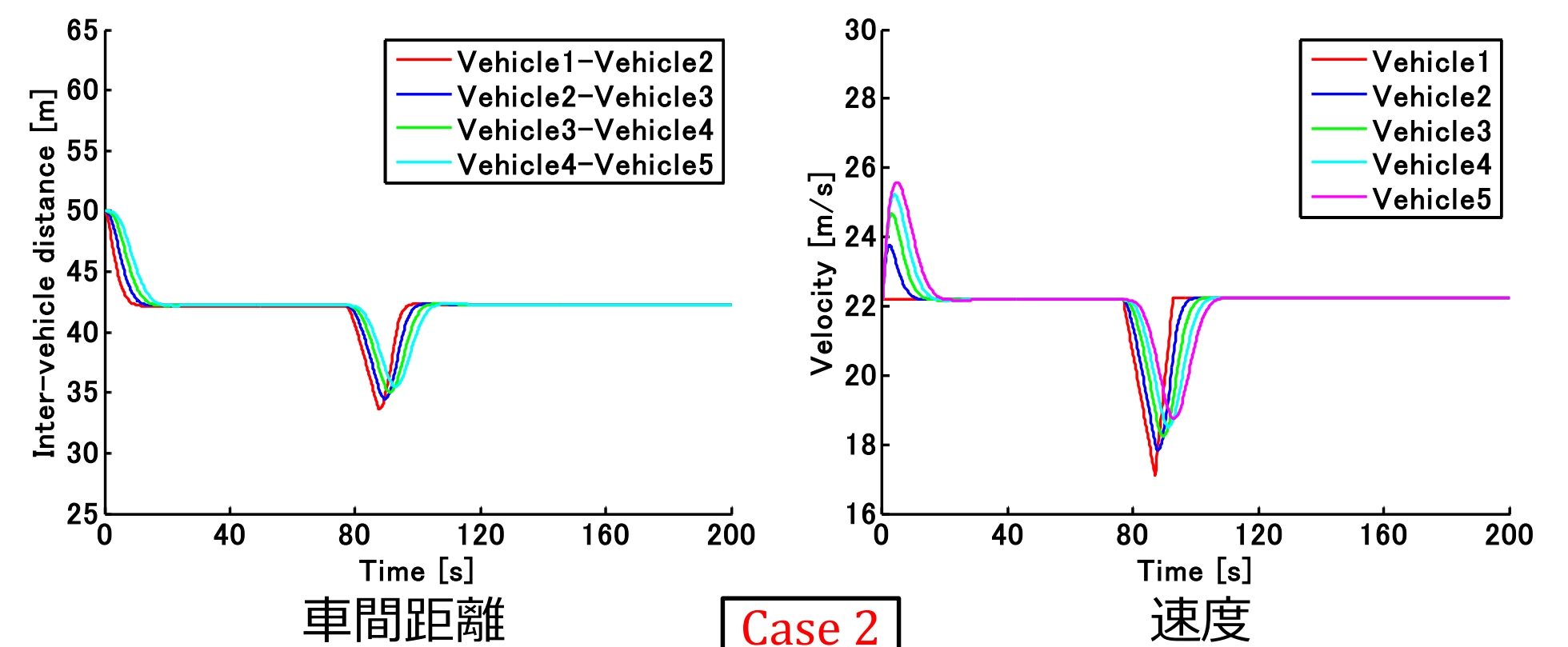
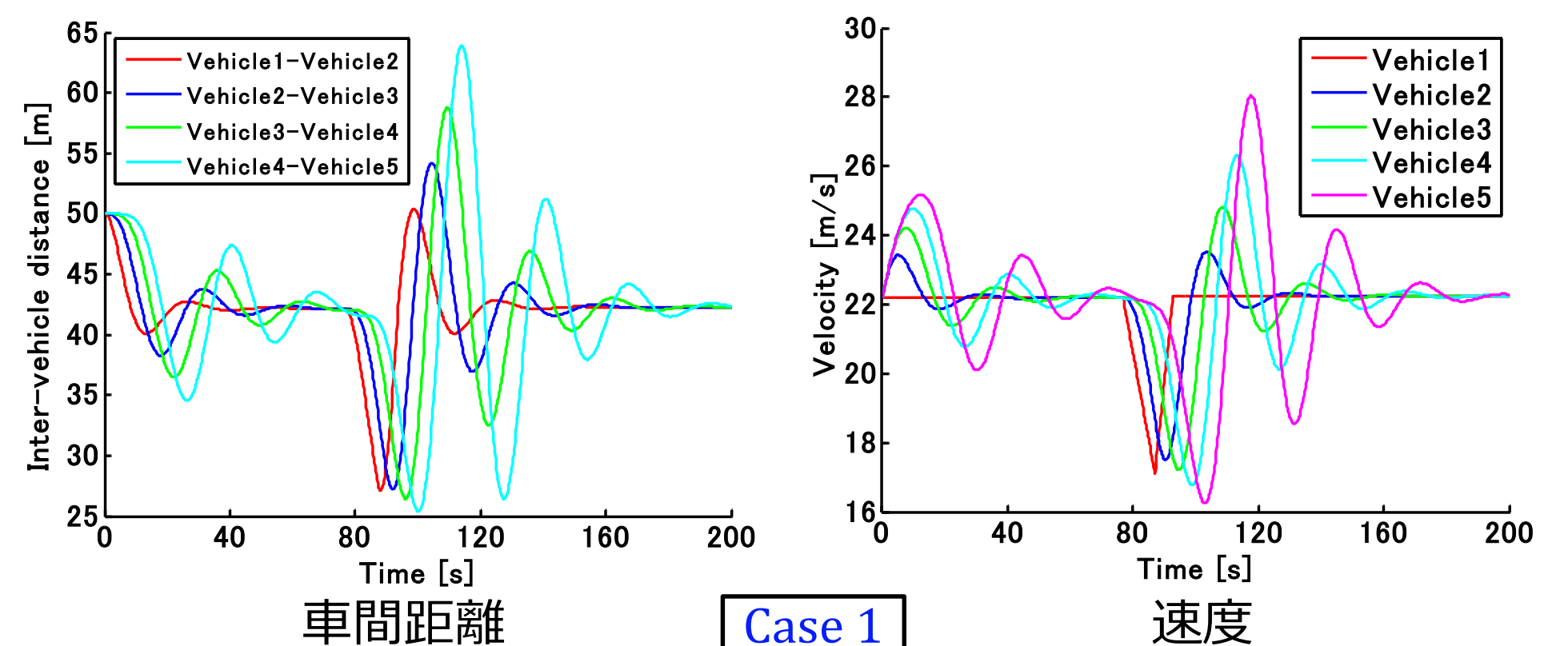
<<シミュレーション条件>>

- ステップ数: 1000 [step] ● 最高時速: 100 [km/h]
- ボトルネック区間: 1500~2000 [m] ● 車間時間: 2 [s]
- 初期状態: $x_1(0) = \begin{bmatrix} 100 \\ 27.8 \end{bmatrix}, x_2(0) = \begin{bmatrix} 50 \\ 27.8 \end{bmatrix}, \dots, x_5(0) = \begin{bmatrix} -100 \\ 27.8 \end{bmatrix}$

Case 1: 車群安定性を満たさない場合 (k=100, c=100)

Case 2: 車群安定性を満たす場合 (k=400, c=600)

<<シミュレーション結果>>



- Case 1の速度と車間距離の図から、収束に時間がかかっており、また速度図から、先頭車が減速した影響を受け、速度変動が大きくなっていることが確認できる。
 - Case 2では、初期状態からの収束も早く、先頭車の減速による影響が抑えられていることが確認できた。
- ⇒ 車群安定性を満たした車両がさらに連なって走行することで、ボトルネック区間の影響を解消することができると考えられる。

4. 成果・今後の展望

- MLDシステム表現を用いて車群安定性を導入したACCモデルの提案を行った。
- 車群安定性を満たす車両が車群走行することで、渋滞発生の要因である減速波の増幅伝搬が抑えられることを確認した。
- 車車間通信を導入したCACCモデルの構築

参考文献

- [1] 大前: ACC(車間距離制御装置)とCACC(通信利用協調型車間距離制御装置)のアルゴリズム, 電学誌, Vol. 135, No. 7, pp. 433-436 (2015)
[2] A,Bemporad and M,Morari: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints, Automatica 35, pp.407-427 (1999)