

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

児島研究室 横江 秀信

キーワード: モデル予測制御, MLDシステム, 交通流

1. はじめに

交通渋滞問題は大きな社会問題の一つである。様々な状況下で交通流を仮想的に再現し、その挙動を予測・解析ができる交通流シミュレータを構築する意義は極めて高い[1]。ハイブリッドシステム表現を用いて交通流をモデル化し、個々の車両の運動をモデル予測制御問題を解くことにより再現する[1],[2]。シミュレーションでは、ボトルネック区間を起因とした渋滞現象を再現する[3],[4]。

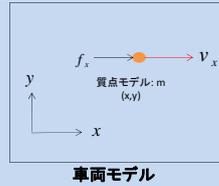
2. 交通流のモデリング

- 車両モデルを平面上の質点モデルとして捉える
- 交通流モデルは離散時間システムである
- 二次形式の評価関数をモデル予測制御問題で解くことにより車両の挙動を表現

評価関数

$$J = \sum_{l=1}^{N-1} ((s_{t+k|l} - s_f)^T Q (s_{t+k|l} - s_f) + u_{t+k|l}^T R u_{t+k|l}) \quad Q \geq 0 \quad R \geq 0$$

$$s_f = [x_f \ y_f \ 0 \ 0]^T$$



車両モデルの状態方程式

$$s_{k+1} = A_d s_k + B_d u_k \quad A_d = e^{A_h}, B_d = \int_0^h e^{A_\tau} d\tau B_c$$

$$s_k = [x_k \ y_k \ v_{xk} \ v_{yk}]^T, \quad u_k = [f_{xk} \ f_{yk}]^T$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

モデル予測制御

$$\min_U J, U := \{u_{t|t}, u_{t+1|t}, \dots, u_{t+N-1|t}\}$$

subj.to

- 状態方程式
- 速度・加速度制約
- 障害物回避条件

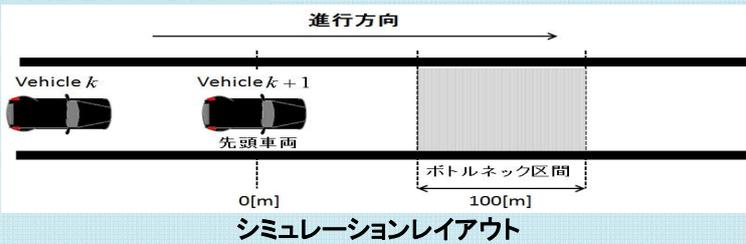
$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

速度制約・加速度制約

$$0 \leq v_{xk} \leq v_{x\max}$$

$$a_{x\min} \leq \frac{1}{m} f_{xk} \leq a_{x\max}$$

3. シミュレーション



自由走行

$$D \geq 40[m]$$

$$a_{x\min} \leq a_{xk} \leq a_{x\max}$$

安全車間距離

$$G_s = 0.0029 * v^2 + 0.3049 * v [m]$$

追従走行

$$D < 40[m]$$

$$\alpha_{xk} = v_{xk+1}(t-\tau) - v_{xk}(t-\tau)$$

$$D \leq G_s$$

減速走行

$$a_{x\min} \leq \alpha_{xk} \leq -\alpha_g$$

$$\alpha_g = 1.2 [m/s^2]$$

τ [step]: 反応遅れ時間

自由走行状態の車両がボトルネック区間を通過する場合

加速度制約

$$a_{x\min} \leq \frac{1}{m} f_{xk} \leq -\alpha_{sag} \quad \alpha_{sag} = 0.3 [m/s^2]$$

加速度変化制約

$$a_{h\min} \leq \frac{f(k) - f(k-1)}{mh} \leq a_{h\max}$$

シミュレーション条件

サンプル時間: 3000 [step]

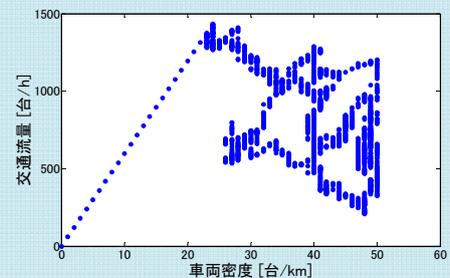
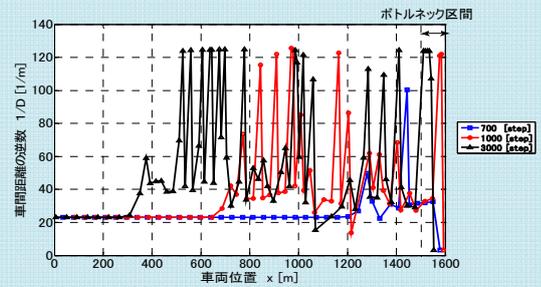
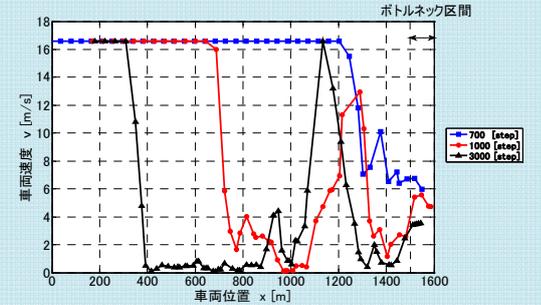
反応遅れ時間: $\tau = 3, 4, 5, 7$ [step]

m [kg]	1500	Equivalent mass in the vehicle dynamics
W [m]	5	Longitudinal width of each vehicle
l [m]	2	Length of each vehicle
μ [rad/s]	1	Damping factor in the vehicle dynamics
$a_{\max}^f [m/s^2]$	2.4	Maximum acceleration of vehicle in the free mode
$a_{\min}^f [m/s^2]$	-6.86	Minimum acceleration of vehicle in the free mode
$a_{\max}^D \leq G_s [m/s^2]$	-1.2	Maximum acceleration of vehicle in the $D \leq G_s$
$a_{\max}^{sag} [m/s^2]$	-0.3	Maximum acceleration of vehicle in the sag section
$v_{\max} [m/s]$	16.6	Maximum velocity of vehicle
$v_{\min} [m/s]$	0	Minimum velocity of vehicle
h [s]	0.2	Sample time in the discrete-time setting
N	5	Horizon of model predictive control

- ボトルネック区間, 反応遅れ時間により減速波が発生し, 後方へ増幅伝搬している。
- 粗密波も同様に, 時間が経つにつれ後方へ増幅伝搬している。
- 交通流量-車両密度の関係より, 自由流から渋滞流への遷移現象が確認できる。
- 臨界密度約25[台/km], メタ安定状態も再現できている。

4. おわりに

- ハイブリッドシステム表現の一つであるMLDシステム表現を用いて交通流をモデル化し, ボトルネック区間における渋滞現象を再現した。
- ボトルネック区間による車両の減速度が, 反応遅れ時間により後方へ増幅伝搬し, 最終的に渋滞発生に至ることが確認された。
- 基本図より自由流から渋滞流への遷移現象を確認し, 提案モデルが交通流の基本特性を有することを示した。
- 今後は, 追い越し現象などを考慮した2車線交通流シミュレーションへと拡張していく予定である。



REFERENCES

- [1]向井, 川邊, 西羅, 高木, 出口: “モデル予測制御による自動車の障害物回避のアプローチ” 第49回自動制御連合講演会, 2006.
- [2]T.Koukaki and A.Kojima: “A modeling of pedestrian flow based on MLD system approach,” ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009.
- [3]D.Helbing: “Traffic and related self-driven manyparticle systems,” Rev. Modern Phys., vol. 73, pp.1067-1141, 2001.
- [4]杉山: 交通流の物理, ながれ, Vol. 22, pp. 95-108 (2003)