

エリアごとの適応車速制御による高速道路事故渋滞の緩和

相浦 龍青 森野博章
芝浦工業大学 大学院理工学研究科

1. はじめに

交通事故は、高速道路における渋滞の主な原因の一つである。事故場所周辺では道路交通容量が大きく減少しボトルネックとなることに加え、事故が起きた車線の手前を走る車両が強制的に他の車線に車線変更する際に生じる後続車の減速が上流へ伝わって渋滞を悪化させることも少なくない。このようにして生ずる事故渋滞を緩和させる手法として、渋滞車群の後方の車両が意図的に速度を減少させる手法が提案されてきた。今後の普及が見込まれる自動運転車両がこの制御を行えば効果が見込めることから有望なアプローチである。代表的な手法の一つに速度可変制御(VSL)方式がある [1]。VSL は車線減少開始地点の手前の区間を走行する車両に速度を制限させ、渋滞している車群に接近する車両を減らすことで渋滞車群を短くし、渋滞を解消させるものである。しかし従来の研究では、基本的に速度制御を指示する道路区間(以下、速度制御区間)はあらかじめ決まっており、その中で目標速度が適応的に変更されることが前提となっている [2]。もし車線減少位置に応じて速度制御区間の位置を調整できれば、渋滞緩和効果のさらなる向上が期待できる。本研究ではこの目的に沿って適用できる速度制御手法として渋滞吸収運転(JAD)[3]に着目する。JAD は、VSL と同様に、渋滞車群の後方の車両を意図的に目標速度まで減速させる運転方法であるが、VSL と異なり、渋滞車群の位置に応じて、速度制御区間をより細かく決定することができる。JAD に関する過去の研究では速度制御区間を理想的に設定できるという前提でマクロな交通流モデルによる性能解析が行われているが、本研究では路車間通信システム (V2X) によって JAD を実現する方式を提案し、事故渋滞を想定したミクロ的な交通シミュレーションによってその効果を評価する。特に事故地点に合わせた速度制御区間設定が速度改善に及ぼす影響に着目する。

2. システムモデル



図1. システムモデル

図1は提案する制御の、システムモデルである。本システムでは、自動運転車がC-V2X(Cellular V2X)などのセルラー通信により定期的に速度や走行車線をサーバに報告することを想定している。サーバは、収集した車線ごとの車両密度や車線変更などのデータから車線減少開始とその位置を検出する。事故が検知されると、速度制御区間を決定し、その区間を走行する全ての自動運転車に減速を行うよう制御情報を送信する。これを受けた自動運転車は、一定の減速度、 α_{dec} で、予め設定された目標速度 v_{tar} まで速度を落とし始める。

このモデルでは速度制御区間の設定が重要である。事故地点の直前を走る車両が速度制御を行うとしても、この付近では他の車線に変更するためにまず速度を落とすか、あるいは他から移動してくる車両に併せて速度を落とすことが多いためあえて制御を行う意味がない。そのため、事故場所直前は、この点を考慮して決定する。速度制御区間の上流端については、基本的に事故地点から離れている方が性能は向上する。しかし、上流端を事故地点から極端に遠く設定した場合、不必要に速度を落とさなければならぬ車両が出てくるなど、性能向上に寄与しない。

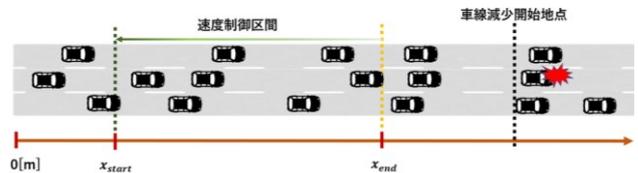


図2. システムモデルの詳細図

そこで、上記を踏まえて速度制御区間を図2に示すように構成する。道路端に0m点を定義し、速度制御区間である x_{start} と x_{end} を適切に設定する。 x_{end} から事故点までの区間では減速制御を行わない。

3. 評価モデル

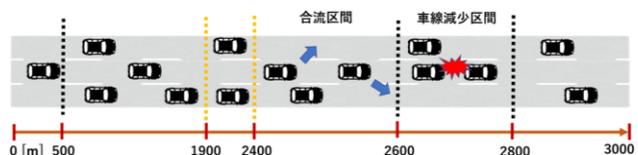


図3. 事故場所直前の車線変更モデル

評価に使用した道路モデルを図3に示す。長さ3000mの3車線で構成され、事故は中央の車線で発生すると仮定する。評価シナリオの経過時間が100[sec]になると、2600[m]地点で事故が発生し、経過時間700[sec]までの間、2600[m]から2800[m]の区間で中央車線が封鎖される。これをボトルネック区間と呼ぶ。事故地点の手前で車線を走行する車両は、速やかに他の車線に移動する必要がある。100[sec]から700[sec]までの間、2400[m]から2600[m]まででこの車線移動の動作が行われるとしてこれを合流区間と定義する。この区間では事故地点が車両から見える距離にあるという想定で中央車線を走行する車両は必ず他の車線に車線変更しようとする。経過時間が700[sec]になると、車線封鎖が終了しボトルネック区間が消滅する。このモデルでは、すべての車両が0m地点からスタートし、その速度と先行車両との車間距離は、米国の交通に関するデータから得られた実データに従って設定されている。本稿で用いるデータは、2020年9月7日、オレゴン州ウィルソンビルの高速道路に設置された車両検知器により、帰宅ラッシュで混雑した平日夕方に収集されたものである。総車両数は1035台で、車両密度は約4000[veh/h]である。最後に発生する車両は900[sec]で走り出す。車追従モデルとしてIDMを用いる。IDMでは0m地点で発進したときの速度が所望の速度に設定される。追越車線（右端）は110~130km/h、中央車線は105~125km/h、左端走行車線は100~120km/hと発車車線によって変化する。

車線変更モデルは自動運転車と手動運転車に共通で、以下の通りに設定する。合流区間では、事故車線を走る車両は等確率で左右のどちらかの車線に移動しようとし、他の車線を走る車両は車線変更をしない。合流区間より手前では、各車両は通常の道路での行動と同様に車両速度が向上すると見込まれる場合のみ車線変更を行う。高速道路では、走行車線から追越車線にかけて車両密度が高くなる傾向があることが知られている。今回の評価で用いた車両データでは、3つのレーンそれぞれを走る車の割合は、左端レーンから右端レーンにかけて、およそ4:3:2であることがわかる。このため、事故地点を除く道路全域でこの比率が維持されるように、各車両の車線変更確率を設定した。

速度制御は経過時間100[sec]から開始される。事故検知と制御メッセージの発表の遅延は無視できる程度とする。JADのパラメータは、目標速度 $v_{tar}=60$ [km/h]、減速度 $\alpha_{dec}=0.4$ [m/s²]である。また、自動運転車の比率（普及率）は30%とした。

次の章では、速度制御区間の x_{start} と x_{end} の値の組を変化させて、事故地点手前の区間における平均速度などの性能を評価する。

4. 性能評価

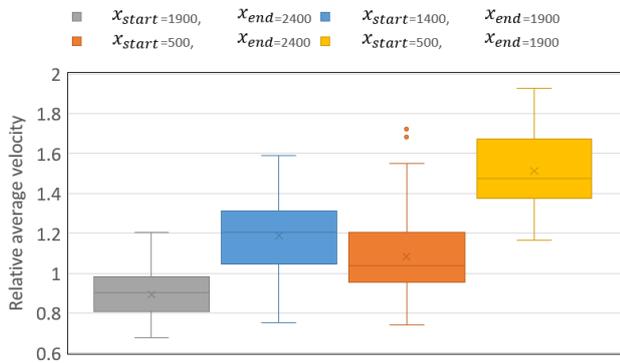


図4 速度制御区間を変化させた場合の平均車両速度特性 (制御を行わない場合での速度を1とした相対値)

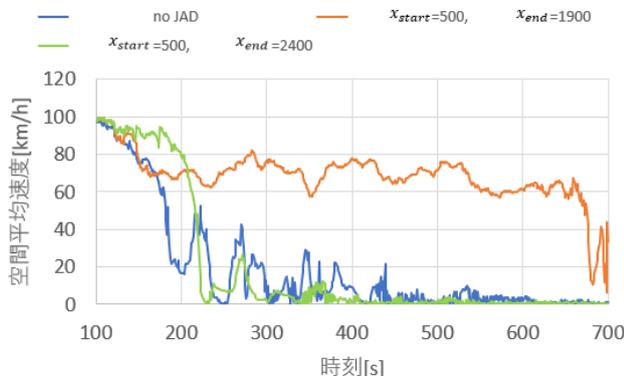


図5 事故場所直前(2000~2500m)を走行する車両の空間平均速度特性

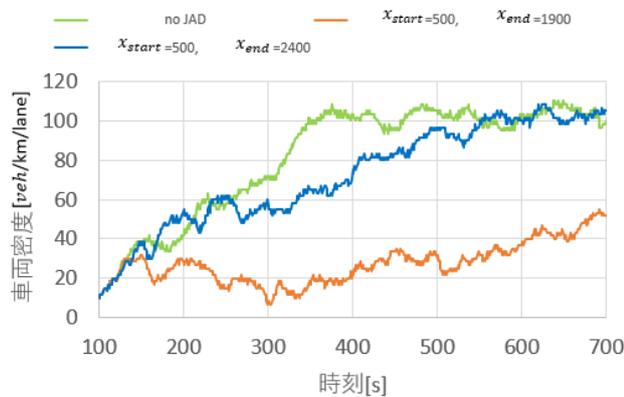


図6 合流区間(2400~2600m)の車両密度特性

図4は、合流区間手前である0m地点から2400m地点までの道路区間における提案方式での車両の平均速度を示している。 x_{start} と x_{end} の組は4つ用意した。縦軸は、速度制御を行わない場合の同じ車両の速度に対する各車両の相対的な速度を表している。シミュレーション結果は、道路を走る自動運転車同士の相対位置によって大きく異なるため、パラメータ値のセットごとに異なるランダムシードを用いて44回のシミュレーションを行い、得られた相対平均速度値を箱ひげ図に示す。

その結果、 $x_{start} = 500[m]$ の場合は $x_{start} = 1400[m]$ よりも性能が良く、 $x_{end} = 1900[m]$ の場合は $x_{end} = 2400[m]$ よりも性能が良いことが分かる。その結果、 $(x_{start}, x_{end}) = (500, 1900)$ の場合が最も良い結果となり、速度制御を行わない場合に比べ、平均で約

50%の速度が改善されることがわかった。これらの結果をより深く検討するために、図5に2000~2500mの事故場所直前の区間における空間平均速度の時間変化を示し、これを $v_{average}$ と表記する。速度制御を行わない場合、この区間では、200[sec]付近で合流区間が混雑し始め、その結果、 $v_{average}$ も急激に低下する。JADを $(x_{start}, x_{end}) = (500, 1900)$ の設定で使用すると、 $v_{average}$ が低下する時間は650[sec]と遅く、またそれまでは平均約70km/hで走行していることが分かる。これは、 $(x_{start}, x_{end}) = (500, 2400)$ の構成の結果よりも良好である。

図6は2400~2600mの合流区間の車両密度推移を表したものであり、 $(x_{start}, x_{end}) = (500, 1900)$ では事故が発生している100[sec]から700[sec]までの間は速度制御を行わないものや、非速度制御区間を設けないものに比べて車両密度が小さくなっていることが分かる。これら図5, 6から、ボトルネック直前の区間を走行する車両数が少ないと空間平均速度が良くなることが分かる。以上の図4~図6の結果から、非速度制御区間を設けると事故場所直前の車両数が少なくなり、その区間の空間平均速度が改善することも示せた。これは車両数が少ないので事故車線を走行している車両が車線変更をしやすい環境を作れており、それが最終的に交通流の回復につながっていると考えている。

5. まとめと今後の課題

本論文では、事故の時の交通渋滞を緩和するために、V2Xによる情報共有を前提とした渋滞吸収運転に基づく速度制御を実現する方式を提案した。速度制御区間の設定方法について交通流シミュレーションにより評価した結果、車線減少開始地点の直前では非速度制御区間を設ける方がより効果的に車両速度を改善できることが分かった。

今後は、交通量の異なる複数の条件での速度制御区間の最適な構成、JADを行う自動運転車の普及率に対する性能依存性を検討する必要がある。

また別の観点から、協調的な車線変更制御による事故渋滞の緩和も提案されている[4]。本論文で提案した速度制御と車線変更制御の併用が有効かどうか検討する予定である。

6. 参考文献

- [1] D. Chen and S. Ahn, "Variable speed limit control for severe non-recurrent freeway bottlenecks", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 51, pp. 210-230, February 2015.
- [2] Zhang, Y. and Ioannou, P. A., "Combined variable speed limit and lane change control for highway traffic." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1812, July 2017.
- [3] Y. Taniguchi, R. Nishi, T. Ezaki and K. Nishinari, "Jam-absorption driving with a car-following model", *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, vol. 433, pp. 304-315, September 2015.
- [4] D. Xiaoping, L. Dongxin, L. Shen, W. Qiqige and C. Wenbo, "Coordinated control algorithm at non-recurrent freeway bottlenecks for intelligent and connected vehicles", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 51621-51633, March 2020.