

車間距離測定ノイズによる輻輳流

Congested flow induced by noise in headway measurements

内田 泰介*

只木 進一†

1 はじめに

最適速度モデル [1] は、車頭距離によって決まる最適 (安全) 速度になるように車両が加減速を行う追従モデル [2] である。車頭距離測定に雑音が入った場合、交通流はどのように変化するかを観測した。

2 モデル

各車両は先行車両に追従行動をとり、先行車両との車頭距離や相対速度などに応じた加減速を行うものとして考えることができる。これを追従モデルという。最適速度モデルは、追従行動を車頭距離に応じた最適速度への調整としてとらえるモデルである。各車両の速度は次式で表わされる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left[v_{\text{optimal}}(\Delta x) - \frac{dx}{dt} \right] \quad (1)$$

最適速度関数は一般に sigmoidal な関数である。ここでは、以下のような最適速度関数を採用する。

$$V(\Delta x) = \frac{v_{\text{max}}}{2} \left[\tanh \left(2 \frac{\Delta x - d}{w} \right) + c_{\text{bias}} \right] \quad (2)$$

v_{max} 、 d 、 w と c_{bias} の各パラメータは実際の観測データ [3] に基づいて決定することができる定数である (表 1)。

結合写像モデルは、最適速度モデルを離散化したモデルである。速度及び位置は次のように更新される。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (3)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(v_{\text{optimal}}(t) - v(t))\Delta t \quad (4)$$

目標速度 v_{optimal} は最適速度関数によって決定する。

$$v_{\text{optimal}}(t) = V(\Delta x) \quad (5)$$

衝突と後退をさけるため、最低車頭距離 Δx_{min} 未満になると停止するようにする。つまり $\Delta x < \Delta x_{\text{min}}$ のとき、式 (3) と式 (4) に代わって

$$x(t + \Delta t) = x(t) \quad (6)$$

$$v(t + \Delta t) = 0 \quad (7)$$

とする。

*佐賀大学工学系研究科情報科学専攻

†佐賀大学理工学部知能情報システム学科

表 1: 定数の設定詳細

定数	値	単位	定数	値	単位
d	25	m	Δt	0.1	sec
w	23.3	m	x_{min}	7.02	m
v_{max}	33.6	m/sec	L	7000	m
a	2	sec ⁻¹	L_{observe}	1000	m
c_{bias}	0.913				

2.1 乱れの導入

車両が先行車両との車頭距離を測定するとき、必ずしも正確な距離を測定できるとは限らない。人の目で測定するとき、距離が狭いときは測定の精度は高いが、距離が広ければ広いほど測定に雑音 (ノイズ) が混入し精度は低下するであろう。

ここでは、上述のような車頭距離観測の際の雑音の概念を導入し、雑音の強度によって車の流れにどのような変化が起こるのかを見ていく。実際の車間距離 Δx_{real} と人の見た車頭距離 Δx の関係を次の様な関係を仮定する。

$$\Delta x = \Delta x_{\text{real}}(1 + f_{\text{noise}}\xi) \quad (8)$$

ξ は $-0.5 \leq \xi \leq 0.5$ での一様乱数であり、 f_{noise} はノイズの強度を表す。

3 シミュレーションとその結果

3.1 系の概要

モデルとして長さ $L = L_1 + L_2 + L_{\text{observe}}$ の直線道路を考える (図 1)。道路の境界条件は開放境界条件を用いる。各車は入口から出口へ一方通行をする。出口に到着した車は系から取り除かれる。

初期条件として、入口に一台の車を速度 0(m/sec) で配置する。モデルは以下の規則に従い状態の更新を行う。

1. 道路の最後尾の車が最低車頭距離 Δx_{min} (m) 以上走行していれば新しく車を一台進入させる。

- 各車は、式(3)に従い前進する。ただし、車頭距離が最低車頭距離未満のときは式(7)に従い停止する。
- 各車は、現在の車頭距離と式(4)により加減速を行う。ただし、車頭距離が最低車頭距離未満のときは式(7)に従い急ブレーキを行う。
- 各車は、式(8)により車頭距離を更新する。もし先行車両がない場合は十分に大きい値を車頭距離とする。
- 出口に到着した車両は道路より取り除かれる。

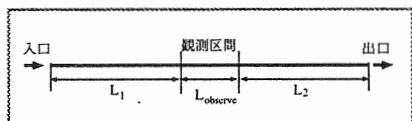


図 1: 道路の概観 車は左の入口から進入し、右の出口で取り除かれる

3.2 速度と車頭距離

式(8)に従って雑音を与えると、車頭距離-速度面内の軌道は揺らぎはじめる。その振幅は、雑音の強度が強くなるにつれて大きくなる。

図2に雑音 $f_{noise} = 1.8$ の場合を示す。これは、雑音による車頭距離のずれが引き起こしたものである。

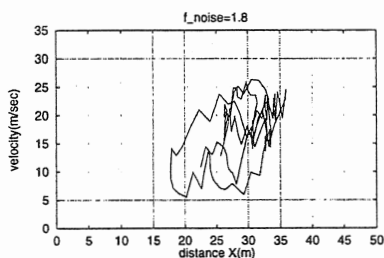


図 2: 車頭距離と速度 $f_{noise} = 1.8$ のときを表したものの。横軸に車頭距離、縦軸に速度を表している。

3.3 密度

雑音に対する密度の時間平均のふるまいを調べる(図3)。各時刻の密度 ρ_t に対して時間密度平均 $\langle \rho \rangle$ を

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{T} \sum_t \rho_t \quad (9)$$

で定義する。5000 ≤ t ≤ 15000 の 10⁴(sec) を観測時間としている。0 ≤ $f_{noise} \leq 0.5$ では、ほぼ 0.024

であるのに対し、 $f_{noise} > 0.5$ では、ノイズが強くなるにつれて平均密度は単調に増加している。

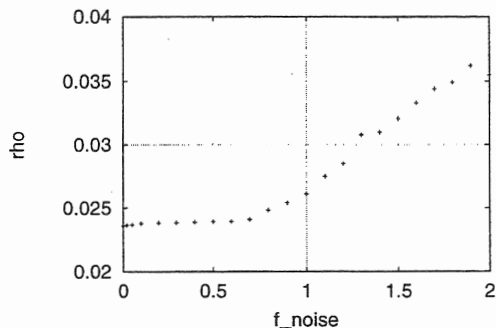


図 3: f_{noise} による平均密度の変化 横軸に雑音 f_{noise} 、縦軸に平均密度 (ρ) をプロットしたもの。 $f_{noise} > 0.5$ では、ノイズが強くなるにつれて平均密度は単調に増加している。

次に図4に各雑音に於ける密度の時間変化を示す。

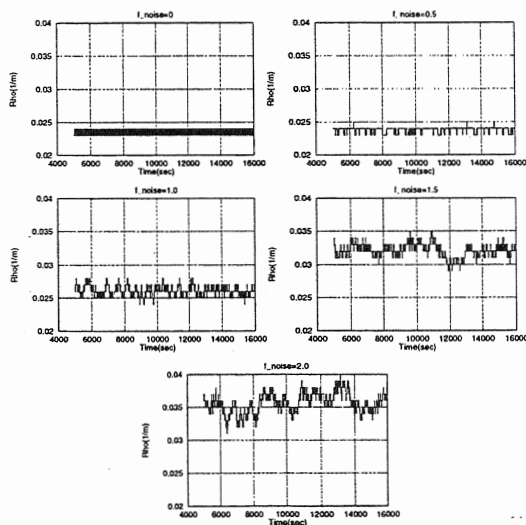


図 4: 区間密度の時間変化 左上から順に $f_{noise} = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ のときをプロットしたもの。 $\rho = 0.001$ 分の振動は、雑音のみがもたらす変化ではない。雑音が強くなるにつれて密度の変化が激しくなっている。

また ρ_t の時間スペクトル $I(k)$ を次のように定義する。

$$I(k) = \left| \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \rho_t e^{-2\pi i k t / T} \right|$$

図5に密度の時間スペクトルを各 f_{noise} で示す。

f_{noise} が小さいときは、どの周波数成分もほぼ同一の値を示している。 $f_{noise} \geq 0.5$ となると $k^{-\beta}$ という形になる。

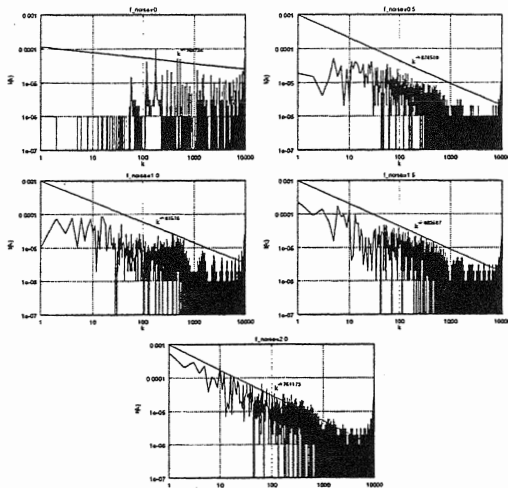


図 5: 密度の周波数成分 左上から順に $f_{\text{noise}} = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ のときをプロットしたもの $10^1 \leq k \leq 10^3$ において最小二乗法を用いて $I(k)$ に $k^{-\beta}$ をフィットさせた。

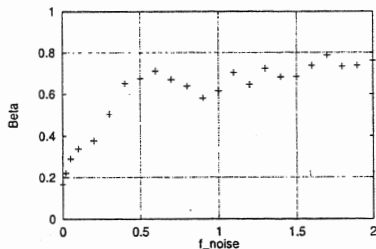


図 6: 密度の周波数成分変化の指数部分 β が高くなればなるほど長い波長の成分の値が高く、短い波長の成分が低いということになる。

3.4 到着時刻

ある地点において、車両が通過してから次の車両が通過するまでの時間を到着時間 t_{arrive} とする。この t_{arrive} の度数分布を図 7 に示す。雑音 f_{noise} が 0.5 のときは、到着時間はほぼ一定であり、 $f_{\text{noise}} = 1.5$ になると到着時間はバラツキを見せているのが分かる。つまり雑音が大きくなると、車両が密になっている部分 (t_{arrive} が小さい) と疎になっている部分 (t_{arrive} が大きい) が存在している。

4 密度増加の原因

ここでは、なぜ車間距離の測定に雑音が入ると結果として系の密度が高くなるのかを考えてみる。

ノイズのないときを考える。全ての車が同一の車間距離と速度で安定して走行している。今、ある一台の車だけがある瞬間だけ、車間距離の測定に雑音が入ったとする。

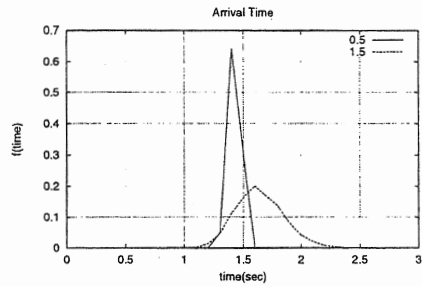


図 7: 到着時間の度数分布 横軸に到着時間を縦軸には全体を 1 とした相対度数を表す。

1. 車間距離を狭くとしたとき

- (a) 車間が狭いので、減速する。
- (b) 減速したため、前との車間は広くなり加速する。
- (c) ある程度の時間を要して加速も減速もしなくなる。

2. 車間距離を広くとしたとき

- (a) 車間が広いので、加速する。
- (b) 加速したため、前との車間は狭くなり減速する。
- (c) ある程度の時間を要して加速も減速もしなくなる。

図 8 はある時刻において現在の車頭距離の 5% 広くしたとき (Long) と 5% 短くしたとき (Short) の速度と車頭距離の時間変化を示している。Long のときと Short のときでは、Short のときの方が速度、車頭距離共に変化が大きい。これは最適速度関数に原因があると考えられる。定常状態のときの車頭距離より 5% 大きい値と小さい値では、小さい値になる方が変化量として大きいからである。

このときの密度変化を見てみる。各車両の車頭距離の逆数を区間で平均した値を密度と定義する。図 9 は、観測区間における密度変化 (左) と、雑音が入った車両より後続の車両 5 台の平均密度の時間変化 (右) である。一般に雑音の入った車両の変化に影響を与えるのは、それより後続の車両である。つまり、速度、車頭距離の変化は車両の進行方向とは逆に伝播する。図 9 (左) の Short では、区間が固定であるため雑音の影響を間接的に受けた車両が区間の外に存在し、結果的に密度変化が一時減少しているものと考えられる。

2 つの図に共通として言えることは、Short のほうが Long よりも変化が大きいことである。つまり、車頭距離を広く見積もる雑音と狭く見積もる雑音が同程度の割合である場合においては、全体的に密度は上昇する。

また、観測区間の密度に変化が表れてくるのはノイズが入ってから遅れていることが分かる。

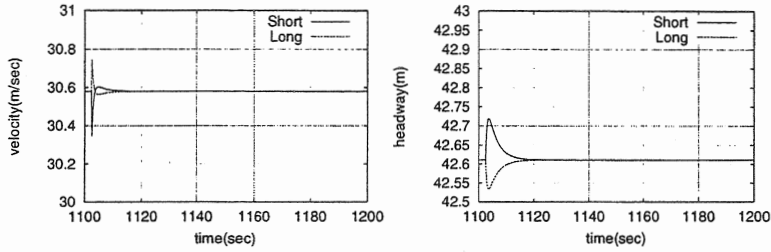


図 8: ノイズの影響による速度と車間距離 一台の車にノイズがある時刻にだけ生じた場合の速度(左)と車間距離(右)の時刻変化を表したものを。Short は車間距離を狭く見積もったとき、Long は広く見積もったとき。

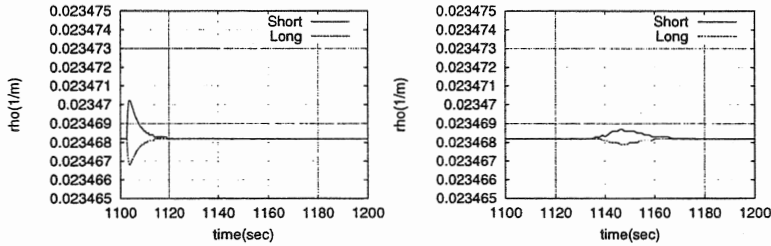


図 9: ノイズの影響による系の密度 Short は車間距離を狭く見積もったとき、Long は広く見積もったとき。左は雑音が入った車両より後続の車両 5 台の平均車頭距離を元に算出した密度の時間変化を表す。右は観測区間における密度変化を示す。

5 まとめと課題

今回の研究で言えることは、何も障害物がない一直線の道路でも車間距離の測定にノイズが発生すれば、車の密度は高くなり車の平均速度も遅くなるということである。また密度の時間変化にある「ゆらぎ」が発生し、ノイズが高くなるにつれて「ゆらぎ」の周期が長くなることが分かった。

このモデルでは、車頭距離測定ノイズによって車両がほぼ停止するような強い渋滞が自発的に発生するとは考えられない。

実際に車間距離の測定は、車間距離が広いときと狭いときとは測定する時間間隔が違ってくる。一般的に車間距離が広くなるにつれてその測定間隔時間は増加するものと考えられる。

参考文献

- [1] S. Tadaki, M. Kikuchi, Y. Sugiyama and S. Yukawa : J. Phys. Soc. Japan 7 (1998) 62.
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama : Japanese J. Ind. Appl. Math., 11 (1994) 203.

- [3] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama : J. Phys. I (France) 5 (1995) 1380.