

乗り心地を考慮した自動ブレーキシステムの開発

Development of automatic braking system considering ride quality

知能機械工学コース

機械・航空システム制御研究室 1245029 村井 銀河

記号の説明

h	[m]	重心高さ
L	[m]	ホイールベース
M_b	[kg]	ばね上質量
M_w	[kg]	ばね下質量
B	[N]	路面x軸方向力
C	[Ns/m]	タイヤと車体間のダンパ減衰係数
K_s	[N/m]	タイヤと車体間のばね定数
F_s	[N]	サスペンションからの車体への力
M	[kg]	車両質量
Ma	[N]	減速度により生じる慣性力
I_y	[kg · m ²]	車体慣性モーメント
J	[kg · m ²]	車輪換算の慣性モーメント
θ	[rad]	車両重心ピッチング角度
ω	[rad/s]	タイヤ回転角速度
T	[N · m]	制動トルク

1. 緒言

近年、自動車の全自動化に向け、自動ブレーキシステムが開発されている。現在の自動ブレーキシステムは衝突被害軽減ブレーキなど危険回避が目的として用いられることが多く、これまで乗員の乗り心地に関してはあまり考慮されてこなかった。しかし、完全自動運転化を見据えた将来、機械側がどのようにして乗員に快適さを提供するかが課題となることが想像される。ゆえに今後、自動運転時にはドライバや乗員の状態に適応し、好みを反映できる仕組みの構築が必要だと考える。趙⁽¹⁾はドライバの意志をペダルの踏み込み具合から推定し生成した速度パターンでの運転支援システムを提案したが、乗り心地を向上させるパラメータの決定法を明らかにするまでは至っていない。そこで、本研究では加減速度の乗り心地への影響が強いと言われている⁽²⁾制動操作時に着目し、乗り心地に影響する減速度とその変化率であるジャークを乗り心地の指標とした理想の減速パターンを定義し、それを目標値として速度制御を行う自動ブレーキシステムの開発を目的とする。

2. 提案

本研究の目的である乗り心地を考慮した制動操作を自動ブレーキシステムで実現するためには、目標となる減速パターンを決定する必要がある。制動時に乗り心地に影響する様々な原因から、乗り心地に最も影響が少ないとされる減速パターンを理想の形と定義、そして個人の好みに応じて理想の減速パターンに近い制動操作が実現可能な自動ブレーキシシステムが構築できれば本研究の目的が達成できると考える。

自動車走行ではエンジンや路面からの定常的な振動だけではなく、信号に伴う発進や停止といった進行方向における加減速が頻繁に発生し乗り心地に影響する。本研究ではブレーキ制御による乗り心地の向上を目指すので、左右方向の運

動よりも前後方向の運動について考え、特に制動操作時の乗り心地をより高めるためには、自動車走行で生じる前後方向の速度変動が乗り心地に与える影響について検討することが重要と考える。王⁽³⁾らは、自動車走行に伴う速度変動に対して、乗り心地評定実験を行い、乗り心地評定値と速度変動を表す諸物理量との関連を検討した。その結果、自動車の走行で生じる速度変動による乗り心地は、加速度とその加速度の微分値であるジャークの影響を受けることを報告しており、本研究ではこの2つの指標を用いることにする。

乗り心地を考慮した走行をするために加速度とジャークを指標として考える必要があり、制動操作においてもこのことがあてはまると考えられる。齋藤⁽⁴⁾はスムーズな走行をするためには、加速度とその微分値であるジャークを連続的に増減させることによって実現できることを明らかにした。減速開始時点から最大ブレーキ力で減速するより比較的弱いブレーキ力を数秒間先行させた方がジャークを抑えられ、良好な乗り心地が得られることが白戸らにより報告されている⁽⁵⁾。加えて、ブレーキかけ初めの最大限速速度および停止直前の最大ジャークが乗り心地に大きく影響することを明らかにしている⁽⁶⁾。

図1に、これらの特性をふまえて定義する理想の減速パターンを示す。走行条件として設定した初速度で時間内に停止する制動操作とする。

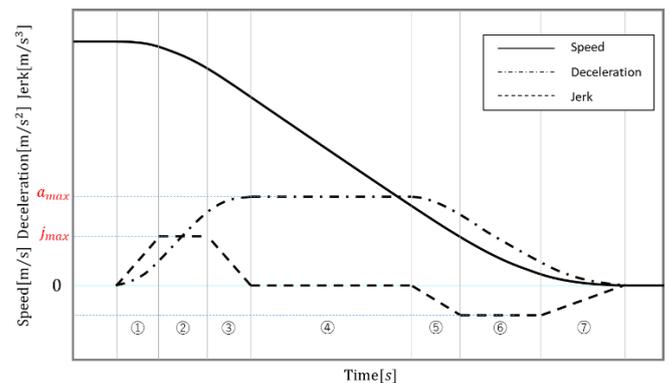


Fig.1 Ideal deceleration pattern.

理想の減速パターンとして定義するために、減速開始から完全停止するまでの時間を減速度、ジャークの変わり目を基準に7分割した。減速度とジャークを連続的に増減させることを条件とした上で以下を定める。

- ・①～③の減速度の限界値までの過程は、後半⑤～⑦で速度制御の余裕を持たせるため短時間で行うものとする。
- ・②ではジャークの限界内の最大値で、減速度の限界値まで迅速に到達させる。
- ・④では減速度の限界内の最大値で速やかに減速させる。

・完全停止時に乗員に衝撃を与えることがないようになめらかにジャークを0に収束させる。

このように定義した減速パターンを理想の形として目標値と設定し、車両の運動制御を行う。

3. 車両の数理モデル作成

理想の減速パターンと走行中の車両振動との関係を調べる。乗員が乗り心地を調整できるようにするにはさまざまな減速度に対する車体の運動を明らかにする必要がある。車両モデルより運動方程式を導き、状態空間モデルを使った数値シミュレーションを行う。

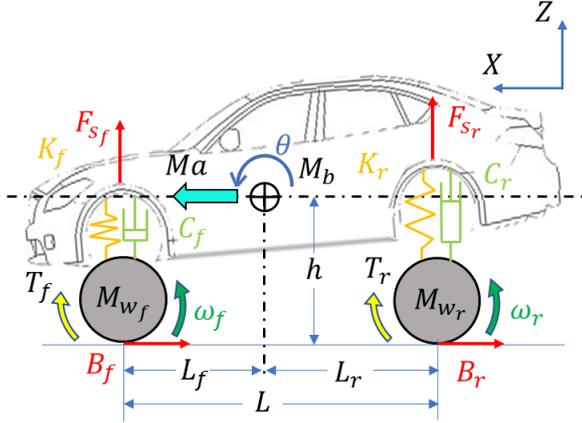


Fig.2 Coordinate system of vehicle.

図2には、車両の座標系を示す。車両の運動を剛体の平面運動として考える。今回の車両モデルは二輪モデルであり、車体、2つのサスペンション、2つのホイールおよび2つのタイヤから構成されている。そして本研究では、直進時の制動操作を考え回りは考慮しないので、車輪の左右の二輪は同一の運動をするものと仮定し二輪モデルとしている。各ホイールと車体は、ばねとダンパから構成されるサスペンションによって接続されている。またタイヤは常に地面に接地しているものとする。制動時に起こる荷重移動が前後輪の反力を発生させ、車両重心まわりの回転モーメントが発生するという前後並進運動と回転運動を組み合わせた車両挙動であるとした。

車両モデルから運動方程式を導出した。すべての変位は静的平衡位置から定義されているとする。前後輪のばね上の力の関係を考える。パラメータには非線形項 $\sin \theta$ が含まれているので $\sin \theta \cong \theta$ と近似し線形化を行う。バネマスダンパ系として車体にかかる力 F_{s_f} [N], F_{s_r} [N]について整理すると式(1),(2)で表せる。

$$F_{s_f} = K_f(L_f\theta) + C_f\left(L_f\frac{d\theta}{dt}\right) \quad (1)$$

$$F_{s_r} = -K_r(L_r\theta) - C_r\left(L_r\frac{d\theta}{dt}\right) \quad (2)$$

車輪の回転運動方程式は、前後車輪の慣性モーメントを J_f [kgm²], J_r [kgm²], 制動トルクを T_f [Nm], T_r [Nm], 路面に力を伝える制動力 B_f [N], B_r [N]をとすると、式(3),(4)で表すことができる。

$$J_f\frac{d\omega_f}{dt} = -T_f + B_fR \quad (3)$$

$$J_r\frac{d\omega_r}{dt} = -T_r + B_rR \quad (4)$$

車両重心のx軸方向の運動方程式は、自動車を一つの剛体と考えたときの慣性力と制動力の関係を考慮すると式(5)で表せる。

$$M\frac{dv}{dt} = -(B_f + B_r) \quad (5)$$

車両重心まわりの運動方程式は、車体ピッチング慣性モーメントを I_y [kg·m²]とし、右辺は力のモーメントの関係より式(6)で表せる。

$$I_y\frac{d^2\theta}{dt^2} = (-F_{s_f}L_f + F_{s_r}L_r) + (B_f + B_r)h \quad (6)$$

ジャークは加速度の式を微分することで導かれる^[16]。よって、速度とジャークの関係は二回微分して得られる。速度の式には、時間変数としてブレーキトルクがかかっている。単純に二回微分して得られるジャークの式は

$$\frac{dj}{dt} = -\frac{R}{MR^2 + (J_f + J_r)}(\ddot{T}_f + \ddot{T}_r) \quad (7)$$

と表すことができ、状態空間モデルを作成する。

4. 状態空間表現

状態量 $x(t)$, 入力 $u(t)$, 出力 $y(t)$ を次のように定める。

$$x(t) = [v \ \theta \ \dot{v} \ \dot{\theta}]^T,$$

$$u(t) = [\ddot{T}]^T,$$

$$y(t) = [v \ \dot{v} \ \ddot{v}]^T$$

上式を用いて以下の状態空間表現をすることが出来る。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{(K_f L_f^2 + K_r L_r^2)}{I_y} & -\frac{Mh}{I_y} & -\frac{(C_f L_f^2 + C_r L_r^2)}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5. 制御器設計

本研究ではLQ最適制御を行うため、評価関数 J を以下のように定め、その最小化を考える。

$$J = \int_0^{\infty} \{x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)\} dt \quad (8)$$

走行条件として初速度50[km/h]を与えたとき15秒付近で停車する制動操作を考える。走行条件に合うように重み行列 Q, R を次のように定め、数値シミュレーションを行った。

$$Q = \begin{bmatrix} 250 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6000 \end{bmatrix}, \quad R = 0.29$$

6. シミュレーション結果

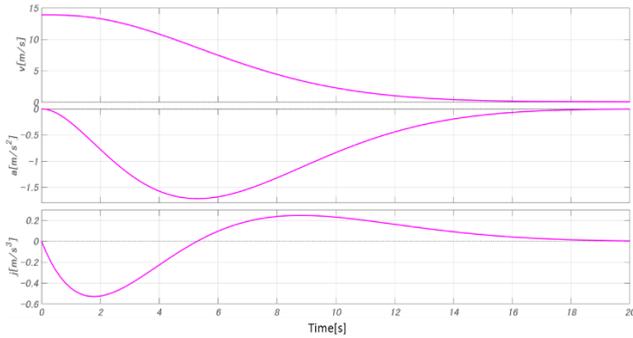


Fig.3 Initial response to velocity・acceleration・jerk.

図3からブレーキトルクかけ始めは比較的弱い力で減速し、完全停止前にはジャーク値は0に収束しており、速度0になめらかに収束しているのが理想の減速パターンに近いと言える。減速度、ジャークのピーク値はそれぞれ $a = -1.9[\text{m/s}^2]$, $j = -0.5[\text{m/s}^3]$ であり、乗り心地に影響を与えない範囲に抑えられていることがわかる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。ゆえに、適当な重みを設定することで走行条件下での理想の減速パターンに近い速度制御を行えることが確認できた。

本研究では、ジャークを考慮するために入力をブレーキトルクの二階微分 $\ddot{T}[\text{Nm/s}^2]$ としていたが、実際に制動操作を行う際にはブレーキトルク $T[\text{Nm}]$ を入力とする必要がある。そこで、変換したブレーキトルクを入力とした減速パターンと最適制御で得られた減速パターンとの比較を行った。図4には \ddot{T} のグラフを、図5には \ddot{T} を二回積分することで変換したブレーキトルク T を示す。

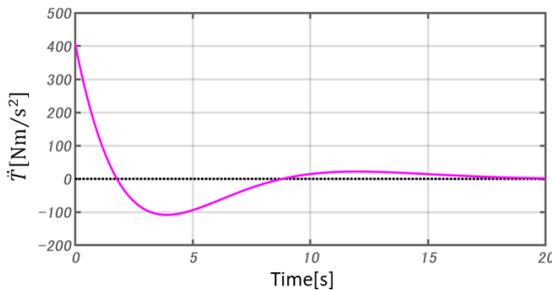


Fig.4 Graph of double derivative of brake torque.

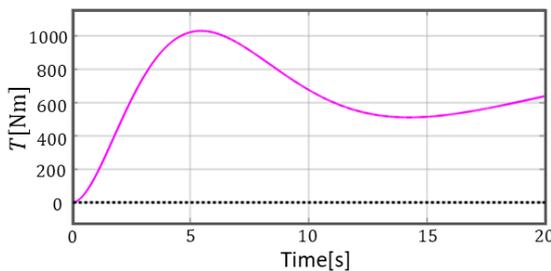


Fig.5 Brake torque graph.

図6には最適制御で得られた減速パターン、図7には入力を T とした場合の減速パターンを示す。それぞれ比較すると、8秒付近までは同じ減速の仕方であるがそれ以降は速度が収束しておらず、いわゆるカックンブレーキのような停車の仕方になっている。これは図5に示すように積分時に T が発散していることが原因だと考える。本来、速度を0に収束させるためブレーキトルクも0に収束する必要がある。

そこで、解決策として今後の自動運転を行う自動車の原動機はモータであるため、モータ駆動の特性を考慮し正の駆動トルクを与えることでブレーキトルクを0に収束させることを考える。ゆえに、実際に制動操作を行う際にブレーキトルクを入力として扱う場合にはさらにフィードバック制御を用いた制御則を考案する必要があるだろう。

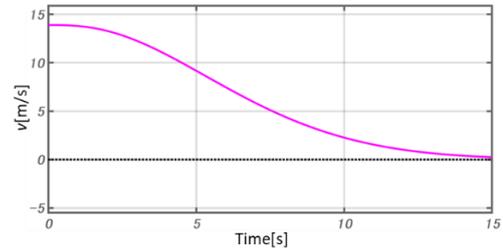


Fig.6 Deceleration pattern output by optimal control.

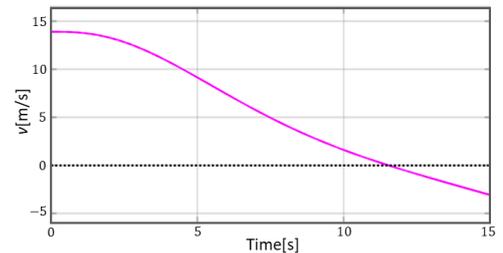


Fig.7 Deceleration pattern when brake torque is input.

7. 結言

本研究では、乗り心地を考慮した制動操作を自動ブレーキシステムで行うため乗り心地に関して行われている研究から理想の減速パターンを定義し、目標として追従させるような制御則設計を行った。着目した前後の速度変動による車体の運動を考慮した数理モデルを作成し、LQ最適制御を行った。そして適当な重み設定により、走行条件下での理想の減速パターンに近い制動操作を行えることを確認した。今後の課題として、乗員の好みを反映できるシステムの構築のため、減速パターンの形状をより詳細に定義し、走行条件を変えた際の重みと乗り心地の関係性を調べていくことが挙げられる。

文献

- (1) 趙 莉：“電気自動車におけるドライバの意志に沿ったリアルタイム速度パターンの生成”，東京大学修士論文，2007.
- (2) 南京政信：“乗り心地向上を目指すブレーキ制御”，Railway Research Review, Vol.57, No.9, pp16-19, 2000.
- (3) 王鋒, 佐川貢一, 猪岡光：“自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究”，人間工学, Vol.57, No.12, pp81-84, 2003.
- (4) 齋藤知行：“電気自動車のためのドライバ指令変更を考慮したリアルタイム速度パターン生成法”，東京大学卒業論文，2004.
- (5) 白戸宏明, 鈴木浩明：“列車減速時の乗り心地評価”，人間工学, 34 特別号, pp382-383, 1998.
- (6) 白戸宏明, 藤浪浩平, 小美濃幸司：“列車減速度の適正レベルに関する検討”，鉄道総研報告, Vol.8, No.12, pp43-46, 1994.
- (7) https://www.nisshinfire.co.jp/corp/pdf/si107_03.pdf