

長区間ビデオ撮影による車両追従挙動観測の試みとモデル化の方向性*

Observation of Car-following Behavior on Interurban Expressway and a Preliminary Study on Modeling the Behavior*

葛西誠**・野中康弘***・石田貴志****・内山久雄*****

By Makoto KASAI**・Yasuhiro NONAKA***・Takashi ISHIDA****・Hisao UCHIYAMA*****

1. はじめに

高速道路単路部における交通集中渋滞は車両追従挙動の集積が主因と考えられているが、既往追従挙動モデルを用いて当現象の再現を試みると追突が頻発するなど実交通流再現性に問題を有するものが多いとされ、既往モデル構造の再検討および新たなモデルの構築が要求されている。こうした検討には多種多様な交通状況下における長区間にわたる多数のドライバーの追従挙動データが不可欠と言え、この観点からビデオ観測法の活躍する余地は大きいと期待されるものの、実際に追従挙動分析にまで踏み込んだ例はほとんど見られない。そこで本研究は実交通流の長区間連続ビデオ観測、および映像データから追従挙動データの取得を試みる。さらに実際に取得されたデータに基づき不特定多数のドライバーの追従挙動を例示し、実交通流を再現可能な追従挙動モデルの記述の方向性について言及する。

2. 既往追従挙動モデルのレビューと本研究の位置付け

追従挙動モデルの研究は交通工学黎明期から見られ、古典的モデルとしては、GMモデルと呼ばれるGazis *et al.*¹⁾の提案したものが有名である。しかし我が国において都市間高速道路の交通集中渋滞が顕在化してから、同現象はドライバー個々の車両挙動の集積が原因であると考えられるようになり、それまでに提案されたモデルでは自由流と渋滞流間の遷移現象の説明が可能なモデルはないとされ、越²⁾は新たなモデルを提案した。Xing³⁾は本モデルの妥当性を検証するべくボトルネック上空に飛

行させたカイトバルーンから交通流ビデオ撮影を行なった。観測されたデータそのものの再現は可能であったが、車両の順番を入れ替えて追従させるシミュレーションを行なうと追突が容易に発生することが確認され、約250mという限定された区間のデータに基づきパラメータが推定されたことにも原因があろうが、追従モデル構造そのものに問題がある可能性も指摘された。これを受け尾崎⁴⁾⁵⁾は越²⁾のモデルを改良し、シミュレーションによりサグ部を先頭とする交通集中渋滞の再現を試みた結果、各車両のサグ部からの弱い加速が継続するという実交通流と同様の現象が見られたとしている。このようにサグ部にボトルネックが滞留する状況の再現が可能であったとしても、サグ部で自由流状態から渋滞流に遷移する過程を再現できるか否かについては言及がない。また大口⁶⁾によればこのモデルを持ってしても高密度交通流の再現を試みると追突の発生が見られ、実交通流の再現には依然問題があるというべきであろう。

筆者らは、従来のように追従車の加速度をドライバーが得る情報によって説明させる形式のモデル化手法とは異なり、車車間の状態量(車間距離、相対速度、相対加速度等)の時系列変化そのものを直接表現することで、追突など非現実な現象を生じずに交通流を再現可能なモデルの構築が可能となるのではないかと考えている。

追従関係にある2台の車両の車間距離-相対速度曲線は右回りの曲線「スパイラル曲線」を描きながらある車間距離に収束することが中山ら⁷⁾によって指摘されており、石田ら⁸⁾の試験車両による追従挙動観測によってもその事実が追認される。また比較的短い区間であるが単体のビデオカメラ観測により、追従を必ずしも強く意識しない一般ドライバーの挙動もスパイラル状を呈することを実証したUchiyama *et al.*⁹⁾の研究がある。しかしながら、この結果は地点依存性の影響を受けた特殊な挙動を観測したに過ぎない可能性も捨てきれない。したがって比較的長区間にわたり一般ドライバーの挙動がスパイラル曲線に従うことを確認する必要がある。よって本研究は、多数のドライバーの挙動を観測可能なビデオカメラの特性を活かしつつ、かつ複数台のビデオカメラを用いて長区間の追従挙動観測を試みる。

*キーワード：交通流、車両追従挙動、ビデオ観測

**学生員，修(工)，東京理科大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

(千葉県野田市山崎 2641, TEL:04-7124-1501

EXT:4058, E-mail:j7606701@ed.noda.tus.ac.jp)

***正員，博(工)，(株)道路計画 技術部

****正員，修(工)，(株)道路計画 技術部

*****フェロー員，工博，東京理科大学理工学部土木工学科

3. ビデオ観測によるデータ取得方法

(1) 既往の追従挙動観測例

ビデオ映像を用いた交通流観測は多数の例があるが、追従挙動の解析を目的とした都市間高速道路単路部を対象とした観測例は極めて少ない。これは、都市間高速道路が田園地帯などを貫いており周囲にビデオカメラ設置に適した高所が少ないことに帰着されよう。

こうしたカメラ設置上の制約を克服した観測例としては、カイトパルーンをボトルネック上空に飛行させて渋滞および遷移流を観測したXingら³⁾の例が有名であるが、これも約250mの観測区間長に留まる。また、都市間高速道路を対象としたものではないが、航空機からの連続写真撮影により約3kmにおよぶ区間のTime-space図を描いた例がある¹⁰⁾。

単体のビデオカメラでは一定の精度を確保したままでは撮影範囲も限定されたものとならざるを得ないが、複数のビデオカメラを用いて地点連続的に撮影することで原理上観測区間長は無制限となる。赤羽ら^{11),12)}はこの点に着目し、観測誤差配分と軌跡の接続を一体としたシステムを開発している。問題は上述のような制約のある都市間高速道路においても複数台カメラを用いた観測手法が成立するか否かであろう。

本研究では、2003年8月に行なわれた東北自動車道での渋滞実態調査時に同時に行なわれたビデオ観測の精度について再検討を行なう。ビデオ観測調査の概要は表-1に示す通りである。なお解析対象時間帯は渋滞流状態であった。

(2) 単カメラの対地標定

各カメラの設置位置と撮影範囲を図-1に示す。

表-1 観測概要

観測日時	平成 15 年 8 月 13 日 5 時 0 分～10 時 30 分 (5 時間 30 分)
解析対象時間	7 時 34 分 0 秒～7 時 43 分 30 秒 (9 分 30 秒間)
データ取得区間	追越車線 41.1～42.1kp の延長 1.0km (欠測区間 100m を含む)

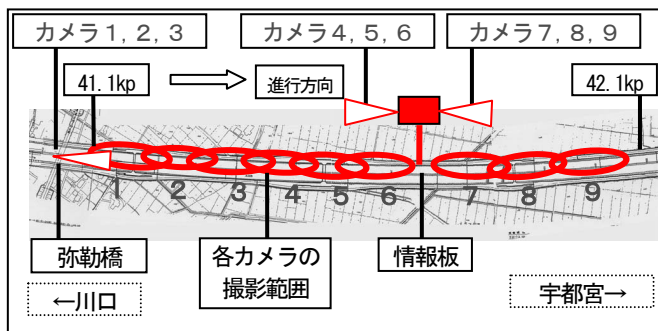


図-1 カメラの設置地点・撮影範囲

画像座標系と道路面上に設定した測地座標系との対応付けはいわゆる2次の射影変換に従う。道路面上のレーンマーク上に設置した不動点に対する中等誤差を表-2にまとめる。カメラ3, 4, 9はカメラ設置地点から遠い領域を撮影しており俯角が小さく、中等誤差も大きくなっている。

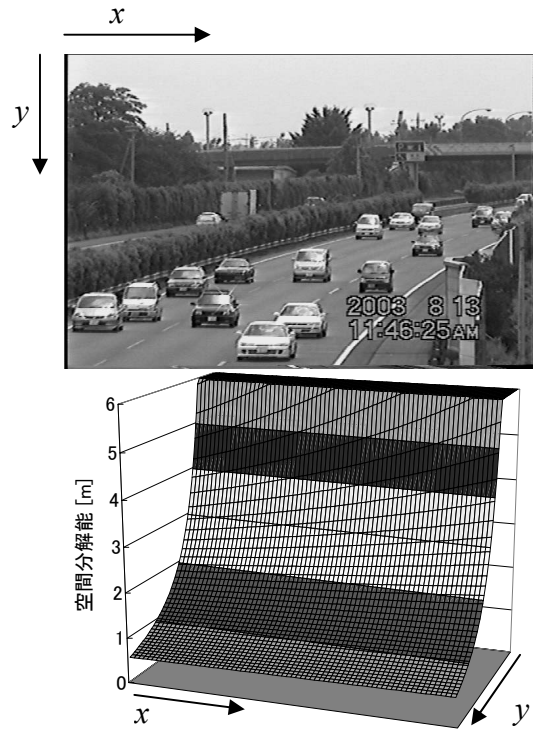


図-2 カメラ4の角度と空間分解能

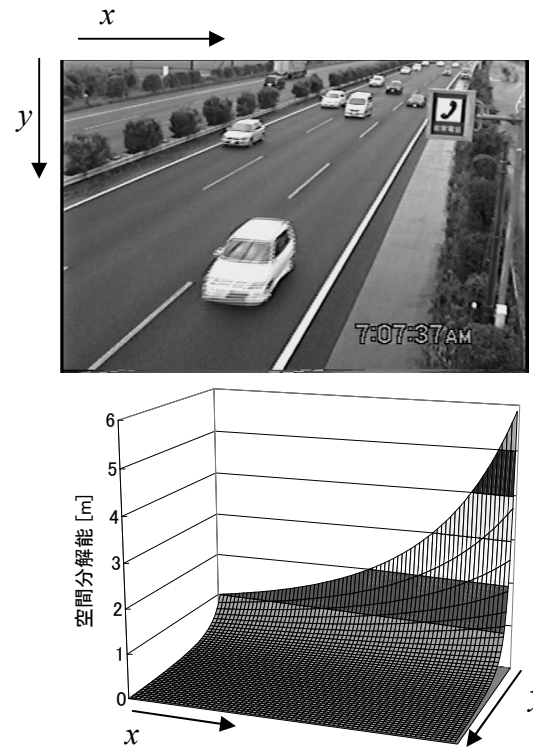


図-3 カメラ6の角度と空間分解能

表-2 各カメラの対地標定誤差

カメラ No.	中等誤差 [m]
1	0.658
2	0.681
3	0.823
4	1.747
5	0.572
6	0.561
7	0.444
8	0.927
9	1.238

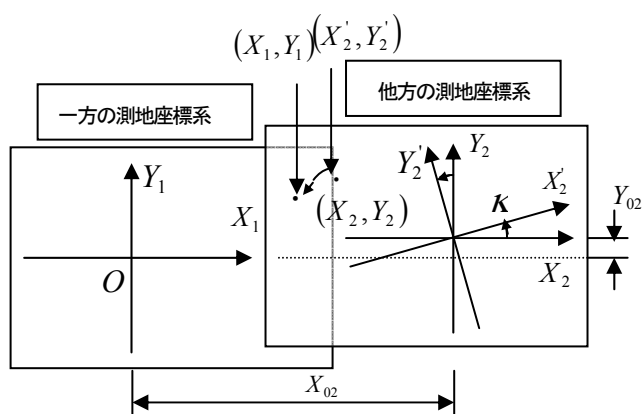


図-4 測地座標系間の座標系の調整

表-3 各カメラと対応する測地座標系間の標定誤差

カメラ間	中等誤差 [m]
1-2	0.482
2-3	0.466
3-4	-
4-5	3.582
5-6	2.523
7-8	0.789
8-9	0.336

表-4 2台のカメラに跨る軌跡の平均較差

カメラ間	平均較差 [m]
1-2	2.797
2-3	4.132
3-4	4.338
4-5	3.371
5-6	2.950
7-8	1.492
8-9	1.614

俯角が小さい程精度が悪化することについては、次のように捉えることも可能である。カメラ4, 6を例にとり画像座標系上での1pixelの空間分解能を図-2, 図-3に示す。図-2および図-3は、ビデオカメラの角度とそれに対応する各ピクセル上の空間分解能を図示したものである。カメラ6に対し俯角の小さいカメラ4は空間分解能も全体的に悪い傾向が見て取れ、特に分解能1mを超える領域が大部分を占めている。このような俯角では分析に支障をきたす可能性がある。

(3)複数カメラ間の座標系の調整

複数カメラ間に跨る車両軌跡データを取得する際にはカメラ座標系間の相互関係が明らかでなければならない。写真測量学に基づけば相互標定によって撮影範囲の隣り合うカメラ間のカメラ座標系を調整するが、本研究においてはカメラ毎に射影変換を施していることから、

既に射影変換された測地座標系相互の関係を求める方法による。ここでは、測地座標系2平面は同一平面上にあると仮定し、図-4に示すように鉛直軸回りの回転角 ω 、および原点の平行移動量 X_{02}, Y_{02} のみ異なっているものとする。双方のカメラに共通に撮像されている不動点を2点以上設定し、隔差が最小となるよう最小2乗法により上記3つの未知量を求める。実際に調整を行なった結果、表-3のような中等誤差が生じている。誤差の大きなカメラ対も存在するが、不動点の精密測量により精度向上の余地は大きいと考えられる。なおカメラ3-4間については、両カメラとも俯角が小さく画像上での基準点読み取り精度が良好でないため、本手法にはよらずレーンマークを読み取り平行移動量を外的に与えている。

(4)ビデオ映像データから測地座標系データへの変換

刻一刻と位置を変える車両の特定にかかわる精度は画像処理ソフトウェアの性能の優劣によっても左右され一般的な議論をすることは困難であるが、座標取得効率の向上およびある程度のオクルージョンに対する頑健性を持つ筆者らの考案した取得方法に基づき検討を行なう。本手法の詳細については文献¹³⁾を参照されたいが、概略を示すと以下の通りになる。

車両が画面端に完全に姿を表した段階でマウスポイントにより車両を囲い、車両を認識させた上で精度の比較的良好な領域から悪い領域にテンプレートを更新しながら追跡していく方法を取る。車両がカメラに向かって進行してくる角度では、ビデオを逆回しするように処理するが、これなどは逆回し再生等が自由に行なえるビデオの特性を活用した画期的な手法といえよう。これによれば多少のオクルージョンに対しても頑健であると考えられる。画面座標系上での車両位置は、車両と路面の輝度差が大きいことに着目し、エッジ抽出に類する方法により行なう。こうして特定された画面上の車両位置座標を2次の射影変換により測地座標平面上の座標に変換する。これによりカメラ1台に撮像されている車両の測地座標系上の軌跡が得られる。

軌跡の接続は、空間的に最も近い軌跡同士を接続することにより行なう。ただし、同一の車両でないにも関わらず誤って接続されることを防ぐため、前後10m以内に隣接する軌跡が存在しない場合接続を行わない。

取得された軌跡そのものの真値は不明であるため、間接的に精度を評価せざるを得ない。したがって、カメラ座標系上の自動車位置の特定に伴う誤差、射影変換に伴う誤差等、種々の誤差の累積として生じる軌跡接続時の平均較差の大きさを評価することとする。カメラ間で異なるものの最大で4.3mとなっており(表-4)、決して良好とは言えないながらも一定の精度を確保している。

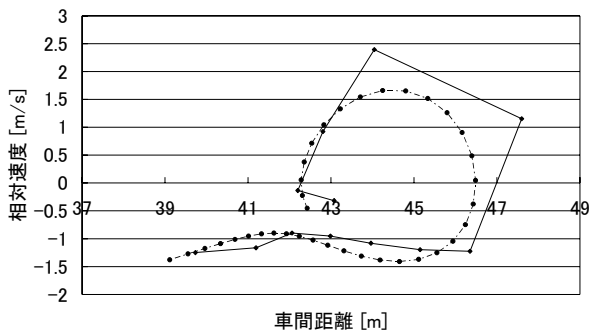
4. 観測された追従挙動とモデル化の方針

前述の結果からは決して良好な精度を保っているとは言えないものの、軌跡接続隔差の比較的良好なカメラ7~9に跨る追従関係にある2台の軌跡対を2組無作為に抽出し、車間距離-相対速度の変化を図-5、図-6に例示する。なおサンプリング周期は1秒である。参考のためカルマンフィルタによるスムージングおよび補間処理を行った軌跡も示している。ここに示す通り、車間距離-相対速度平面上の軌跡は右回りのスパイラル状の曲線を描いている。

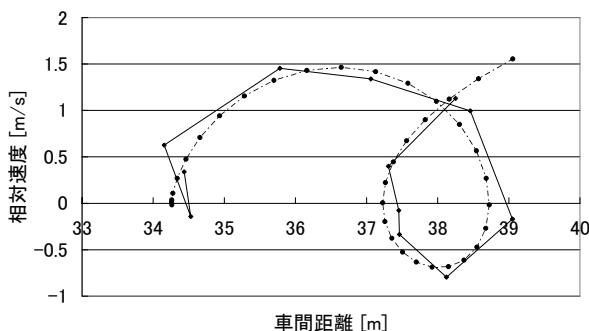
図は割愛するが、スパイラル状の曲線を時間-車間距離平面、時間-相対速度平面に分解するとそれぞれが振動している様子が確認されることから、振動の常微分方程式にて追従挙動を表現することが可能と考えられる。現在モデル化および妥当性の検証を進めている。

5. むすび

本稿で論じた通り、現段階ではカメラ設置位置やアングルの調整による精度の向上の余地は大きいと考えられる。また軌跡そのものの精度評価のためには別のデバイスから取得されたデータを用いなければならないであろう。しかしながら、実際に現地での連続区間撮影およびデータ取得を行わない限りは、実用上の課題も明らかとはならないと考えられ、この点で本稿の取り組みは意義深いものとする。



→ スムージング無 ← スムージング有
図-5 追従挙動の例(1)



→ スムージング無 ← スムージング有
図-6 追従挙動の例(2)

また、精度に問題があり取得されたデータの信頼性は高くはないものの、実際に取得された一般ドライバーの追従挙動を車間距離-相対速度平面上の軌跡として表現すると確かにスパイラル曲線状となっており、今後の追従挙動のモデル化に際して有効な知見と言える。

参考文献

- 1) Gazis, D. C., Herman, R. and Rothery, R. W.: Non-linear Follow-the Leader Models of Traffic Flow, *Operations Research*, Vol.9, pp.545-567, 1961.
- 2) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 3) Xing, J., 越正毅: 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, 第 506 号/IV - 26, pp.45-55, 1995.
- 4) 尾崎晴男: 車両の追従挙動とサグ部の隘路現象, 東京大学博士(工学)論文, 1994.
- 5) Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the Car-Following Behavior, *Proceedings of 12th ISTTT*, pp.45-55, 1995.
- 6) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, 土木学会論文集, 第 660 号/IV - 49, pp.39-51, 2000.
- 7) 中山晴幸, 和田幹彦, 市川孝太郎: スパイラル曲線を用いた交通シミュレーション・モデルの検討, 第 13 回交通工学研究発表会論文集, pp.25-28, 1993.
- 8) 石田貴志, 内山久雄, 中村誠, 野中康弘: 高速道路単路部における追従挙動分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部, Vol.57, pp.435-436, 2002.
- 9) Uchiyama, H., Nakamura, M., Hibino, N. and NONAKA, Y.: A Study on Formulation of Car-Following Behavior as Spiral Curve, *4th International Conference On Road & Airfield Pavement Technology*, pp.1505-1516, 2002.
- 10) 巻上安爾, 坂本破魔雄, 林正親: 航空写真に基づいた交通流解析の手法について, 土木学会論文集, No.347/IV-1, pp.153-162, 1984.
- 11) 赤羽弘和: 複数の高精細度ビデオカメラによる車両軌跡の高精度連続観測システムの開発, 土木計画学シンポジウム, Vol.37, pp.89-96, 2001.
- 12) 赤羽弘和, 畠中聡志: 複数のビデオカメラによる車両走行軌跡の連続観測, 第 2 回 ITS シンポジウム 2003, pp.61-66, 2003.
- 13) 野中康弘, 葛西誠, 内山久雄: 都市間高速道路単路部を対象とした車両挙動観測システムの開発, 第 3 回 ITS シンポジウム 2004, pp.271-276, 2004.