ジャーク一定減速を想定した列車運転士のブレーキ操作支援システム*

丸茂 喜高^{*1}, 佐藤 洋康^{*2}, 綱島 均^{*1}, 小島 崇^{*3}

Braking Assistance System for Train Drivers by Considering Deceleration with Constant Jerk

Yoshitaka MARUMO^{*1}, Hiroyasu SATO, Hitoshi TSUNASHIMA and Takashi KOJIMA^{*1} College of Industrial Technology, Nihon University
1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275-8575, Japan

This study examines the braking assistance system for train drivers when stopping at a station to prevent the drivers from overrunning. The conventional assistance system informed the driver visually of a predicted stopping position based on present vehicle velocity and deceleration. The driver with the conventional assistance system made the vehicle stop with large deceleration because the conventional assistance system calculated the predicted stopping position by considering the constant deceleration. The assistance system this study proposes considers the deceleration with constant jerk, i.e. the deceleration gradually decreases. Train-driving simulator experiments are examined with several subjects who are required train driving with the mental calculation which assumes the mental workload. Subjects with the proposed assistance system can operate the brake handle smoothly, and make the vehicle stop with small deceleration. Subjects with the conventional assistance system, on the other hand, cannot release the brake handle, and make the vehicle stop with large deceleration.

Key Words : Driver Assist, Active Safety, Maneuverability, Human Interface, Man-Machine System, Train Driver, Braking Behavior, Mental Workload

1. 緒 論

鉄道輸送は、自動車と比較して地球環境への負荷が低い反面、一度に多くの人員を輸送する性質上、より一層の安全性が求められる。最近発生した脱線事故に着目すると、運転士の運転以外への注意により生じた速度超過によるものなどのヒューマンエラーに起因する部分が多い^{(1), (2)}。列車運転におけるヒューマンエラーをバックアップするシステムとして、自動列車停止装置 (ATS) などがあげられる。これらの装置により、ヒューマンエラーが発生した場合でも、事故を未然に防ぐことができる。しかし、ATS が作動しないような軽微なオーバーランは、それ自体直接事故を引き起こすものではないが、停止位置を修正することによるダイヤの遅れやオーバーランした事実が運転士のプレッシャーとなり、重大な事故を引き起こす要因となる可能性が考えられる⁽²⁾。

そこで筆者らは、駅停止時に簡便にオーバーランを防止するための運転支援システムについて、運転シミュレータ実験により検討した⁽³⁾。このシステムは、図 1 に示すように、駅停止時に運転士に対して、現在の減速度を維持した際に予想される停止位置を視覚的に呈示して、ブレーキ操作の支援を行うものである。その際、予想停止位置が目標停止位置の手前の場合には緑色、目標停止位置を超えてオーバーランする場合には赤色で呈示することにより、予想停止位置の認知の支援に加えて、ブレーキ操作の判断の支援も行う。運転シミュレータ実験により、運転支援システムを用いることでブレーキ操作が円滑に行われることを確認した⁽³⁾。

しかし、このシステムでは、予想停止位置の計算において等加速度運動を想定しているが、実際のブレーキ操

* 原稿受付 2012 年 2 月 7 日

^{*1} 正員, 日本大学生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)^{*2} 日本大学大学院 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)^{*3} 正員, 鉄道総合技術研究所車両構造技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: marumo.yoshitaka@nihon-u.ac.jp

作では、乗客の乗り心地等の関係から、目標とする停止位置に近づくにつれ、徐々にブレーキを緩めて停止することが一般的である。そのような操作は運転士に委ねられており、運転支援システムによりブレーキ操作は円滑になったものの、停止時に比較的強い減速度で停止する場面が見られた。そこで本研究では、減速度が一定で減少する条件を考慮して、ブレーキを緩めながら停止する支援を行い、その効果について運転シミュレータ実験により検討する。

Fig. 1 Image of predicted stopping position

2. ジャーク一定減速を想定した予想停止位置呈示

本研究では、段階的にブレーキを緩める減速をジャーク（加々速度）一定で減速度が減少するものと仮定する。予想停止位置の算出方法は、従来と同様に等加速度運動を想定し、従来予想停止位置が緑色で呈示されていた領域、すなわち目標停止位置よりも手前の状態であっても、ジャーク一定で減速度を減少させて停止できない場合には、予想停止位置を黄色で呈示するものとする。

ここで、黄色で呈示する領域を定義するために、減速度一定で減速する場合とジャーク一定で減速する場合の車両の停止距離について考える。計算過程の詳細は末尾の付録に記載されているが、いずれの条件も初期値は、速度 $v(0) = v_0$ 、加速度 $a(0) = a_0$ （ただし、 $a_0 < 0$ ）とすると、減速度一定で減速する場合の停止距離 d_a は以下のようになる。

$$d_a = -\frac{v_0^2}{2a_0} \quad (1)$$

また、ジャーク一定で減速する場合の停止距離 d_j は、停止時の減速度を 0 とおくことにより、ジャークの値によらず以下のように表すことができる。

$$d_j = -\frac{2v_0^2}{3a_0} \quad (2)$$

減速度一定の場合の停止距離に対するジャーク一定減速時の停止距離の比は

$$\frac{d_j}{d_a} = \frac{-\frac{2v_0^2}{3a_0}}{-\frac{v_0^2}{2a_0}} = \frac{4}{3} \quad (3)$$

となり、ジャーク一定減速の場合の方が、停止に要する距離が長くなることがわかる。

この関係から、予想される停止位置の領域を定義する。図2に予想停止位置呈示の模式図を示す。ここで、車両はジャーク一定で減速し、目標停止位置に停止するものとし、停止時には速度および減速度は0になると仮定すると、目標停止位置までの距離は d_j で算出できる。しかし、予想停止位置の計算は、現在の減速度が一定と仮定しているため、このときの予想停止位置までの距離は d_a となる。予想停止位置までの距離が d_a よりも手前にある場合には、ジャーク一定でブレーキを緩めて目標停止位置に停止することができる。しかし、予想停止位置までの距離が d_a よりも奥の場合には、たとえ目標停止位置よりも手前、すなわち従来のシステムでは緑色で呈示される領域であっても、ジャーク一定でブレーキを緩めて停止しようとした場合には目標停止位置を超えて停止することになる。そこで、予想停止位置までの距離が d_a よりも手前の場合には、予想停止位置の枠の色を緑色で呈示し、 d_a より奥で目標停止位置よりも手前の場合には黄色で呈示する。予想停止位置が目標停止位置を超える場合には、従来通り赤色で呈示するものとする。

Fig. 2 Schematic diagram of predicted stopping position

3. 実験方法

本研究では、列車の運転を模擬した列車運転シミュレータ⁽⁴⁾（以下、シミュレータという）を用いて行った。図3にシミュレータの外観を示す。このシミュレータは、定置型であるため、加速度などの体感情報は得られないが、2台のプロジェクタを用いることによって被験者が偏光眼鏡を着用することで立体視による前方視界を生成していることを特徴としている。

被験者は、運転資格はないが、シミュレータの運転になれた20代男性5名（被験者A～E）で行った。なお、実験実施前には実験の趣旨説明とあわせてインフォームドコンセントを行った。

運転課題は、実路線を模擬した4駅間（それぞれの駅間を第1区間から第3区間とする）を運転し、各駅にある目標停止位置に列車を停止させるものとした。列車の速度は、実路線の規定速度として、本走行を行う前に十分な練習走行を行った。

ヒューマンエラーは、運転士に心的負荷がかかっている状況で発生しやすいことから、副次課題として、心的負荷を想定した暗算課題を被験者に課した。暗算課題は、3秒毎に音声で呈示される1桁の数字に対して、新たに呈示された数字を足し合わせて、1の位を回答するもの⁽⁵⁾であり、自動車運転時の副次課題としても採用されている⁽⁶⁾。この暗算課題を、駅を発車して加速が終了後、惰性走行に入ってから駅停止までの間、被験者に課した。運転課題と暗算課題の優先順位については、列車を所定の位置に停車させることを第一優先とした上で、可能な限り暗算課題に回答することとした。

各被験者は、従来の運転支援システムと本研究で提案した支援システムの2条件について、それぞれ2走行ずつ行った。

Fig. 3 Overview of train-driving simulator

4. 実験結果

各システムを用いた場合の副次課題の正答率を確認したところ、すべての区間において、平均値は 60%~80% 程度であり、本研究で提案した支援システムの方が、従来のシステムと比較して高く、第 1 区間および第 3 区間でそれぞれ 5%未満および 10%未満の危険率で有意差が確認された。しかし、これらの差は提案した支援システムの条件において、主課題である運転操作に対するリソースを低減していることが考えられるため、提案したシステムの効果が有利になる傾向にはないといえる。また、提案した支援システムを用いることで、結果として正答率が上がったことも考えられるので、以下では、運転行動や車両状態の比較により議論を進めることにする。

4・1 予想停止位置とハンドル操作の推移

駅停止時における、運転士の認知と操作に関係する指標として、現在の減速度を維持した場合の予想停止位置とブレーキ操作の推移について検討する。ここでは、一例として、被験者 A の第 2 区間の結果について示す。

図 4 に目標停止位置までの距離に対する予想停止位置の推移を示す。横軸は目標停止位置までの距離を示しており、目標停止位置の手前を負とした。縦軸は予想停止位置であり、目標停止位置を 0 とし、現在の減速度を維持すると目標停止位置を超えて停止する場合を正、手前で停止する場合を負とした。実線は本研究で提案した、ジャーク一定減速を想定した支援システムを用いた場合、破線は従来の減速度一定を想定した支援システムを用いた場合の結果を示している。点線は予想停止位置および目標停止位置までの距離の比が 3:4 である境界を示しており、本研究で提案したシステムを用いた場合、予想停止位置の値が 0 と点線の領域では、予想停止位置は黄色で呈示される。この図より、従来の支援システムを用いた場合では、減速を開始した直後において、予想停止位置は負の値を推移しているが、-40m 付近で予想停止位置が目標停止位置付近を推移し、余裕がない状態で目標停止位置へ停止している。しかし、本研究で提案した支援システムでは、予想停止位置は、目標停止位置へ負の値から徐々に推移しており、点線で示した境界線付近を推移して停止していることがわかる。

次に、目標停止位置までの距離に対するブレーキ操作の推移を図 5 に示す。横軸は目標停止位置までの距離を示している。縦軸はブレーキ操作を示しており、数値が高くなるほど強いブレーキがかかることになる。常用ブレーキが 1~7 で、非常ブレーキが 8 に対応している。この図より、従来の支援システムを用いた場合には、ブレーキを段階的に緩めてはいるが、-40m 付近でブレーキを緩めたことにより、予想停止位置が目標停止位置付近を推移してしまい、ブレーキを緩める余裕がなくなり、目標停止位置付近まで比較的強いブレーキで停止している。一方、本研究で提案した支援システムを用いた場合には、段階的にブレーキを緩めながら、弱いブレーキ操作で停止していることが確認できる。

Fig. 4 Transition of predicted stopping position (Subject A, Section 2)

Fig. 5 Transition of brake handle position (Subject A, Section 2)

4・2 他の条件における結果

前節とは異なる条件での結果を確認するために、前節と同じ被験者の異なる区間、および前節と同じ区間の異なる被験者の結果について検討する。

前節と同じ被験者の異なる区間である第1区間の予想停止位置とブレーキ操作の結果をそれぞれ図6および図7に示す。図6に示した予想停止位置の推移では、第2区間ほど顕著な差は見られないが、本研究で提案した支援システムの方が、予想停止位置は目標停止位置に対して手前側を推移して、比較的余裕を持っている状況であることがわかる。図7のブレーキ操作の推移でも、顕著な差は確認できないが、目標停止位置に近づくにつれて、目標停止位置までの距離に対して、従来の支援システムの方が大きなブレーキ操作になっていることが確認できる。

Fig. 6 Transition of predicted stopping position (Subject A, Section 1)

Fig. 7 Transition of brake handle position (Subject A, Section 1)

次に、前節と同じ区間において、異なる被験者である被験者 B の結果を図 8 および図 9 に示す。図 8 に示した予想停止位置の推移に着目すると、被験者 A と同様に、従来の支援システムを用いた場合では、 -40m 付近で予想停止位置が目標停止位置付近を推移し、余裕がない状態で目標停止位置へ停止している。しかし、本研究で提案した支援システムでは、予想停止位置は、目標停止位置へ負の値から徐々に推移しており、点線で示した境界線付近を推移しながら目標停止位置に近づいていることがわかる。図 9 に示したブレーキ操作の推移も同様に、従来の支援システムを用いた場合には、 -40m 付近でブレーキを緩めたことにより、予想停止位置が目標停止位置付近を推移してしまい、比較的強いブレーキで目標停止位置に近づいていることがわかる。本研究で提案した支援システムを用いた場合には、ブレーキを徐々に緩め、弱いブレーキ操作で停止していることが確認できる。

その他、上記以外の被験者においても、本研究で提案した支援システムを用いた場合には、予想停止位置は負の値から徐々に目標停止位置へ推移し、弱いブレーキ操作で停止することが確認された。一方、従来の支援システムを用いた場合には、本研究で提案したシステムを用いた場合のように推移する傾向も見られたが、予想停止位置が目標予想位置に近い値を推移することがあり、その結果ブレーキ操作を緩めることができず、停止時に比較的強いブレーキ操作で停止する場面が見られた。

Fig. 8 Transition of predicted stopping position (Subject B, Section 2)

Fig. 9 Transition of brake handle position (Subject B, Section 2)

4・3 停止直前の減速度の評価

これまでに確認された停止時の状態を定量的に評価する。ブレーキ操作に着目すると、停止直前でブレーキを緩めても減速度が減少しきらない場合があるため、停止直前の減速度を評価するものとする。停止の寸前では、シミュレータ内で計算されている車両の動特性により、減速度によらず減速度が一端上昇するため、停止 1s 前の減速度について着目する。

図 10 に停止 1s 前の減速度の平均値を示す。同図には被験者 5 名が 2 走行した計 10 走行分の結果が示されている。この図より、本研究で提案した支援システムを用いた場合には、従来の支援システムを用いた場合と比較して、どの区間においても減速度の平均値が低くなっている。また、標準偏差に着目すると、前節で述べたように、従来のシステムでも弱い減速度で停止する場面も確認されたが、比較的強い減速度で停止する場面も見られたため、その結果、標準偏差が大きくなっていることがわかる。一方、本研究で提案したシステムでは、標準偏差が小さくなっていることから、停止直前の減速度を再現性良く抑えられていることが確認できる。本研究で提案したシステムが、従来のシステムに対して停止直前の減速度を低減させるという仮説のもとで、計 10 走行分のデータについて、被験者と走行回数で対応のある t 検定を行ったところ、すべての区間において危険率 5% 未満で有意な差が確認された。よって、本研究で提案したシステムが、停止直前の減速度を抑えることに有効であることが示された。

Fig. 10 Deceleration before stopping

5. 結 論

本研究では、駅停止時に予想される停止位置を運転士に視覚的に呈示し、予想される位置により呈示する色を変化させること、所定の位置にブレーキを緩めながら停止する支援システムについて、列車運転シミュレータを用いた実験により検討した結果、以下の結論を得た。

1. 従来の減速度一定を想定した支援システムを用いた場合には、ブレーキ操作の修正等は見られなかったものの、比較的強い減速度で停止する場面が確認された。一方、本研究で提案したジャーク一定減速を想定した支援システムを用いることで、段階的にブレーキを緩め、停止時に弱い減速度で停止することが可能となった。
2. 停止直前の減速度に着目したところ、提案した支援システムを用いることで、全区間において減速度が有意に低減することが確認され、本研究で提案した支援システムの有効性が確認できた。

なお、本研究では、副次課題の正答率のみしか議論は行わなかったが、副次課題が主課題である運転操作に及ぼす影響について、心的な負荷と負担は異なるものであり、支援システムの効果を詳細に議論する上では、メンタルワークロード^{(7),(8)}の観点から検討することが重要であるといえる。

また、主課題である運転操作において、運行ダイヤのような時間的制約は設けなかったが、提案するシステムのようにブレーキを緩めるような支援を行った場合には、一部の区間で運転時分が有意に延びる傾向が確認された。さらに、いずれのシステムであっても、ブレーキ操作が遅れた場合には、そもそもオーバーランを防止することが難しいことから、今後は運転時分も考慮して、適切なブレーキ開始タイミングを呈示する支援についても検討する予定である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費若手研究(B)21710171「列車運転士の認知・判断支援によるオーバーラン抑制」の補助を受けた。記して謝意を示す。

付 録

ジャーク一定で減速する場合と、減速度一定で減速する場合の車両の停止距離の計算過程を示す。ジャーク一定および減速度一定で減速する場合の加速度、速度および位置の時間応答を図 A1 に示す。実線がジャーク一定で減速する場合、破線が減速度一定で減速する場合の応答である。いずれの条件も初期値は、速度 $v(0) = v_0$ 、加

速度 $a(0) = a_0$ (ただし, $a_0 < 0$) であり, ジャーク一定条件では, ジャーク $j(0) = j_0$ とした. 停止までに要する時間は, 減速度一定およびジャーク一定の場合をそれぞれ t_a および t_j として, 停止時には, 減速度一定で停止する場合には, $a(t_a) = a_0$, ジャーク一定で減速する場合には, $a(t_j) = 0$, $j(t_j) = j_0$ になるものとする.

Fig. A1 Time history with constant jerk and deceleration

まず, 減速度が一定で減速する場合には, 図 A1(a)に示したように, 加速度は常に a_0 であるため, 図 A1(b)の速度の応答は

$$v(t) = a_0 t + v_0 \quad (\text{A1})$$

と表され, $v(t_a) = 0$ であるので,

$$t_a = -\frac{v_0}{a_0} \quad (\text{A2})$$

となる. このときの車両位置は図 A1(c)のように推移し, 停止に要する距離を d_a とすると, 次式のようになり, 式(1)が導かれる.

$$d_a = \int_0^{t_a} v(t) dt = \int_0^{t_a} (a_0 t + v_0) dt = \left[\frac{1}{2} a_0 t^2 + v_0 t \right]_0^{t_a} = -\frac{v_0^2}{2a_0} \quad (\text{A3})$$

次に, ジャークが一定で減速する場合には, 図 A1(a)に示した加速度の傾きが j_0 であるので, 加速度の応答は,

$$a(t) = j_0 t + a_0 \quad (\text{A4})$$

と表され, $a(t_j) = 0$ であるので,

$$j_0 = -\frac{a_0}{t_j} \quad (\text{A5})$$

となる。また、図 A1(b)の速度の応答は放物線となり、次式で表すことができる。

$$v(t) = \frac{1}{2} j_0 t^2 + a_0 t + v_0 \quad (\text{A6})$$

$v(t_j) = 0$ であるので、式(A5)より j_0 を消去すると、

$$t_j = -\frac{2v_0}{a_0} \quad (\text{A7})$$

となる。このときの車両位置は図 A1(c)のように推移し、停止に要する距離を d_j とすると、次式のようになり、式(2)が導かれる。

$$d_j = \int_0^{t_j} v(t) dt = \int_0^{t_j} \left(\frac{1}{2} j_0 t^2 + a_0 t + v_0 \right) dt = \left[\frac{1}{6} j_0 t^3 + \frac{1}{2} a_0 t^2 + v_0 t \right]_0^{t_j} = -\frac{2v_0^2}{3a_0} \quad (\text{A8})$$

文 献

- (1) 四ノ宮章, “鉄道安全へのヒューマンファクター研究の取り組み”, 信頼性, Vol. 23, No. 2 (2001), pp.186-193.
- (2) 航空・鉄道事故調査委員会, “鉄道事故調査報告書 西日本旅客鉄道株式会社福知山線塚口駅～尼崎駅間列車脱線事故”, RA2007-3-1, (2007).
- (3) 丸茂喜高, 佐藤洋康, 綱島均, 小島崇, “列車運転士の駅停止支援システムに関する研究 (予想停止位置呈示による運転士の認知・判断支援)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 770 (2010), pp.2500-2507.
- (4) 小島崇, 綱島均, 塩沢友規, 高田宗樹, “人間―機械系評価用列車運転シミュレータの開発と脳機能計測への適用”, 信頼性, Vol. 26, No. 7 (2004), pp.617-626.
- (5) Gronwall, D. M., “Paced Auditory Serial-Addition Task: A Measure of Recovery from Concussion”, *Perceptual and Motor Skills*, Vol.44, No.2 (1977), pp.367-373.
- (6) 例えば, 鈴木桂輔, 岡田雄太, “指尖脈波のゆらぎ解析によるドライバの心理状態の推定”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 743 (2008), pp. 1765-1774.
- (7) 芳賀繁, “メンタルワークロードの測定と注意リソースの測定”, 人間工学, Vol. 29, No. 6 (1993), pp. 349-352.
- (8) 芳賀繁, “ワークロード”, 産業・組織心理学研究, Vol. 10, No. 2 (1997), pp. 111-119.