

最適速度ロボットによる1次元交通流の安定性

田中啓太郎¹, 本田泰²

¹ 室蘭工業大学 情報電子工学系専攻

² 室蘭工業大学 しくみ情報系領域

概要

最適速度ロボットを20台用いて1次元交通流の形成実験を行い、軌道の観測結果から交通流の安定性を調べた。軌道のグラフから、交通流の安定及び不安定領域を求め、線形安定性解析の結果と比較すると、安全距離 (x_{neutral}) が比較的短い時には概ね両者が一致したが、一方 x_{neutral} 長くなると軌道のグラフからは安定・不安定を判断することが困難となった。そこで、速度の標本分散を求め、安定性の判断を行ったところ、安定流とは異なる分散値が観測された。

Stability in one dimensional traffic flow of the optimal velocity robots

Keitaro Tanaka¹, Yasushi Honda²

¹ Division of Information and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology

² College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology

Abstract

We have observed traffic flow of 20 robots which are controlled by the optimal velocity model and run on a circuit. We have judged stability of traffic flow from the trajectory by visual observation. For small value of safety distance (x_{neutral}), the stability of the traffic flow is consistent with the liner stability analysis. However in the case of large x_{neutral} , stable traffic is not observed. So we have observed the sample variance of velocity. It is found that the sample variances for larger x_{neutral} than the boundary obtained by the liner stability analysis have different value from those for stable region.

1 はじめに

交通流は日常的に観測できるなじみ深い現象であり、1990年代からさかんに研究が行われてきた。交通流には、少なくとも滑らかな流れ（自由流）と渋滞が存在することが直観的にわかる。また交通渋滞の数値シミュレーションから、車両密度が高いときは車のわずかな摂動によって、ボトルネック構造がなくても渋滞は発生すると考えられている。（不安定な交通流である）[1][2]。しかし交通渋滞は本来、実世界における現象なので、外乱や、制御における時間遅れの影響なども考慮しなければならない。そこ

で、実車を使った実験が必要になってくる。しかし、実車を使った実験は人間が運転する必要があり、各ドライバーがどのような考え方、アルゴリズムで運転しているのかが、ブラックボックス化してしまう。そこで、本研究では運転のアルゴリズムを明確にするために、最適速度モデルを実装した自律走行ロボット（最適速度ロボット）[3]を20台用いて、周囲約10mの1次元サーキットで交通流実験を行った。

2 最適速度ロボット

最適速度ロボットは前方と右前方に超音波センサ

を搭載している。これにより、コースに沿った走行と、最適速度モデルに従った走行が可能となる。

2.1 最適速度モデル

本実験では、最適速度モデルを採用する [2][4]。最適速度モデルの運動方程式を (1) 式に示す。 $x_n(t)$ は時刻 t における n 番目の車の座標、 $\Delta x_n(t)$ は先行車との車頭距離、 a は感応度を表している。

$$\ddot{x}_n(t) = a \{V(\Delta x_n(t)) - \dot{x}_n(t)\} \quad (1)$$

最適速度関数は (1) 式を採用する [4]。

$$V(\Delta x(t)) = \frac{v_{\max}}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{\Delta x(t) - x_{\text{neutral}}}{x_{\text{width}}} \right) + \tanh \left(\frac{x_{\text{neutral}}}{x_{\text{width}}} \right) \right\} \quad (2)$$

2.2 周回走行

最適速度ロボットは円形の壁に沿って走行する。超音波センサでコースの壁との距離を計測し、壁との距離を一定に保つように感覚運動写像による制御で、左右のモータ出力の調整を行なっている [3]。

3 交通流形成実験

最適速度ロボットを用いて交通流形成実験を行った。20台の最適速度ロボットを並べた例を図1に示した。

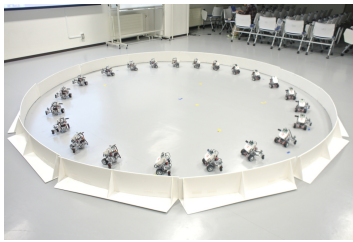


図 1: 周回コース

3.1 実験パラメータ

実験時の各パラメータの値を表 1 に示す。本実験では、感応度 a 及び安全距離 x_{neutral} の値を変化させて実験した。 a が大きいほど、 Δx のズレに対して大きく反応する。 x_{neutral} は最適速度関数における最も傾きが大きい点であり、車頭距離 Δx が x_{neutral} に近いほど、僅かな車頭距離のズレに対して大きく反応する。

記号	意味
N	台数 (20 台)
L	コース長 (1071[mm])
b	平均車頭距離 L/N (537[mm])
v_{\max}	最高速度 (150[mm/s])
a	感応度 (0.3~1.2)
x_{neutral}	安全距離 (400~700[mm])
x_{width}	車長 (130[mm])

表 1: 実験パラメータ

3.2 実験結果

$a=0.8$, $x_{\text{neutral}} = 400, 550, 700$ のときの基本図を図 2 に示す。流量は、円形のコースを 120 度毎に 3 分割し、各地点を通過した車両数を 20 秒ごとに求め、その 20 秒間に通過した車両の車頭距離の平均値から、その部分の密度を計算しプロットした。また、全ての車両が速度 v_{\max} で走行した時の流量の理論値を黒線でプロットした。全体的に、密度が増えるにつれて流量も増加しているように見えるが、 x_{neutral} 毎に細かく見ていくと、3つのグループにわかれていることがわかる。赤色で示した $x_{\text{neutral}} \leq 500$ のグループでは密度の増加に応じて理論値に沿って流量が増加している。緑色で示した $500 < x_{\text{neutral}} < 600$ のグループでは、密度の増加に対して流量があまり変化していない。このとき、密度が増加すると車両の速度が減少していることがわかる。青色で示した $600 \leq x_{\text{neutral}}$ のグループでは、流量が低くなっており、車両が常に低速で走行していることがわかる。

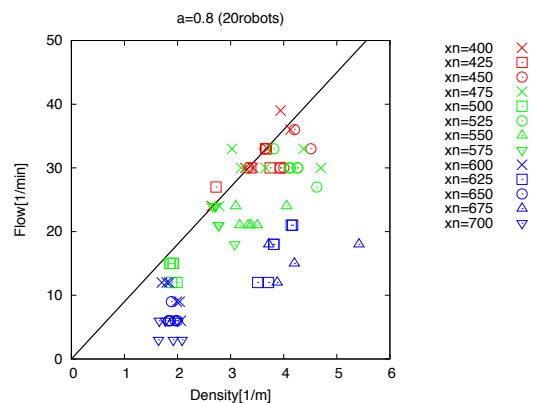


図 2: 基本図：凡例中の x_n は x_{neutral} の省略である

4 交通流の安定性の検討

実験を行った各パラメータにおいて、交通流の安定性を検討する。

4.1 車両位置-時間面の軌跡

20台の最適速度ロボットが成した交通流の様子を図3から図5に示す。横軸はコースの円周におけるロボットの位置を、縦軸は時間をそれぞれ示している。

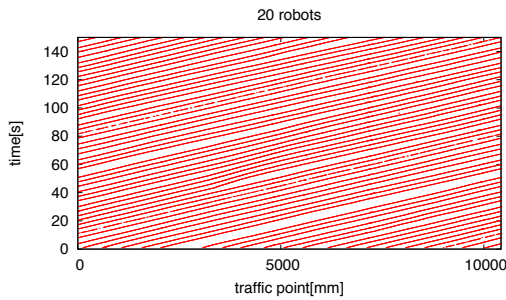


図3: $a=0.8, x_{\text{neutral}}=400$ の車両の軌道

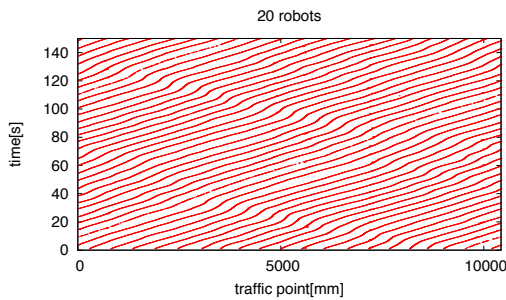


図4: $a=0.8, x_{\text{neutral}}=550$ の車両の軌道

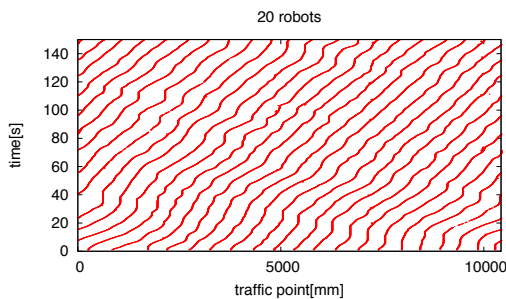


図5: $a=0.8, x_{\text{neutral}}=700$ の車両の軌道

$a=0.8, x_{\text{neutral}}=400$ のとき (図3) は、全ての車

両がほぼ一定の速度で安定して測定していると思われる。 $a=0.8, x_{\text{neutral}}=550$ のとき (図4) は、車両の速度が遅くなり、後方に伝播していく様子が縞模様のように現れており、不安定流であると考えられる。 $a=0.8, x_{\text{neutral}}=700$ のとき (図5) は、全ての車両が常に細かい加減速を繰り返している様子がわかる。縞模様が現れているようにも見えるが、目視による判断は困難である。

4.2 線形安定性解析との比較

図4のような縞模様が見られた交通流を、不安定流であると判断し、線形安定性解析の結果と比較を行った。相図を図6に示す。

$$V'(b) < a/2 \quad (3)$$

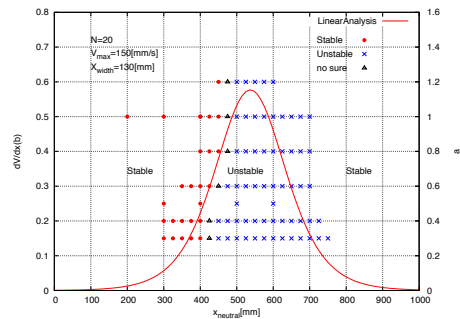


図6: 実験データと線形安定性解析の比較

線形安定性解析では、(3)式を満たすとき、交通流が安定であると判断される [2]。線でプロットしているのが、線形安定性解析における安定・不安定の境界線である。横軸は x_{neutral} 、縦軸 (左) は $V'(b)$ である。点でプロットしてあるのが、ロボットによる実験で得られた安定・不安定である。縦軸 (右) は a である。赤い丸が安定、青いバツが不安定と判断された点である。安定、不安定の判断が難しかった点は黒い三角でプロットしてある。図6に示すように、図6左側の x_{neutral} が短い範囲では、目視の判断と線形安定性解析の結果が概ね一致しているのに対して、図6中央から右側の x_{neutral} が長い範囲では、大きく異なる結果となった。

4.3 車頭距離-速度面の軌跡

車両位置-時間面のグラフからの安定性判断は、人間の主観に依るところが大きい。そこで、車頭距離-速度面の車両1台の軌跡のグラフからの判断を試みた。 $a=0.8, x_{\text{neutral}}=400$ のとき (図7(a)) は、一定

の車頭距離と速度を維持しているのに対し、 $x_{\text{neutral}}=550, 700$ のとき (図 7(b), 図 7(c)) は、軌跡が大きく揺らいでいるのがわかる。

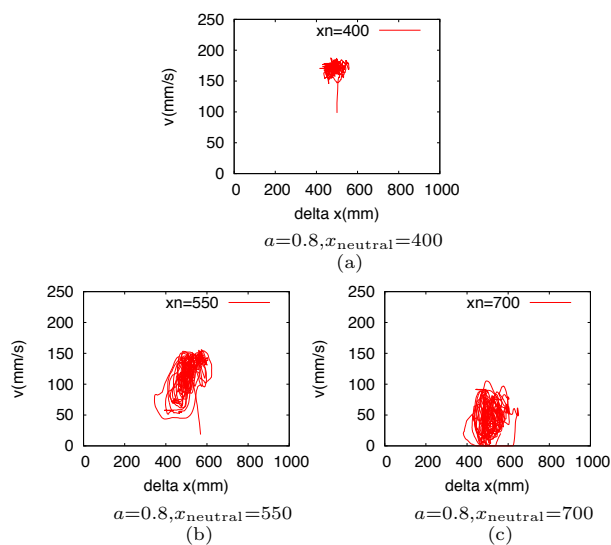


図 7: 車両 1 台の軌跡

4.4 車両 1 台の速度の標本分散

車頭距離-速度面の軌跡のグラフで見られた揺らぎに対して、さらに定量的な判断を行うために、車両 1 台の速度の標本分散を求めた。図 8 に示すように、 $x_{\text{neutral}}=475$ [mm] 付近で、急激に標本分散の値が変化しているのがわかる。これは、実験データの目視に依る判断や、線形安定性解析の結果とほぼ一致する。また、 $x_{\text{neutral}}=600$ [mm] あたりを軸に左右対称の形になっているようにも見える。

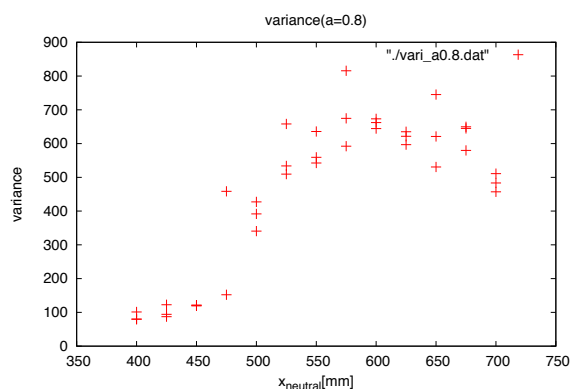


図 8: $a=0.8$ のときの速度の標本分散

5 まとめと考察

1 次元最適速度ロボットを 20 台用いて交通流の

形成実験を行い、各車両の動きを視測した。視測結果から、軌跡のグラフの目視に依る安定性の判断を行った。線形安定性解析の結果と比較すると、安全距離が短い時には概ね一致したが、安全距離が長くなると結果は一致しなかった。そこで、速度の標本分散を求め、安定性の判断を行ったところ、 $a=0.8$ のとき、 $x_{\text{neutral}}=475$ [mm] あたりに、安定性の境界が存在すると思われる。また、 $x_{\text{neutral}}=600$ [mm] あたりを軸に左右対称の形になっているのではないかと推測される結果が得られた。この予想が正しいとすれば、 $x_{\text{neutral}}=725$ [mm] あたりにも、安定性の境界が存在するのではないかと推測することが出来る。線形安定性解析とロボットによる実験で安定性の境界が一致しない原因として、まず、ロボットの制御には時間遅れが生じるのに対し、線形安定性解析で算出した理論値は時間遅れが考慮されていないという点が考えられる。また、先行車両との距離の取得に超音波センサを用いているためノイズが生じる。 $\Delta x < x_{\text{neutral}}$ では、速度が非常に小さくなるため、そのノイズの影響を大きく受けていると考えられる。こうしたハードウェア的な要因が、境界のずれを引き起こしているのではないかと考えられる。

6 今後の課題

$a = 0.8$ 以外のパラメータの実験結果についても、標本分散を求め、安定性の判断を行う。センサ値のノイズなどのハードウェア的な要因を考慮した上で、理論値との比較を行う。また、ハードウェア的な問題を解消する手段を検討する。

参考文献

- [1] 只木進一, 菊池誠, 福井稔, 中山章宏, 西成活裕, 柴田章博, 杉山雄規, 吉田立, 湯川諭, 第 19 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, 65-68, (2013).
- [2] M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata, Y.Sugiyama, PHYSICAL REVIEW E 51, 1035-1042, (1995).
- [3] 田中啓太郎, 佐々木卓哉, 本田泰, 超音波センサを用いた感覚運動写像による一次元最適速度ロボット, 第 20 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, (2014)
- [4] 菊池誠, 杉山雄規, 只木進一, 湯川諭, 日本物理学会講演梗概集, 最適速度関数に基づく結合写像交通流シミュレータ, 28a-Yj-7, (1997).