

ジャーク一定減速を想定したブレーキ操作支援システム

正 [機] 丸茂 喜高 (日大)

学 [機] ○佐藤 洋康 (日大)

正 [機] 綱島 均 (日大)

正 [機] 小島 崇 (鉄道総研)

Braking Assistance System Considering Deceleration with Constant Jerk

Yoshitaka MARUMO, Nihon Univ., 1-2-1 Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba

Hiroyasu SATO, Nihon Univ.

Hitoshi TSUNASHIMA, Nihon Univ.

Takashi KOJIMA, RTRI, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

This study examines the braking assistance system for train drivers when stopping at a station to prevent an overrun. The assistance system informs a driver visually of a predicted stopping position based on present vehicle velocity and deceleration. This assistance system makes the driver aware not only the predicted stopping position, but also the appropriate braking operation. Train-driving simulator experiments are examined with two subjects who are required train driving with the mental calculation which assumes the mental workload. The subjects with the assistance system can operate the brake handle smoothly and make the vehicle stop with small deceleration.

Keywords: Train Driver, Overrun, Braking Assistance System, Braking Behavior, Mental Workload

1. 緒言

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。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: Automatic Train Stop) 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、それ自体は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。

軽微なオーバーランそのものを防止するシステムとしては、定位置停止支援装置 (TASC) や自動列車運転装置 (ATO) などが挙げられるが、導入するには車両側および軌道側の設備などで多額の費用がかかり、システムが複雑という問題点がある。

そこで筆者らは、簡便に駅停止時にオーバーランを防止するための運転支援システムを開発した。この支援システムは、図 1 のように、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で停止する場合には緑色、目標停止位置を越えてオーバーランする場合には赤色で呈示することで、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も支援する。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の操作が円滑に行われるこ

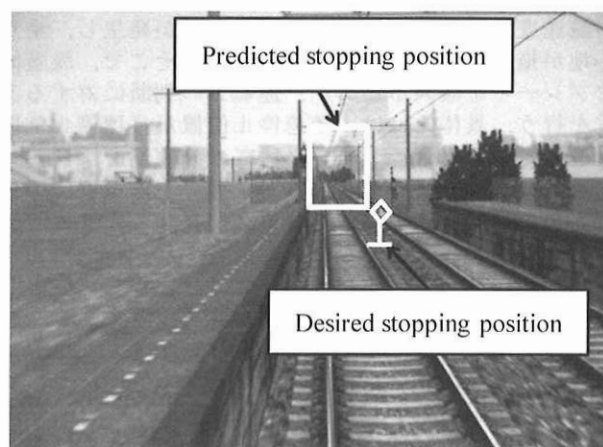


Fig1. Image of predicted stopping position

とを確認したり。

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付くにつれ、徐々にブレーキを緩めて停止することが一般的である。そこで本研究では、予想停止位置の算出方法はそのまま、減速度が一定で減少する条件を考慮して、従来緑色で呈示されていた領域、すなわち目標停止位置の手前で停止できる領域であるが、減速度が弱められない領域を黄色で呈示するシステムを提案し、その効果についてシミュレータ実験により検討する。

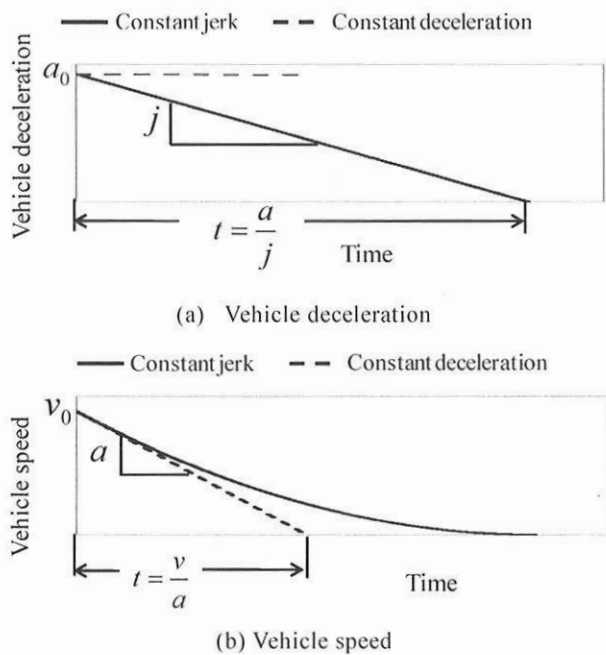


Fig.2 Time history with constant jerk and deceleration

2. ジャーク一定減速を想定した予想停止位置呈示

従来の支援システムでは、一定の減速度で減速することを想定し、予想される停止位置を運転士に呈示していた。しかし、一般的な運転では徐々にブレーキを緩めて減速している。そのような段階的にブレーキを緩める操作は運転士に委ねられている。そのため、強い減速度で停止してしまうと強い衝撃が発生し、乗り心地が損なわれることが考えられる。そこで、段階的にブレーキを緩めるために、運転士の判断に対する支援を行う。具体的には、予想停止位置が目標停止位置を越えている場合、つまり、現在の減速度を維持するとオーバーランする場合には、予想停止位置の枠の色は赤色で運転士に呈示する。また、ブレーキを段階的に緩めて停止することが可能な場合には、予想停止位置は緑色、さらに、予想停止位置は目標停止位置よりも手前だが、段階的にブレーキを緩めると、オーバーランする場合には、予想停止位置は黄色で呈示する。これにより、段階的にブレーキを緩める判断を支援することが可能である。

ここでは、段階的にブレーキを緩めることを想定したジャーク一定減速の場合と、これまでの予想停止位置の算出で仮定した、一定の減速度で減速する場合の車両の停止距離について考える。

図 2 に、ジャーク一定および減速度一定で減速する場合の減速度と速度の時間応答を示す。時間 $t=0$ の時には速度 v 、減速度 a であり、いずれの条件も、最終的に車両は目標停止位置に停止し、停止時には速度は 0 になるものとした。さらにジャーク一定の条件では、停止時に減速度は 0 とする。図 2(a) の減速度の応答では、減速度が一定で減速する場合の減速度は常に a である。ジャークが一定で減速する場合は、減速度の傾きを j とすると、停止までの時間は $t = a/j$ となる。図 2(b) の速度の応答では、減速度が一定で減速する場合には、速度の傾きが a 、停止までの時間は $t = v/a$ となる。また、ジャークが一定で減速する場合には、速度の時間応答は放物線となる。

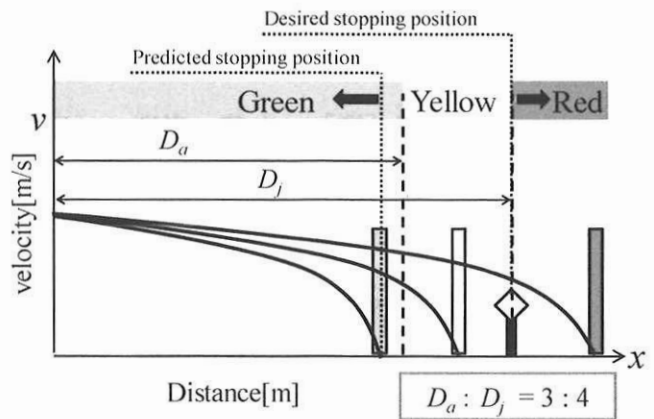


Fig. 3 Schematic diagram of predicted stopping position

減速度が一定の場合の停止距離は図 2(b) の破線部分の積分で計算することができるため、このときの停止距離を D_a とすると、以下ようになる。

$$D_a = \int_0^v v dt = \int_0^v a t dt = \left[\frac{1}{2} a t^2 \right]_0^v = \frac{v^2}{2a} \quad (1)$$

次に、ジャーク一定減速の場合には、図 2(a) の実線部分の積分で計算することができるので、このときの速度は次式で表すことができる。

$$v = \int_0^a a dt = \int_0^a j t dt = \left[\frac{1}{2} j t^2 \right]_0^a = \frac{a^2}{2j} \quad (2)$$

ジャーク一定減速の場合の停止距離 D_j は図 2(b) の実線部分の積分で計算できるので、(2) 式で計算したジャーク一定減速の場合の速度を用いて積分すると以下ようになる。

$$D_j = \int_0^a v dt = \int_0^a \frac{1}{2} j t^2 dt = \left[\frac{1}{6} j t^3 \right]_0^a = \frac{a^3}{6j^2} = \frac{2v^2}{3a} \quad (3)$$

(1) 式は、一定の減速度で減速した場合の停止距離を示しており、(3) 式は、ジャーク一定で減速した場合の停止距離を示している。これらの比はジャークの値に関係なく $D_a:D_j=3:4$ となる。この関係を用いて、予想停止位置の算出方法はそのまま、減速度が一定で減少する条件を考慮して、従来緑色で呈示されていた領域の中で、目標停止位置の手前で停止できるが、減速度を一定で弱められない領域を黄色で呈示する。

図 3 に支援システムの模式図を示す。このとき、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は D_a となる。予想停止位置が 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、予想停止位置が、 D_a よりも奥の場合には、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、予想停止位置が D_a よりも手前の場合、すなわち、段階的にブレーキを緩めて

目標停止位置に停止できる場合には、予想停止位置の枠の色を緑色で表示する。また、 D_a より奥で目標停止位置よりも手前の場合、すなわち、段階的にブレーキを緩めて目標停止位置に停止できない場合には、黄色で表示する。さらに、予想停止位置が目標停止位置を超える場合、つまり、現在の減速度を維持した場合にオーバーランする場合には、予想停止位置の枠の色は赤色で表示する。このように予想停止位置の枠の色を表示することにより、目標停止位置に対して段階的にブレーキを緩める、判断の支援を行う事が可能である。

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²⁾を用いて実験を行なった。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台のプロジェクトによって立体視による前方視界の映像を生成していることを特徴としている。

被験者は、運転資格はないが運転シミュレータの運転になれた 20 代男性 2 名 (被験者 A, B) で行なった。運転課題は、実路線を模擬した 4 駅の間 (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するものである。列車速度は、実路線の規定速度とした。

運転中の心的負荷を想定して暗算課題 (3 秒毎に音声で表示される 1 桁の数字に対して、新たに表示された数字を足し合わせて、一の位を回答する) を行うものとした。実験では、列車が規定速度に達し、惰性走行を始めた時点で暗算課題を開始し、次の駅に停止した際に終了とした。

4. 実験結果

4.1 予想停止位置とハンドル操作

駅停止時における、運転士の認知と操作に係る指標として、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。図 5, 6 に、一例として、被験者 A の第 1 区間の結果について示す。

図 5 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、目標停止位置をゼロとし、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は負とした。実線は提案する支援システムを用いた場合、破線は従来の支援システムを用いた場合の結果を示す。点線は予想停止位置と目標停止位置の比が 3:4 である境界を示しており、予想停止位置の値が 0 と点線の間で推移する場合には、予想停止位置は黄色で表示される。この図より、従来の支援システムを用いた場合では、予想停止位置が負の値から徐々に目標停止位置へ推移しているが、-150m 付近から予想停止位置が目標停止位置付近を推移し、ブレーキを緩めることができない場面がみられた。しかし、提案する支援システムでは、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、また、予想停止位置の枠の色が黄色と緑色の境界線である点線部分の付近を推移している。

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 6 に示す。横軸は予想停止位置の推移の図と同様に、目標停止位置までの距離を示している。縦軸はハンドル操作を表しており、この数値が高くなる

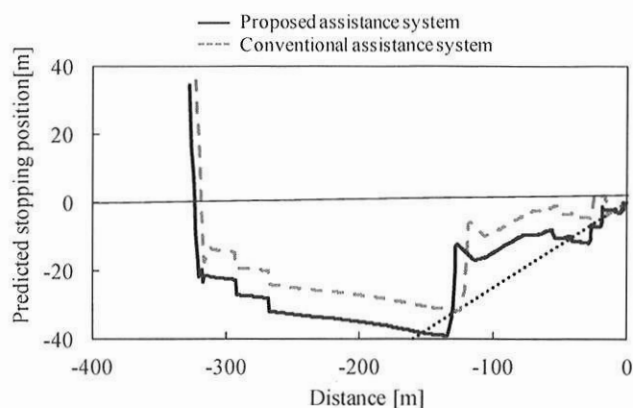


Fig. 5 Transition of predicted stopping position (Subject A, Section 1)

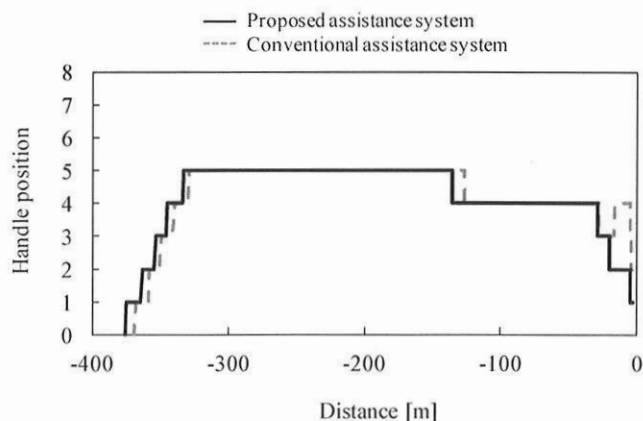


Fig. 6 Transition of brake handle position (Subject A, Section 1)

ほど強いブレーキがかかり、強い減速度が発生することになる。この図より、従来の支援システムを用いた場合には、-150m 付近まではブレーキを段階的に緩めて減速しているが、-50m 付近を過ぎた辺りでブレーキを緩めたが、予想停止位置が目標停止位置付近となってしまったため、ブレーキを掛け増し、その後、ブレーキを緩める余裕がなく、ブレーキノッチを緩めることなく停止している。一方、提案する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目標停止位置に停止していることが確認できる。

4.2 他の条件における結果

ここでは、前節までに得られた結果が、他の条件においても同様であるかを確認するために、他の駅や他の被験者の結果を検討する。

まず、被験者 A の別の区間である第 2 区間の予想停止位置とブレーキ操作に関する結果を図 7 および図 8 に示す。図 7 の予想停止位置の推移より、従来の支援システムを用いた場合には -30m 地点で予想停止位置は目標停止位置付近を推移している。しかし、提案する支援システムを用いた場合には、予想停止位置は点線付近を推移している。また、図 8 のブレーキ操作の推移より、従来の支援システムを用いた場合には、-30m 地点までは、段階的にブレーキを緩めているが、-30m 地点で予想停止位置が目標停止位置付近を推移していることから、ブレーキを緩めることができず、目標停止位置へ停止する際にブレーキノッチは 3 で停止している。提案する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、目標停止位置に停止する際にはブレーキノッチは 1 で停止している。

次に、別の被験者である被験者 B の第 1 区間の予想停止位置とハンドル操作のそれぞれの推移を図 9 および図 10 に示す。図 9 の予想停止位置の推移より、従来の支援システムを用いた場合には予想停止位置は -50m 地点より目標停止位置付近を推移している。提案する支援システムを用いた場合には、予想停止位置は負から徐々に目標停止位置へ推移し、停止している。図 10 のブレーキ操作の推移より、従来の支援システムを用いた場合には、-50m 地点よりブレーキを緩める余裕がなく、ブレーキノッチは 3 で停止している。しかし、提案する支援システムを用いた場合には、目標停止位置へ近づくにつれ、徐々にブレーキを緩め、ブレーキノッチは 1 で停止している。

以上のことから、暗算課題を行っている場合において、従来の支援システムを用いた場合に、段階的にブレーキを緩める運転が可能になっているが、高いブレーキノッチで停止する場面がみられた。しかし、提案する支援システムを用いた場合には、段階的にブレーキ操作が行われ、従来の支援システムに比べ、低いブレーキノッチで停止している事が確認できた。

また、これら以外の条件においても、定量的な差はあるものの、定性的には同様の傾向が確認された。

5. 結言

本研究では、駅停止時に運転士に対して、予想停止位置を視覚的に呈示することにより、ブレーキ操作の支援を行うシステムについて検討した。従来の支援システムでは、等加速度運動を想定しているが、ブレーキを緩めて停止するために、ジャーク一定減速を想定し、ブレーキが緩められない状況を運転士に知らせるシステムを提案した。シミュレータ実験により、有効性を検証した結果、従来の支援システムを用いた場合には、円滑に操作が行われていたが、強い減速度で停止する場面が確認された。しかし、今回提案する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になり、今回提案する支援システムの有効性が確認できた。

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。

参考文献

- 1) 丸茂喜高, 佐藤洋康, 網島均, 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認知・判断支援)”, 日本機械学会論文集中編, Vol. 76, No. 770, pp. 2500-2507, 2010.
- 2) 網島均, 小島崇, 塩澤友規, 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測定への適用, 信頼性, Vol.26, No7, pp.626-627, 2004.

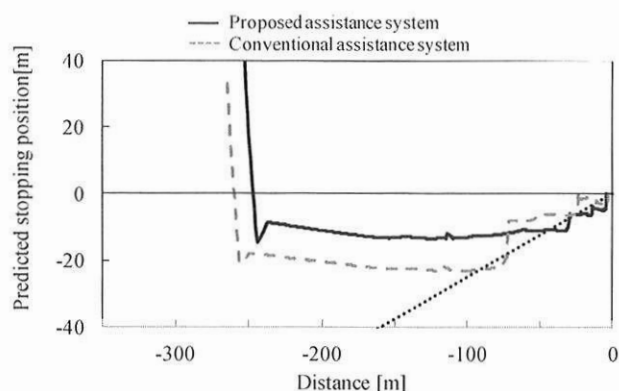


Fig. 7 Transition of predicted stopping position (Subject A, Section 2)

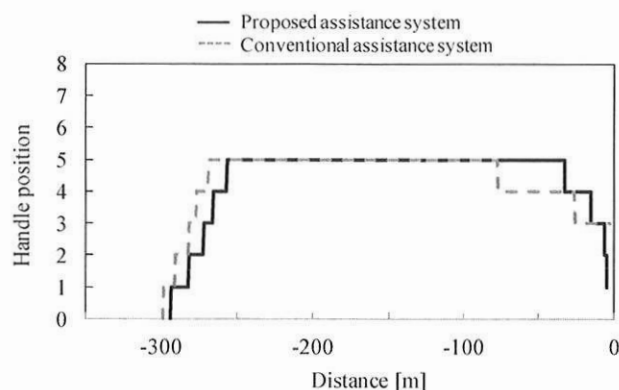


Fig. 8 Transition of brake handle position (Subject A, Section 2)

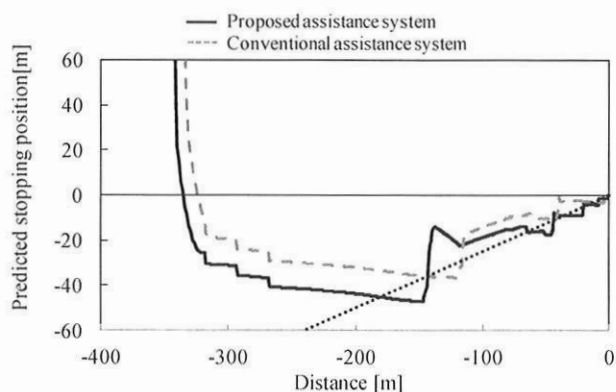


Fig. 9 Transition of predicted stopping position (Subject B, Section 1)

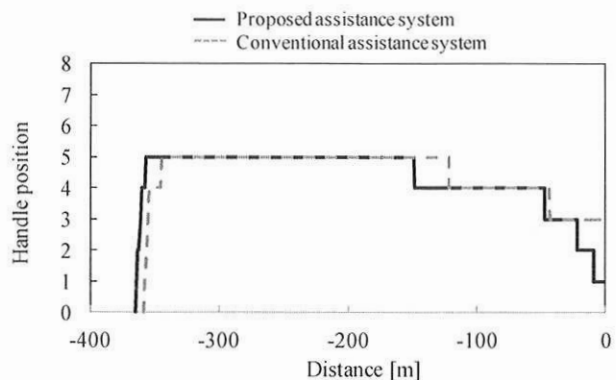


Fig. 10 Transition of brake handle position (Subject B, Section 1)