社団法人 情報処理学会 研究報告
IPSJ SIG Technical Report

2006－MPS－62 (1)
2006－BIO－7 (1)
2006／12／21

追従運転モデル構築に利用する簡易作成模擬データの提案

王 維恩[†] 板倉 直明[†] 本多 中二[†]

我々はファジィニューラルネットワークを用いて，実走行データを学習するだけで，追従運転の再現できるモデルを提案した．しかし，モデルの構築は実データに依存することで，大量な実データを用意しなければならない．さらに，構築された追従運転モデルを実交通シミュレーションへ応用するには，モデルの構築に用いられた実データの運転特性を解明する必要がある．そこで，本研究では，完全な追従運転では先行車の速度変化だけが追従車に伝わっていくという仮説の前提で，速度がサイン波のように変化する追従運転模擬データを提案し，追従運転モデル構築への応用を検討する．

The proposal of brief hypothesis data utilized in the process of constructing the car-following model

WEIEN WANG[†], NAOAKI ITAKURA[†] and NAKAJI HONDA[†]

By using the Fuzzy Neural Network (FNN), the car-following driving model can be built to represent the actual driving, and which is no longer relying on the model designer's experience. Accordingly, a large quantity of actual data has been provided to build more precise car-following driving model. Besides, it's necessary to understand deeply the driving character which the model is applied for simulating the practical traffic. Therefore, in this research, we suppose that only the speed of preceding vehicle can transmit to the succeeding vehicle as long as it is an unadulterated car-following driving. Under this precondition, we simulated simple car-following driving data whose speed is like sine wave. And then we discussed the probability to build car-following driving model by those data.

1. はじめに

我々は，人口集中に伴う市街地の車の慢性的な渋滞問題に対処するために，ファジイ推論処理専用のプロセッサを開発し，それを用いた微視的道路交通シミュレータ(MITRAM)を提案した[1][2]．このシミュレータでは運転者の運転操作論理をファジィモデルで表現し，個々の車両挙動を決定するファジィモデル自動車（Fuzzy Model Vehicle，以下 FMV と略す）を用いている．

さらに，我々はファジィニューラルネットワーク（Fuzzy Neural Network 以下 FNN と略す）を FMV に取り込み，実走行データを学習させるだけで，実走行運転を再現することができた[3]．その FMV を用いてシミュレーションを行った際に時系列で，しかも距離レベル(車間距離)で評価した場合でも，ほとんどのデータにおいて実走行を再現することができていた．また，測定された実走行時系列データさえあれば，それを FMV の学習用データとして FMV に学習させることにより，個々の運転特性をモデル化することができる．

一方，ニューラルネットワークを用いたことで，追従運転モデルの一部がブラックボックスとなり，モデルから運転特性を直接説明することができない．実交通シミュレーションに耐えるような運転モデルを構築するには，運転特性を解明する必要がある．

そこで，本論文では，先行研究で明らかにされたいくつかの追従運転の特徴を利用し[4]，追従運転の簡易作成模擬データを提案する．そして，それらの模擬データを用い，

1）従運転特性の解明．
2）データの代替手段として運転モデルの構築．

を試み，模擬データの有効性について検討する．

2. 追従運転モデルの構築

追従運転データが与えられた場合には，そのデータから追従運転モデルを構築する．モデル化の手順は，対象となる実走行データから得られた先行車および追従車の加速度，速度，車間距離等を入力信号としてニューラルネットワークに与え，次時点の追従車加速度を教師信号として与える．これをバックプロパゲーション法によってニュ

† 電気通信大学
The University of Electro-Communications

ーラルネットワークに学習させることによってモデリングを行う.

さらに,複数のニューラルネットワークの出力を交通状況に応じてファジィ的に使い分けられるようにもなっている.その概要を図1に示す.

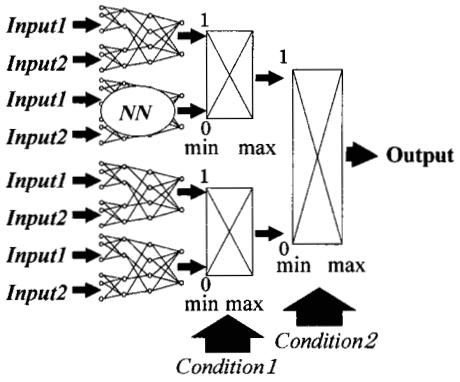


図 1　場合わけを考慮した FNN

上記の方法で,運転追従運転と思われる実データ(甲州街道=国道20号で計測した「停止・発進・停止」の全47個ファイル,計3474秒)を用いて47個の追従運転モデルを構築した.それらの追従運転モデルを用いてそれぞれの構築に用いられた実データの先行車への追従運転シミュレーション結果を表1に示す.

表 1　実データから構築された追従運転モデルを用いたシミュレーションの車間距離誤差

	車間距離誤差（絶対値）[m]	
	平均値	最大値
Data01	0.84	4.9
:	:	:
Data47	1.06	3.1
47結果 最小	0.23	0.9
47結果 最大	4.46	16.8
47結果 平均	1.01	3.91

表1に示したのは,それぞれの追従運転シミュレーション車間距離と実データ車間距離との誤差（絶対値）の平均値および最大値である.上記結果の内,平均値については最小0.23 [m],最大4.46 [m],全体平均1.01 [m]の実データに近い結果が得られた.

しかし,追従運転モデルは実データから構築されることによって,実データの追従運転特性を自動的に保つことが可能になった一方で,ニューラルネットワークを用いることで,追従運転モデルの一部がブラックボックスとなり,モデルから運転特性を直接説明することができない.

そこで,実交通のシミュレーションに耐えるような運転モデルを構築するには以下の問題点を解決しなければならない.

1）交通環境に適応な運転モデルを構築するための運転特性の解明.

2）実データが用意できない交通環境での代替手段の提案.

3.　簡易作成模擬データの提案

3.1.　実追従運転データの特徴

追従運転モデルの構築に用いられた実データを調べたところ,走行車両の運転挙動は殆んど「停止・加速・減速・停止」の繰り返しで,速度変化はサイン波のように見えた.このような変化は交通信号や工事による車線規制などの道路環境に影響されることから,運転特性を解明するには,サイン波が利用できると考える.

一方,先行研究[4]では,先行車が実走行データの最小加速度で減速・停止する場面を想定し,その先行車に追従車が衝突しないように,ある加速度をどのぐらいの時間で維持できるかを調べた.

そして,ほとんどが追従運転データだと考えられる実走行データのすべての時点に対して,追従車が先行車への衝突を回避するための減速操作を行う前に到達できる最大速度（目標速度）と先行車速度との間に高い相関が見られた.つまり,殆どの場合において,追従車は先行車速度を目標速度として追従運転を行うと考えられる.

3.2.　完全追従運転データの作成

実交通での運転挙動は「停止・加速・減速・停止」のような運転パターンが多いことから,我々は,式（1）で示すサイン波がこのような運転挙動を表現できるではないかと考えた.

$$V=\frac{V_{\max}}{2}\sin\left(2\pi ft-\frac{1}{2}\pi\right)+\frac{V_{\max}}{2} \qquad (1)$$

式(1)において,最大速度 V_{max} を考えるとき,一般道路の法定最高速度は時速60 [km/h]であることや,道路形状によって法定速度を10キロずつ減らして低く設定していることから,その値を10～60 [km/h]の6段階(10キロずつ)の値に設定するのが妥当と考える.

なお,本研究で用いる基本単位はメートルおよび秒であるが,分かりやすくするため,本論文では,速度の単位を[km/h]用いて記述する.

また，実交通での一般運転動作で出力する減速度は最大-3.0 [m/s^2]程度であるため，周波数 f を 0.01 ~ 0.06 [s^{-1}]の値に設定する（V_{max}=60[km/h]; f=0.06[s^{-1}]の時，加速度範囲は±3.1[m/s^2]となる）．

さらに，完全追従運転を想定した場合，追従車が先行車の挙動だけに影響され，先行車速度を目標速度とするため，先行車速度がある時間後に追従車へ伝播されると考えられる．

そこで，我々は上記のような特徴を利用すれば，完全追従運転の模擬データが簡単に作成できるではないかと考え，式（1）で示すサイン波のように変化する先行車速度 V_p が遅れ時間 τ 秒後完全に追従車に伝わると仮定する．

追従車速度 V_s および車間距離 D はそれぞれ式（2），（3）のようになる．

$$V_s(t) = V_p(t-\tau) \qquad (2)$$

$$D(t) = D(t-1) + V_p(t) - V_s(t)$$
$$= D(t-1) + V_p(t) - V_p(t-\tau) \qquad (3)$$

また，シミュレーションでの「反応遅れ時間」という名称のモデルパラメータは，現実の運転挙動における反応遅れ時間とは似て非なるものであるため[5]，本研究では式（2）（3）での遅れ時間 τ を単に数値的な「伝播遅れ時間」と考える．

なお，本研究で用いるデータのサンプリング時間は 1 秒のため，遅れ時間 τ の違いによる影響を検討するために，その値を一秒間隔とする．

式（1）～（3）を用い，最大速度 V_{max}(6 種類)，周波数 f(6 種類)および遅れ時間 τ (3 種類)との組合せで，計(6×6×3=)108 種類のサイン波追従運転模擬データを作成する．

また，追従車・先行車初期速度 $V_s(0)$,$V_p(0)$および初期車間距離 $D(0)$は

$$V_s(0) = V_p(0) = 0 \text{ [m/s]}; \quad D(0) = 1.0 \text{ [m]}$$

とする．

4. 模擬データを用いる追従運転特性の検討

3.2.節の方法を用いて，108 個の追従運転モデルを構築し，それらの追従運転モデルを用いて，47 個の実データ(Data01~ Data47)の先行車に対し，(108×47=5076 通り)追従運転シミュレーションを行った．

それぞれの実データに対し，時系列において，シミュレーション車間距離と実データ車間距離との最大誤差が最小となるような模擬データモデルを選び出し，表 1 と同様に平均値と最大値を表 **2** に示す．

表 **2** 108 種類の模擬データから構築した追従運転モデルを用いたシミュレーションの車間距離誤差

		車間距離誤差（絶対値）[m]	
		平均値	最大値
47 結果	最小	0.7	1.1
	最大	5.3	11.8
	平均	2.19	5.38

表 2 の結果を見ると，模擬データから構築した追従運転モデルを用いた場合でも，実データに近い結果が得られる模擬データが存在することが分かる．

さらに，表 2 の結果に従って，其々の実データに対し，最も良いシミュレーション結果が得られる追従運転モデルの構築に用いた模擬データのパラメータ設定を調べ，表 **3** および表 **4** に示す．

表 **3** 最大速度 V_{max} の設定 **(個)**

V_{max} [km/h]	20	30	40	50	60
	1	4	7	24	11

表 **4** 最適と思われる遅れ時間 τ の設定 **(個)**

τ	1 [s]	2 [s]	3 [s]
	15	30	2

表 3 を調べた結果，殆どの運転動作は最高速度を 50 [km/h]前後と想定した場合が多いと考えられる．実データを計測した甲州街道（国道 20 号）の速度制限は 50 [km/h]であることから，上記推定した最高速度 V_{max} は実の交通環境と合致していると考える．

また，表 4 で示したように，最適と思われる遅れ時間 τ の値が 1 秒，2 秒，3 秒となるのはそれぞれ，15，30，2 個で，平均的 1.7 秒であることを確認した．遅れ時間 τ の設定が長いほど，車間距離が大きくなり，先行車と衝突の可能性が減ることから，実データの解析した先行研究で定義した「余裕度」[4]との関連性が高いと考える．

そこで，それぞれの時系列実追従運転データから求めた「余裕度」の平均値との相関を調べたところ，その値は 0.719 であることが分かった．

5. 実データに代わる模擬データの応用

実交通での運転はかなり複雑で，計測不可能な

交通環境要素に影響される場合が多いと考えられる．一方，交通信号など単純な交通要素による先行車速度の変化はサイン波に近い場合もよくある．このような場合に限って，本研究で提案したサイン波模擬データを実データの代わりに追従運転モデルの構築に使えるのではないかと考えた．

しかし，上記 108 個の模擬データから構築した追従運転モデルを用いた追従シミュレーションでは，実データに近い結果が得られるものの，実データ先行車と追従運転モデルの組合せによって，シミュレーション車間距離に最大 1734.8 [m] の誤差が生じる場合もあった．それは，作成した模擬データの運転特性は非常に単純なため，その模擬データの学習によって構築された追従運転モデルも単一な運転状況にしか対応できないと考える．

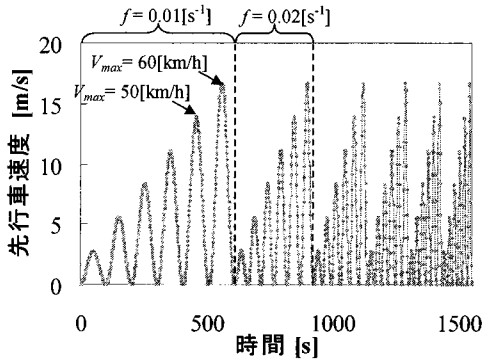


図 2　すべての模擬データの繋ぎ合わせ

そこで，図 2 のような，すべての模擬データ（6×6=36 種類）を繋ぎ合わせた模擬データ（τ =1,2,3 とした）3 種類を作成し，追従運転モデルを構築した．

すべての実データ先行車に対し，上記 3 種類の追従運転モデルを用いてシミュレーションを行った．その結果，車間距離の誤差範囲は τ =1 秒の時 2.5~39.6 [m]；τ =2 秒の時 2.2~23.3 [m]；τ =3 秒の時 5~30.8 [m], 単一運転特性の模擬データを用いた場合と比較すると，誤差範囲が小さくなったことが分かった．つまり，より実用的な追従運転モデルを構築するには，単一な運転特性よりも複数な運転特性を含めたデータを用いる必要があると考える．

また，遅れ時間 τ と運転特性の関連から，4．節の表 4 の結果から，最適と思われた遅れ時間 τ を利用し，すべての実データ先行車に対し，図 2 のような模擬データから構築した追従運転モデルを用いてシミュレーションを行った．その結果を表 5 に示す．

表 5　3 種類の繋ぎ合せた模擬データから構築した追従運転モデルを用いたシミュレーション車間距離誤差

		車間距離誤差（絶対値）[m]	
		平均値	最大値
47 結果	最小	0.8	2.2
	最大	11.2	19.8
	平均	3.42	8.09

表 5 から，遅れ時間 τ さえ正しく設定すれば，複数運転特性の模擬データから構築したモデル一つだけで，殆どの追従運転を再現することができると考える．

6.　おわりに

本研究では，市街地での運転挙動は殆んど「停止・加速・減速・停止」であることや，実追従運転データの解析から分かった特徴を利用し，サイン波のような簡易作成模擬データを提案した．それらの模擬データから構築した追従運転モデルを用いた場合でも，実データに近い結果が得られる模擬データが存在することが分かる．

その結果から，本研究で提案した模擬データを用いれば，実データの運転特性を解明することができると考える．

［参考文献］

[1] 本多中二他:ファジイ制御による自動車運転論理を取り入れた道路交通シミュレーションモデル，日本ファジィ学会第 7 回ファジィシンポジウム，PP.593-398(1991)

[2] 佐藤章他:渋滞解析を目的とした微視的道路システムの機能と構成，第 11 回シミュレーションテクノロジーコンファレンス,PP171-174(1992)

[3] 板倉直明、本多中二、猪飼國夫：ファジィニューラルネットワークモデルによる追従自動車運転理論の実現、日本シミュレーション学会誌 18-15、273/281(1999)

[4] 王維恩，板倉直明，本多中二：非衝突条件を用いた追従運転データ特性の考察，シミュレーション学会　Vol.25,No.4　掲載予定

[5] 社団法人 交通工学研究会：交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル(案) 平成 14 年 6 月 (第 2 版)