アダプティブトラクションコントロール*

中谷文彦^{*1}, 守田栄之^{*2}, 瀧山 武^{*2}

Adaptive Traction Control

Fumihiko NAKATANI, Shigeyuki MORITA and Takeshi TAKIYAMA

The driving force of an automobile depends ultimately upon the relationship between the tire and road surface. Therefore, traction control, which prevents tire slip, is becoming an important issue from the point of view of driving performance and stability of automobiles. Fuzzy traction control, developed by one of the authors and a co-worker, has excellent performance that can be adapted to any road conditions. It became clear, however, that fuzzy traction control is still poor under abnormal conditions of light vehicle load or of low tire pressure. Therefore, another algorithm for traction control carried out through the detection of the gradient between driving force and tire slip, was proposed in this paper. Relatively good results were obtained.

Key Words: Automobile, Traction Control, Stability, Tire Slip, Adaptive Control

1. はじめに

積雪した路面のような滑りやすい状態で自動車の駆動性能や走行安定性を向上させる方法としてトラクションコントロールシステム(TRC)がある。それは乾燥路面での急発進、急加速時のタイヤの空転をも抑えて加速性、操縦安定性を向上させ得る⁽¹⁾。

ただし、現用TRCには次のような欠点がある。

〔1〕現用TRCでは、路面状況により常に最大駆動力を発揮できない⁽²⁾。

また、著者の一人等がおこなったファジィ制御によるTRC(F-TRC)は現用TRCの欠点を取り除いて最大駆動力を発揮するものであるが⁽³⁾、それでもなお、次のような欠点がある。

〔2〕F-TRCは、スリップ比の増大に伴い変動する駆動力が減少するのを抑えるため、駆動力と比例関係にある加速度を用いてその減少をくい止め最大駆動力を得るようにファジィ制御規則にて指示回転数を抑えるものであるが、後述のように駆動力減少量が小さく計測しにくいような異常な路面状況、タイヤ条件

の場合はあまり有効でないことが判明した。

そこで本研究においては、このF-TRCにおける欠点除去の方策として、駆動力とタイヤ路面間のスリップ比の特性曲線からその関係自体を探索することによっていかなる状況においても最大駆動力を得るアダプティブなTRC(A-TRC)の研究を目的とし、シミュレーションと実験からその制御アルゴリズムの立証をおこなった。本研究に使用した実験装置を、Fig.1に示す。実験車は装置の関係でインバーター(IM)によって回転制御される3相誘導電動機駆動による固定の一輪電動スクーターによった。したがって、指令入力とはトルクではなく、回転数になる。これらは全てオンラインコンピュータにより制御される。

使用記号を以下に示す。他はその都度、説明を加える。

F_d	: 駆動力	[N]
J	: 慣性モーメント	[kgm ²]
f	: 軸摩擦係数	[kgm ² /s]
n	: 回転数	[s ⁻¹]
R_{m1}	: 車両部変速比	[-]
R_{m2}	: シャーシダイナモメーター減速比 ..	[-]

* 平成5年11月26日 関西支部第252回講演会にて講演, 原稿受付 平成5年12月13日.

^{*1} 学生員, 大阪市立大学大学院 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138).

^{*2} 正員, 大阪市立大学工学部.

- r_w : タイヤ半径 [m]
 T : トルク [Nm]
 V : 周速度 [m/s]
 λ : スリップ比 [-]
 τ : 制御 (サンプリング) 周期 [s]

添字 m はインバーターモーター軸、 w はタイヤ軸、 D はシャーシダイナモーターのドラム軸、 L は負荷を表し、慣性モーメントや摩擦係数の添字は該当軸への等価変換値であることを意味する。また、冠 $\sim$ は指令設定値を表す。

Fig.1 Experimental Device

2. シミュレーションモデル

A-TRCのコントローラー作成やシミュレーションにおける評価をおこなうため、作成した対象系のシミュレーションモデルのブロック線図をFig. 2に示す。このモデル中のSC, TRCを含まない、駆動モータにランプ入力 $\tilde{n}_m$ を与えた開ループ応答の同定結果の一例をFig. 3に示す。シミュレーション結果 (sim.) と実験結果 (exp.) は良好に一致しており、他の例も同程度でこれよりモデルの妥当性は示されたと考えられる。

Fig.3. Identification between the Simulation and Experiment Results

Fig.2. Block Diagram of the Simulation Model for an Experimental Device

3. 制御について

制御は、IMへの指示回転数を操作量として $\tau=20$ [ms]で行う。TRCの指示回転数を $\tilde{n}_{m2}$ 、スピードコントローラー(SC)の指示回転数を $\tilde{n}_{m1}$ とすると、操作量は $\tilde{n}_m = \tilde{n}_{m1} + \tilde{n}_{m2}$ となる。ただし、 $\tilde{n}_{m2}$ は後述式(3-4)より一般に零、または、負値である。

3・1. アダプティブトラクションアルゴリズム

(A-TRC) 加速時のスリップ比 λ ($= (V_w - V)/V_w$)と駆動力 F_d の様子をFig.4に示す。

現用TRCは、スリップ比 λ がある設定値 λ_{Limit} を越えないように制御する方法である⁽²⁾。図の曲線Xにおいて、 λ_{Limit} が駆動力 F_d を最大にする λ_P に一致すれば問題ない。しかし、路面の状態変化により λ_P は変わるので、今 λ と λ_{Limit} の相対的な関係が $\lambda_{Limit} = \lambda_A$ (A点)となれば最大の F_d が発揮できず加速性が悪化し、また $\lambda_{Limit} = \lambda_B$ (B点)となれば F_d は減少し、かつ、タイヤが空転しながら加速するので操縦安定性が悪化する。

また、これらの欠点をおぎなったF-TRCは、 F_d の変化を比例関係にある $\dot{\lambda}$ を用いて探索する。つまり、 λ 、 $\dot{\lambda}$ 、 $\tilde{n}_{m2}$ の τ での変化量を $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\dot{\lambda}$ 、 $\Delta\tilde{n}_{m2}$ とすると、

if $\Delta\lambda$ is P and $\Delta\dot{\lambda}$ is N then $\Delta\tilde{n}_{m2}$ is N
で表されるファジィ制御によるもので、 F_d が最大となる λ がどの様に变化しても F_d が常に最大値をとることが出来るというアダプティブ性を有する⁽³⁾。しかしなお、曲線Yの様な F_d の減少量(曲線Xの ΔF_d で示す)がとらえにくい路面状態においては $\Delta\dot{\lambda}$ の判断が困難となり制御不可能に陥る。このような状態は、タイヤ空気圧が低かったり、車重が小さい場合などに生ずることがある。

Fig.4. Characteristics between Driving Force and Tire Slip Ratio

これらを克服するには、スリップ比 λ に対する駆動力 F_d の傾斜 $\Delta F_d / \Delta \lambda$ 自体の探索が望まれる。そして、 $\Delta F_d / \Delta \lambda = 0$ とすることにより F_d の極限制御(μ -極限制御)が適応型で実現できる(A-TRC)。 F_d の計測は、車両運動方程式(3-1)を変形して得られる式(3-2)より回転系摩擦トルクを省略した式(3-3)で示されるトルク信号 T_P を用いた。

$$T_m - \frac{F_d r_w}{R_{m1}} = J \dot{n}_m + f_{nm} \dots (3-1)$$

$$F_d = \frac{R_{m1}}{r_w} (T_m - J \dot{n}_m - f_{nm}) \dots (3-2)$$

$$T_P = \frac{R_{m1}}{r_w} \left(\frac{T_w}{R_{m1}} - J \dot{n}_m \right) \dots (3-3)$$

なお、 $\Delta T_P / \Delta \lambda = 0$ では動作遅れ時間の関係で実際には遅すぎるので、少し手前の傾斜 θ_{Limit} をシミュレーションより決定し、この傾斜限界値 θ_{Limit} を基準に $\Delta T_P / \Delta \lambda$ との差の比例制御である式(3-4)で $\Delta\tilde{n}_{m2}(\leq 0)$ を求める。

$$\Delta\tilde{n}_{m2} = K_i \left(\frac{\Delta T_P}{\Delta \lambda} - \theta_{Limit} \right) \dots (3-4)$$

ただし、 ΔT_P と $\Delta \lambda$ は τ での T_P と λ の変化量である。また、比例ゲイン K_i は $K_i = 2.40$ 、傾斜限界値 θ_{Limit} の大きさについては F_d の μ 換算値で $\theta_{Limit} = 0.36$ が適当であった。

このように傾き $\Delta T_P / \Delta \lambda$ を時事刻々と検知して F_d 最大値近傍に保持するため運転条件や路面条件がどのように変化しても常に F_d 最大を発揮できる適応型の制御となる。

なお、トルク T_w の検出において雑音成分除去のため、最大エントロピー法で周波数解析し、式(3-5)の4次ディジタルフィルタを使用した。

$$y(k) = \sum_{i=0}^N a_i x(k-i) - \sum_{i=1}^N b_i y(k-i) \dots (3-5)$$

3・2. スピードコントローラー(SC) 所定の走行をさせるためにスピードコントローラーが必要であるが、ここではファジィ制御を用いたコントローラーを作成した。制御規則は、次の通りである⁽⁴⁾。

if E is P and ΔE is P then $\Delta\tilde{n}_{m1}$ is P

if E is N and ΔE is N then $\Delta\tilde{n}_{m1}$ is N

ただし、P、Nはファジィラベルを表し、 E は目標速度 $\bar{v}$ と車速 V との偏差、 ΔE 、 $\Delta\tilde{n}_{m1}$ は E 、 $\tilde{n}_{m1}$ の τ での変化量である。

4. 路面状態などの変化についての検討

ここでは、モデリングしたシミュレーションモデルにおいてA-TRCの特徴をあらかじめ確認し、そのアダプティブ性を比較するため、F-TRCとの検討をおこなってみた。

4・1. F-TRCについて 前章で概略を述べたF-TRCについてのファジィ制御規則とメンバーシップ関数を次に示す。

if $\Delta \lambda$ is P and $\Delta \dot{v}$ is N then $\Delta \tilde{m}_2$ is N

$P(x) = 2\{1 + \exp(-cx)\}^{-1} - 1$, $N(x) = P(-x)$

$P'(x) = d(x-1)+1$, $N'(x) = P'(-x)$

ここに、 x は変化量を $[-1, 1]$ に規格化した値を示す。これらは文献⁽³⁾に詳しい。

4・2. シミュレーション結果 $F_d - \lambda$ 特性曲線の変化した路面状態におけるF-TRCとA-TRCの比較を対象系モデルのシミュレーションによりおこなった。Table. 1に走行条件を示す。目標速度 $\tilde{v}_1$ から $\tilde{v}_2$ へのステップ入力である。また、 W はタイヤにかかる車重、 P はタイヤの空気圧でこれらはFig. 4のように $F_d - \lambda$ 特性を変化させたことに相当する。状態No. b, cは非常に滑りやすい状態である。

Table 1. Driving Conditions 1

No.	$\tilde{v}_1$ [m/s]	$\tilde{v}_2$ [m/s]	W [kg]	P [$\times 10^5$ Pa]
a	5	10	20	2.00
b	5	10	5	2.00
c	5	10	20	1.00

シミュレーションの一例として状態No. bの場合のA-TRCとF-TRCの比較結果をFig. 5に示す。

F_d 最大を得てからスリップ比 λ の増加にともない減少する F_d の減少量が計測されにくいFig. 5のような場合、F-TRCでは減少量 $\Delta \dot{v}$ の判断が困難になり制御不可能に陥ってSCだけが働くという不安定の走行状態となり、 V_w , V の時間挙動のハンチングも大きい。これに対しA-TRCでは F_d 最大が得られ、かつ、安定で良好な結果が得られているのがわかる。

4・3. 評価関数による定量的比較 F-TRCに対するA-TRCの効果を定量的にみるため、次式で表される評価関数 J_1 , J_2 を設定した。

$$J_1 = \sum \{\tilde{v}(k) - V(k)\}^2 \tau \dots\dots\dots (4-1)$$

$$J_2 = \sum \{V_w(k) - V(k)\}^2 \tau \dots\dots\dots (4-2)$$

J_1 が小さいことは加速性がよいを、 J_2 が小さいことは滑りが小さいことを示す。Fig. 5の走行シミュレーションを状態No. a, cでも行い、 J_1 , J_2 を求

(1)F-TRC

(2)A-TRC

Fig.5. Comparative Result between F-TRC and A-TRC at the Simulations

めたものをFig. 6に示す。

J_1 に対しては、F-TRCとA-TRCの差はほとんどなく目標速度 $\tilde{v}$ に対する追従性は双方とも良好に思える。しかし、 J_2 は、状態No. b, c (ΔF_d が小で滑りやすい)の場合、A-TRCに比べF-TRCの方がかなり大きな値になっており、スリップが激しい、つまり、走行操縦不安定に陥ることがわかる。これらより、A-TRCが路面の状況にアダプティブで、より高性能であることがわかった。

Fig.6. Evaluation of the Driving Conditions

5. 実験での比較検証

A-TRCの検証をおこなうため、Fig.1の実験装置を用いてF-TRCとA-TRCの比較実験をおこなった。Table.2に走行条件を示す。

Table 2. Driving Conditions 2

No.	$\bar{V}_1$ [m/s]	$\bar{V}_2$ [m/s]	λ_p	P [$\times 10^5$ Pa]
a'	5	10	0.10	2.16
c'	5	10	0.18	0.98

状態No. a'は、通常の良い路面状態に相当する状態 (Table.1の状態aに近い) でF-TRC, A-TRC両者ともに紙面の都合上図示しないが F_d 最大が得られ、加速性も良好であることがわかった。

次に、タイヤ空気圧 P により状態No. cに近いNo. c'条件での実験結果の例をFig.7にそれぞれ示す。これは F_d 値自体も小さく非常に滑りやすい状態になっており、 F_d 最大が捕らえにくく、F-TRCでは制御不可能に陥り、SCだけの不安定な走行状態になっているが、A-TRCでは安定で良好な結果が得られているのがわかる。

6. まとめ

以上、A-TRCを実験し次の結論を得た。

①強い非線形を有するTRC制御に対しても、 F_d - λ 特性曲線の傾斜自体を検索する本方式はアダプティブな制御が可能である。

②これは、ピーク λ_p の変化のみならずタイヤ空気圧や車重変化に対しても有効である。

(1)F-TRC

(2)A-TRC

Fig.7. Comparative Result between F-TRC and A-TRC at the Experiments

参考文献

- (1)磯田, 他2名: 自動車技術, 45-1, 1991-1, 35-41
- (2)Automotive Engineering, 96-8, 1988-8, 70-76
- (3)松本・守田, 機論, 58-553, C(1992-9), 115-119
- (4)松本, 他2名, 機論, 58-545, B(1992-1), 276-278