

# 最適速度ロボット交通流における超音波センサ誤差の影響

宮島高志<sup>1</sup>, 岩田耕<sup>1</sup>, 佐々木康希<sup>2</sup>, 本田泰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 室蘭工業大学 情報電子工学系専攻

<sup>2</sup> 室蘭工業大学 情報電子工学系学科

<sup>3</sup> 室蘭工業大学大学院 しくみ情報系領域

## 概要

田中ら [1][2] は最適速度モデルを実装したロボットにより交通流を再現する実験を行った。実験で得られた自由流と渋滞流の境界は線形安定性解析とは一致しなかった。その主な原因は車間距離測定に用いた超音波が先行車に十分反射されなかったためと推定された。そこで本研究ではそれを実証するためにまず超音波センサの誤差を軽減させる反射板をロボットにとりつけて実験を行った。さらにノイズを付加したシミュレーションを行い、その結果と実験結果を比較しその影響を考察した。その結果から主原因は超音波センサ誤差であるが、モータへの出力不足も原因であるという結論を出した。

## Effect of ultrasonic sensor error in a traffic flow of the optimal velocity robots

Takashi Miyajima<sup>1</sup>, Kou Iwata<sup>1</sup>, Kouki Sasaki<sup>1</sup>, Yasushi Honda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Information and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology

<sup>2</sup> College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology

## Abstract

Tanaka et al[1][2]. incorporated the OV model into robots and carried out an experiment which reproduce traffic flow. The boundary between free and jammed flows was not consistent with that obtained by linear stability analysis. Its main reason was expected to be error of the ultrasonic sensor. So we have carried out an experiment with the robots to which reflectors are attached to reduce the error. We also carried out numerical simulations with additional noise, to compare the result with the experimental result. The main reason of the inconsistency in those results could be an ultrasonic sensor error and shortage of motor output.

## 1 はじめに

交通流は日常的に観測できる馴染み深い現象であり、1990年代から盛んに研究が行われてきた。交通流の数値シミュレーションからボトルネック構造がなくとも車両密度によって渋滞が自然に発生することが確かめられている [3][4]。しかし現実の交通現象では、外乱や制御時の時間遅れの影響を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

なってくるが、実車を使った実験においても交通流における相転移が観測されている [5]。しかし実車実験ではドライバーの考え方やアルゴリズムがブラックボックス化してしまう。

そこで田中らは交通流モデルである最適速度モデルを実装したロボットにより交通流を再現する実験を行った [1][2]。この実験は中間距離と感応度の2つのパラメータを変えると交通流にどのような変化が

起こるのか、特にロボットが滞りなく一定速度で走る状態（一様流）とロボットの密度が疎密に分かれ渋滞のような交通流（渋滞流）の境界がどのパラメータ条件なのかを探ることが主眼となっていた。最適速度モデルでは周期境界条件においては交通流の相転移条件が線形安定性解析で明らかになっている [3]。理論通りであれば実験においても境界となるパラメータ条件が線形安定性解析と同じになるはずであるが、実際には異なっていた。我々はこの原因が時間遅れや車間距離を測定するために取り付けられた超音波センサの誤差であると考えた。

本論文では超音波センサの誤差に着目し、それらの軽減をしたロボットによる走行実験を行った。この実験で用いられるロボットには後方に超音波反射板が取り付けられている。我々はさらにノイズを付加した最適速度モデルの数値シミュレーションを行い、それらを実験結果と定性的に比較することで超音波センサの誤差の影響がどの程度あるのかを調べた。

## 2 交通流形成実験

最適速度モデルは車両の加速度が (1) 式の微分方程式によって表される交通流モデルである。  $x_n(t)$  は時刻  $t$  における  $n$  番目の車両の位置、  $\Delta x_n(t)$  は先行車との車頭距離を、  $a$  は感応度を表している。

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

田中らは最適速度関数 (2) 式を採用した交通流形成実験を行った。

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

最適速度ロボット 20 台を用いて周期境界を実現させるため円周上に並べて実験を行った。このロボットに取り付けられた正面の超音波センサは車間距離の取得を可能にしている。車頭距離  $\Delta x$  はセンサーで得られた車間距離に車長  $x_{\text{width}}$  を加えたものである。実験時の各パラメータを表 1 に示す。感応度  $a$  及び中間距離  $x_{\text{neutral}}$  の値を変化させて実験した。図 1 は本研究の実験でロボットに取り付けられている反射板を、図 2 は実験時の様子を示す。

田中らの実験と同様に実験結果を示したのが図 3 である。横軸は  $x_{\text{neutral}}$  を、縦軸は  $a/2$  を表している。目視で車両がほぼ一定速度を走行していれば一様流と判断し、車両の速度にゆらぎが発生していれば渋滞流と判断している。曲線の内側が線形安定性解析における交通流が渋滞流になる領域である。X 印が渋滞流、○印が一様流、△印が判断がつかなかったこと、□印はモータが完全に停止したことを示している。田中らの実験では高  $x_{\text{neutral}}$  領域で線形安定性解析と一致しない判断結果となった。一方、本研究の実験結果からは一様流と渋滞流の境界は  $a = 0.8$  においては線形安定性解析の境界に近づいていることがわかる。



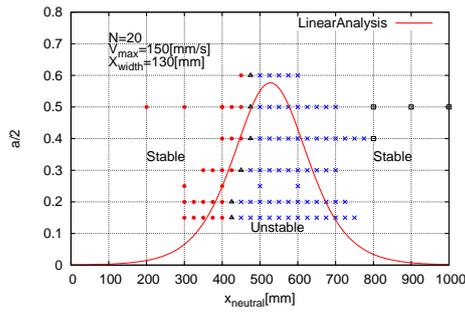
図 1: 後方に反射板をとりつけた最適速度ロボット

表 1: 実験で固定したパラメータ

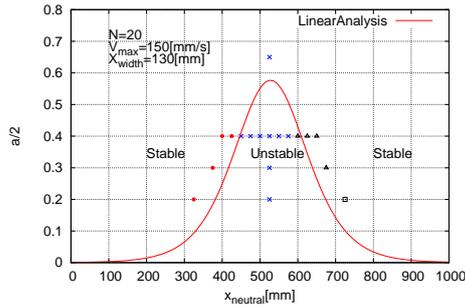
記号	意味
$N$	台数 (20 台)
$L$	コース長 (10710[mm])
$v_{\max}$	最高速度 (150[mm/s])
$a$	感応度 (0.3~1.2)
$x_{\text{neutral}}$	中間距離 (400~700[mm])
$x_{\text{width}}$	車長 (130[mm])



図 2: 実験風景



(a) 田中らの実験結果

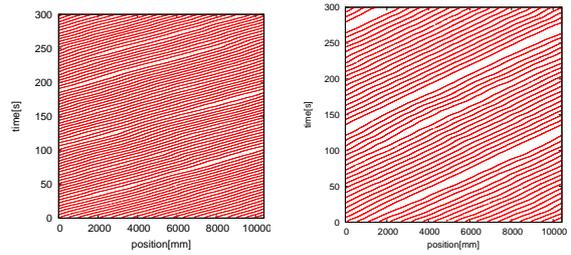


(b) 本研究の実験結果

図 3: 線形安定性解析における境界曲線と実験結果

実験結果の例として、 $a$  が 0.8,  $x_{neutral}$  が 500, 650 における車両の軌跡図を図 4, 5 に示す。横軸は各車両の位置を表し、縦軸は時間を表している。 $x_{neutral} = 500$  では反射板があってもなくても車両の速度のゆらぎから渋滞流と判断され線形安定性解析と一致する。また車両の速度が下がっている。 $x_{neutral} = 650$  では反射板がない場合は、渋滞流と判断できるが、これは線形安定性解析とは一致しない。反射板がある場合は一樣流か渋滞流か判断できなかった。

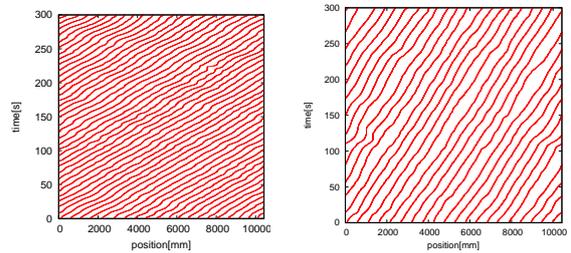
$a = 0.8$ ,  $x_{neutral} = 500$  において 1 台の車両の超音波センサの値を確認した結果が図 6 である。横軸は時間を、縦軸は距離を表している。反射板がない場合は超音波センサが実際の車間距離よりも遠くの距離を計測する頻度が高いことがわかる。反射板をつけた場合は超音波センサの誤差がなくなった。 $x_{neutral} = 500$  において反射板を付けると車両の速度が減少する原因は距離の誤差がなくなったことによるものと判断できる。



(a) 反射板なし

(b) 反射板あり

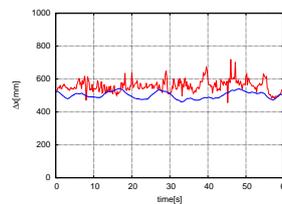
図 4:  $a = 0.8$ ,  $x_{neutral} = 500$  における軌跡図



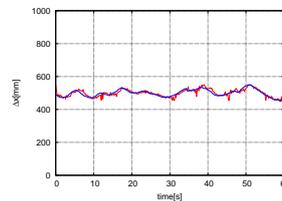
(a) 反射板なし

(b) 反射板あり

図 5:  $a = 0.8$ ,  $x_{neutral} = 650$  における軌跡図



(a) 反射板なし



(b) 反射板あり

図 6:  $a = 0.8$ ,  $x_{neutral} = 500$  における超音波センサ値。赤線は超音波センサの値と車長を加えた値を、青線は実際の車頭距離を示している。

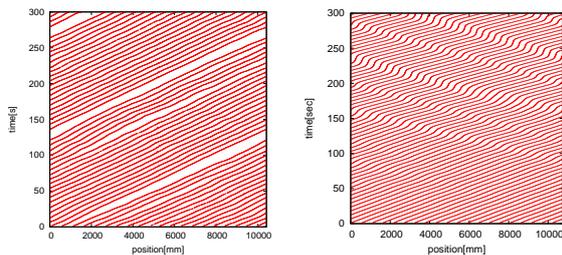
### 3 数値シミュレーション

車頭距離にノイズを付加した最適速度モデルとして(3)式を定義する。  $\xi$  は確率分布が平均  $\mu$ 、標準偏差が  $\sigma$  の正規分布に従う乱数値とする。

$$\ddot{x}(t) = a\{V(\Delta x(t) + \xi) - \dot{x}(t)\} \quad (3)$$

最適速度関数や各種パラメータは反射板をつけた実験と同じにして、(3)式に基づく数値シミュレーションを行った。シミュレーションは時間0.2秒刻みのオイラー法による。また反射板をつけた実験と同程度のノイズを再現するため  $\sigma$  に与えるパラメータは1.5、 $\mu$  は0.0とする。

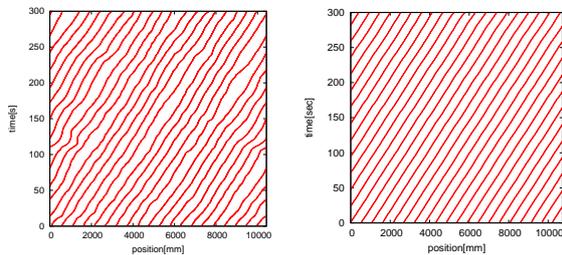
数値計算結果として  $a$  が0.8、 $x_{\text{neutral}}$  が500、650における、車両の軌跡図を図7、8に示す。 $x_{\text{neutral}} = 500$  においては反射板をつけた場合の車両の速度はシミュレーション結果に近いことがわかる。しかし  $x_{\text{neutral}} = 650$  においては、ノイズのあるシミュレーションからは一様流と判断できるが、実験結果からは判断できなかった。この原因は低速時におけるモータへの出力の不安定さであると考えられる。



(a) 反射板ありの実験

(b) シミュレーション

図7:  $a = 0.8$ ,  $x_{\text{neutral}} = 500$  における軌跡図(シミュレーションとの比較)



(a) 反射板ありの実験

(b) シミュレーション

図8:  $a = 0.8$ ,  $x_{\text{neutral}} = 650$  における軌跡図(シミュレーションとの比較)

### 4 まとめ

田中らの実験結果が線形安定性解析と一致しない原因を探るために、今回は超音波センサの誤差に着目し、これを軽減するための反射板を取り付けた。またノイズを付加した最適速度モデルの数値シミュレーションを行い両者の結果を比較考察した。

本研究では田中らの実験と比べて車両の速度が最適速度関数値に近づいたことが確認された。また一様流と渋滞流の境界が線形安定性解析に近い結果となることが観測された。

これより田中らの実験で、 $x_{\text{neutral}}$  が大きい領域で渋滞流が観測された原因の1つが超音波センサの誤差であることがわかった。また本研究で高  $x_{\text{neutral}}$  領域でも安定と判断されないのは低速時におけるモータ出力の限界と考えられる。

今後は多くのパラメータで実験を繰り返しデータを集め検証していく必要がある。また奇跡図から目視で判断するのではなく、速度の相関やその分布などを解析することにより、一様流と渋滞流の境界を決める解析を行いたいと考えている。

### 参考文献

- [1] 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, p39, (2014).
- [2] 田中啓太郎, 本田泰:「最適速度ロボットによる1次元交通流の安定性」, 第21回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, p83, (2015).
- [3] M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata, Y.Sugiyama, PHYSICAL REVIEW E 51, 1035-1042, (1995).
- [4] 菊地誠, 杉山雄規, 只木進一, 湯川諭:「最適速度関数に基づく結合写像型シミュレータ」, 日本物理学会講演梗概集, 28a-Yj-7(1997)
- [5] Tadaki S, Kikuchi M, Fukui M, Nakayama A, Nishinari K, Shibata A, Sugiyama Y, Yosida T and Yukawa S 2013 Phase transition in traffic jam experiment on a circuit *New J.Phys.*15 103034