四輪操舵車の安定性に関する一考察†

——自動車を操舵トルク入力系と見る場合——

藤 代 武 史*・伊 藤 健*・川 辺 武 俊*
金 井 喜美雄**・越 智 徳 昌**

A Study on the Stability of a Four Wheel Steering Vehicle As a Steering Torque Input System

Takeshi FUJISHIRO*, Ken ITO*, Taketoshi KAWABE*
Kimio KANAI** and Yoshimasa OCHI**

We have already proposed a feedforward type control system for the four wheel steering (4 WS) vehicle using the model following control theory. The control system is designed on the assumption that the input is the steering wheel angle. In this paper we deal with the stability of the 4 WS vehicle. Generally, it is considered that the driver steers a vehicle by both steering wheel angle and steering wheel torque. We carry out an investigation of the pole location and a computer simulation for the 4 WS vehicle as a steering wheel torque input system that has a feedback path to the control system through the dynamics of a steering system. Furthermore, proving ground tests are conducted with a real 4 WS vehicle. The results show that the feedforward control system has an effectiveness to stabilize the vehicle motion.

Key Words: vehicle control, four wheel steering vehicle, feedforward control, stability

1. ま え が き

最近自動車の操縦性や安定性に対する要求が高く、これを満たす方法の一つとして前輪のみならず後輪をも積極的に操舵する四輪操舵の研究が盛んに行われ、一部実用化されている。方式としては操舵角入力に対してフィードフォワード補償のみで後輪もしくは前後

輪を操舵するもの^{1)~5)}や、自動車のヨーレートや横滑り角などの検出を前提としてフィードバック補償を加えたもの^{6),7)}、などが提案されている。

ここでは四輪操舵車の安定性を扱うが、自動車の安定性は、ドライバを含めて人間-自動車系として捉える場合と自動車固有の安定性として捉える場合とがある。

四輪操舵車の人間-自動車系としての安定性について解析的に研究したものと、林ら⁸⁾の報告があり、フィードフォワード補償あるいはフィードバック補償で後輪を操舵する四輪操舵車で、従来の前輪操舵車よりも極配置が好ましくなることが示されている。

一方、Good が示すように⁹⁾、ドライバは主に操舵角で操舵する場合と、主に操舵トルクで操舵する場合とがあるので、自動車固有の安定性についても同様に操舵角を入力とする場合に加えて、操舵トルクを入力とする場合をも考慮することが重要であると考えられる。

四輪操舵車を操舵角入力系として見る場合の安定性については、井口⁷⁾、永井ら⁶⁾、入江ら¹⁰⁾が状態量をフィードバックすることで安定性の向上が図られることを示している。

操舵トルクを入力とする場合については、操舵角入力に対しフィードフォワード補償のみで後輪を操舵する四輪操舵車において、前輪操舵車に比べ安定性の向上がみられることを筆者ら⁵⁾が実験的に示唆している。

本論文では筆者らがすでに提案した四輪操舵車の制御方式を中心に、自動車固有の安定性について考察する。

自動車の操舵入力を操舵角と考えると、ここで取り上げる方式は、操舵角に対しフィードフォワード補償

† 第 30 回自動制御連合講演会で一部発表 (昭 62・10)

* 日産自動車 (株) 中央研究所 横須賀市夏島町 1

** 防衛大学校 横須賀市走水 1-10-20

* Central Engineering Laboratories, Nissan Motor Co. LTD., Yokosuka

** The National Defense Academy, Yokosuka

(Received June 25, 1988)

(Revised October 6, 1988)

のみで後輪を操舵する方式であるため、その制御系は自動車系の極配置には関与しない。しかし操舵入力として操舵トルクとすると自動車の運動がステアリング系を通して操舵角にフィードバックされ、極配置に影響することが考えられる。そこでまず操舵トルクを入力とした四輪操舵車の物理モデルをつくる。四輪操舵の制御則としては、1) 操舵角に対し後輪を比例的に操舵する比例制御則、2) モデル適合により、操舵角に対しヨーレートの所望の応答を得るヨーレート制御則、3) ヨーレートと横加速度の線形結合である D^* を操舵角に対し所望の応答とする D^* 制御則、4) モデル追従により操舵角に対し横加速度の所望の応答を得る横加速度制御則、の四つをとりあげる。つぎにそのおののの極配置を調べ「舵手放し安定性試験」の計算機シミュレーションを行い時間領域応答を調べる。さらに四輪操舵車を試作し、「舵手放し安定性試験」と「横風安定性試験」の車両実験を実施し、その結果と計算機シミュレーションの結果とを比較する。

2. 四輪操舵車の記述

本論文において取り扱う操舵トルクを入力とした四輪操舵車の構成を **Fig. 1** に示す。操舵角と後輪舵角とを入力とした車両の平面運動の方程式、車両のステアリング系の運動方程式、およびコントローラの状態方程式の三つを連立させ、操舵トルクを入力とした四輪操舵車の状態方程式を作る。

後輪操舵機構を有する車両のヨーと横の二自由度平面運動に関する状態方程式は、つぎのように表わすことができる。

$$\dot{X}_p = A_p X_p + B_p \delta_R + B_{pF} \theta \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} X_p^T &= [\dot{\psi} \ V_Y] \\ A_p &= \begin{bmatrix} -2(L_F^2 K_F + L_R^2 K_R)/I_Z V \\ -2(L_F K_F - L_R K_R)/MV - V \\ -2(L_F K_F - L_R K_R)/I_Z V \\ -2(K_F + K_R)/MV \end{bmatrix} \\ B_p &= [-2L_R K_R/I_Z \quad 2K_R/M] \\ B_{pF} &= [2L_F K_F/I_Z N \quad 2K_F/MN] \end{aligned}$$

C_F : Cornering Force of Front Tires

Fig. 1 Block diagram of 4WS vehicle for torque input

であり、 $\dot{\psi}$ はヨーレート、 V_Y は横方向速度、 δ_R は後輪実舵角、 θ は操舵角、 V は車速、 M は質量、 I_Z はヨー慣性モーメント、 L_F は前輪・重心点距離、 L_R は後輪・重心点距離、 K_F は前輪等価コーナリングパワー、 K_R は後輪コーナリングパワー、 N はステアリングギア比である。

キングピン回りの慣性、および粘性は十分小さいと仮定し、ステアリング系の剛性は、等価コーナリングパワーを用いることで表わすと、ステアリング系の状態方程式はつぎのように表わすことができる。

$$\dot{X}_s = A_s X_s + B_{s1} T_s + B_{s2} X_p \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} X_s^T &= [\theta \ \dot{\theta}] \\ A_s &= \begin{bmatrix} -D_s/I_s & -2\xi K_F/N^2 I_s \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ B_{s1} &= [1/I_s \ 0] \\ B_{s2} &= \begin{bmatrix} 2\xi L_F K_F/N I_s V & 2\xi K_F/N I_s V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

であり、 T_s は操舵トルク、 D_s は粘性、 I_s はステアリングホイール慣性モーメント、 ξ はトレール長である。

つぎにコントローラの状態方程式と出力方程式とを次式のようにおく。

$$\dot{X}_c = A_c X_c + B_c \theta \quad (3)$$

$$\delta_R = C_c X_c + D_c \theta \quad (4)$$

以上より操舵トルク入力四輪操舵車両の状態方程式は、

$$\dot{X} = AX + BT_s \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} X^T &= [X_p^T \ X_s^T \ X_c^T] \\ A &= \begin{bmatrix} A_p & B_p C_c & 0 & B_{pF} + B_p D_c \\ 0 & A_c & 0 & B_c \\ \hline B_{s2} & 0 & \hline A_s \end{bmatrix} \\ B^T &= [0 \ 0 \ 0 \ B_{s1}^T] \end{aligned}$$

である。ここで、状態量 $\dot{\psi}$ 、 V_Y がステアリング系を通してコントローラにフィードバックされることに注意すべきである。A行列のなかにコントローラの行列 A_c 、 B_c 、 C_c 、 D_c が現われており、これらが極配置に影響することがわかる。

おののの制御則についてコントローラの状態方程式を示す。

(1) 比例制御則

コントローラはダイナミクスをもたず、

$$A_c = 0, \quad B_c = 0, \quad C_c = 0,$$

$$D_c = (\text{定数}) \quad (6)$$

である。理想的な D_C の値を選べば、定常的な横滑り角 $\tan^{-1}(V_Y/V)$ を 0 にできる。

(2) ヨーレート制御則

ヨーレートを規範モデルの応答に適合させるヨーレート制御則では規範モデルを 1 次として、

$$\begin{aligned}\dot{X}_r &= a_R X_r + b_R \theta \\ Y_r &= c_R X_r\end{aligned}\quad (7)$$

とおくとコントローラは 2 次となり¹¹⁾、 $c_R=1$ とすると、 X_C 、 A_C 、 B_C 、 C_C 、 D_C は、つぎのように表わされる。

$$\begin{aligned}X_C &= [X_{c1} \ X_{c2}], \ X_{c1} = X_r \\ a_{c11} &= a_R, \ a_{c12} = 0 \\ a_{c21} &= (b_{P12}a_{P21} + b_{P22}a_R - b_{P22}a_{P11})/b_{P12} \\ a_{c22} &= (b_{P12}a_{P22} - a_{P12}b_{P22})/b_{P12} \\ B_C^T &= [b_R(b_{P21}b_{P12} + b_{P22}b_R - b_{P22}b_{P11})/b_{P12}] \\ C_C &= [(a_R - a_{P11})/b_{P12} - a_{P12}/b_{P12}] \\ D_C &= (b_R - b_{P11})/b_{P12}\end{aligned}\quad (8)$$

ただし、 a_{cij} 、 a_{Pij} 、 b_{Pij} はそれぞれ A_C 、 A_P 、 B_P の i 行 j 列の要素である。

(3) D^* 制御則⁵⁾

ブロック図を Fig. 2 に示す。 D^* をヨーレートと横加速度的線形結合

$$D^* = D\alpha + (1-D)V\dot{\psi} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (9)$$

と定義すると D^* のコントローラで発生される値 $\hat{D}^*$ の出力方程式は以下のように表わされる。

$$\hat{D}^* = C_P \hat{X}_p + D_P \delta_R + D_{PF} \theta \quad (10)$$

ここで

$$\begin{aligned}C_P &= [Da_{P21} + V Da_{P22}] \\ D_P &= Db_{P22}, \ D_{PF} = Db_{P21}\end{aligned}$$

$\hat{X}_p$ は X_p のコントローラで発生される値である。規範モデルの出力と $\hat{D}^*$ との誤差を、

$$e = \hat{D}^* - Y_r \quad (11)$$

Fig. 2 D^* -model following control system

と定義し規範モデルの入力 θ をステップと仮定すると以下の拡大系を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{X}_p \\ e \\ \dot{X}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_P & 0 & 0 \\ C_P & 0 & -c_R \\ 0 & 0 & a_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_p \\ e \\ \dot{X}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_P \\ D_P \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (12)$$

後輪舵角の制御則を、

$$\delta_R = K_1 \hat{X}_p + K_2 \int_0^t e dt + K_3 X_r - D_{PF}/D_P \theta \quad (13)$$

とすると K_1 、 K_2 、 K_3 はつぎの評価関数 J を最小にする最適制御ゲインとしてリカッチ方程式を解くことによって求めることができる。

$$J = \int_0^\infty (Qe^2 + R\delta_R^2) dt \quad Q \geq 0, \ R > 0 \quad (14)$$

ここで Q 、 R は重みである。

このとき、(3)、(4)式のコントローラの状態量および係数は以下ようになる。

$$\begin{aligned}X_C^T &= [\hat{X}_p^T \int_0^t e dt \ X_r] \\ A_C &= \begin{bmatrix} A_P & 0 & 0 \\ C_P & 0 & -c_R \\ 0 & 0 & a_R \end{bmatrix} + B_R C_C \\ B_C^T &= [b_{P11} - b_{P12} \cdot b_{P21}/b_{P22} \ 0 \ 0 \ b_R] \\ C_C &= [K_1 \ K_2 \ K_3] \\ D_C &= -b_{P21}/b_{P22}\end{aligned}\quad (15)$$

ただし、

$$B_R^T = [b_{P12} \ b_{P22} \ Db_{P22} \ 0]$$

(4) 横加速度制御則⁵⁾

D^* 制御則において $D=1$ とおくと横加速度制御則が得られる。

すでに実用化されている比例制御方式と比べ、以上に示した筆者らの提案する方式は操舵角に対し後輪を動的に操舵する、すなわち過渡特性を考慮していることが一つの特徴である。

3. 極配置の計算および計算機シミュレーション

車両実験に用いる四輪操舵車の諸元は、

$$\begin{aligned}K_F &= 45,372.92 \text{ N/rad} \\ K_R &= 74,405.52 \text{ N/rad} \\ L_F &= 1.122 \text{ m}, \ L_R = 1.428 \text{ m} \\ M &= 1,507 \text{ kg} \\ I_Z &= 2,205 \text{ Nms}^2 \\ N &= 17.6, \ D_S = 0.588 \text{ Nms} \\ I_S &= 0.061985 \text{ Nms}^2 \\ \xi &= 0.031 \text{ m}\end{aligned}$$

である。 D_S には摩擦を等価的に粘性に置き換えて含

ませた。

基本となる前輪操舵車（以下 2WS と略）の操舵角に対するヨーレート定常ゲインは

$$G_0 = V/44.9 \ (1 + 0.0019 V^2) \quad (16)$$

であり、これに対し比例制御（以下 prop. と略）の定数 D_c は操舵角に対するヨーレート定常ゲイン G が、

$$G = V/35.7 \ (1 + 0.0031 V^2) \quad (17)$$

となるように決めた。また以下の制御則ではヨーレート定常ゲインが G_0 または G である 2 通りの規範モデルを用いた。

ヨーレート制御 1（以下 $\dot{\psi}_{\text{cnt1}}$ と略）の規範モデル伝達特性は、

$$Y_r/\theta = G/(1 + 0.05 s) \quad (18)$$

ヨーレート制御 2（以下 $\dot{\psi}_{\text{cnt2}}$ と略）の規範モデル伝達特性は、

$$Y_r/\theta = G_0/(1 + 0.05 s) \quad (19)$$

D^* 制御 1（以下 $D^*\text{cnt1}$ と略）は、

$$Y_r/\theta = GV/(1 + 0.077 s) \quad (20)$$

D^* 制御 2（以下 $D^*\text{cnt2}$ と略）は、

$$Y_r/\theta = G_0 V/(1 + 0.077 s) \quad (21)$$

横加速度制御 1（以下 α_{cnt1} と略）は、

$$Y_r/\theta = GV/(1 + 0.1 s) \quad (22)$$

横加速度制御 2（以下 α_{cnt2} と略）は、

$$Y_r/\theta = G_0 V/(1 + 0.1 s) \quad (23)$$

である。ここで s は微分演算子である。

また評価関数 (14) における重み Q , R は

$$Q = 1.0, R = 1.0$$

としてある。

本研究でとりあげた閉ループの極を計算すると極の数は、前輪操舵車で 4 個、比例制御則を用いた場合 4 個、ヨーレート制御則を用いた場合 6 個、 D^* 制御則と横加速度制御則を用いた場合 8 個である。そのうちで自動車の運動に影響の大きいと考えられる共役な極の 1 個を Fig. 3 a, b に示す。

Fig. 3 a, b から時速 180 km/h 付近で前輪操舵車の極は安定限界に近づいているが、これに比べ四輪操舵車の極は実軸からの距離が大きいたことがわかる。また筆者らの制御則を用いると、車速による極の移動が少なくなりロバストであることがわかる。

Fig. 3 b から、筆者らの提案した後輪を動的に操舵する方式は、前輪操舵車と同じ定常ヨーレートゲインをもちながら、安定性を向上させることがわかる。また Fig. 3 a から比例制御と同じ定常ヨーレートゲインとした場合も、比例制御に比較し筆者らの方式は安定性の寄与度が大きいことがわかる。

Fig. 3 Pole location

Fig. 4 にこれらのモデルの「舵手放し安定性試験」のシミュレーション結果を示す。この試験は車両の自由応答特性を評価するものであり、直進している状態に操舵角によって初期値を与えてからステアリングハンドルを解放し車両の運動の収束性を調べるものである。後述する車両実験と条件を揃えるため、車速は 150 km/h, 初期の操舵角の入力パターンは、

$$\theta(t) = [\omega^2/(s + \omega)^2]u(t)$$

ただし、 $u(t) = 70 \text{ deg}$, $\omega = 2\pi \cdot 4$, $\theta(0) = 0$ とし、 $\theta(t) = 57 \text{ deg}$ でステアリングを解放するようにした。

Fig. 4 と Fig. 3 a とを比べると主要な極が虚軸か

Fig. 4 Free response at 150 km/h (simulation)

ら遠いほど運動の収束がよく、主要な極の位置と運動の収束のようすは対応していることが確かめられる。

ヨーレート制御, D^* 制御, 横加速度制御では、後輪舵角が操舵角に対し当初逆相になる点や、遅れてピークを示す点などに後輪を操舵角に対し動的に操舵する特徴が現われており、比例制御と比べるとより少ない後輪の操舵量でより速やかなヨーレートの収束が得られていることがわかる。

4. 車両実験

つぎに四輪操舵車を用いたテストコース上での車両実験を行った。この四輪操舵車 (Photo. 1) は後輪に

Photo. 1 4WS vehicle

油圧サーボ機構をもち、後輪は車載されたマイクロコンピュータの指令によって操舵される (Fig. 5, Photo. 2). マイクロコンピュータにはおのこの制御則がプログラミングされており 2 ms ごとに後輪の操舵角が演算される。前輪操舵車の特性は後輪舵角を常に零に固定して実現する。四輪操舵車の車両諸元は3章に示したとおりである。

Fig. 6 に「舵手放し安定性試験」の結果を示す。車速はシミュレーションと同じ 150 km/h とした。シミュレーション結果との一致は比較的良好で、モデルは実際の車両の特性を本質的には十分に表わしているということが出来る。シミュレーション結果との細かい不一致はモデルを次数の低い簡単なものとしたこと、また実験では初期の操舵角入力を完全に揃えることができないこと、などの理由によると考えられる。

Fig. 7 にヨーレート制御則の四輪

Fig. 5 Configuration of rear wheel steer angle control system

Photo. 2 Controller and hydraulic actuator

Fig. 6 Free response at 150 km/h (proving ground test)

Fig. 7 Crosswind stability test at 180 km/h (proving ground test)

操舵車と前輪操舵車との「横風安定性試験」の結果を示す。条件は車速 180 km/h, 横風帯の幅 12 m, 風速 22.5 m/s である。

操舵角を固定すると後輪は操舵されないで、四輪操舵車は前輪操舵車と同じ運動をする。しかしステアリングハンドルから手を放し、自動車の入力を操舵トルクとすると、四輪操舵のほうが横風を受けた場合の収れん性が大幅に向上していることがわかる。操舵角に対しフィードフォワード補償のみで後輪を操舵する

各方式は、自動車の横風外乱に対する安定性を改善するといえる。

またここでは示さないが、 ψ_{cnt2} , $D^{*}cnt2$, $\alpha cnt2$ についても「舵手放し安定性試験」で良好な収束性が確認されている¹²⁾。

5. ま と め

本論文では、操舵トルクを操舵入力とした四輪操舵車のモデルをつくり、フィードフォワード補償のみで後輪を操舵する 4 種類の制御則について、極配置の計算と計算機シミュレーションを行い、さらにこれらの制御則を組み入れた四輪操舵車を試作して車両実験を実施した。その結果つぎのことが明らかになった。

(1) 操舵トルクを操舵入力とすると、ヨーレートや横速度などの状態量が操舵角にフィードバックされるので、操舵角入力に対し設計されたフィードフォワード方式の四輪操舵制御系は自動車の極配置を変え、自動車を安定化し、外乱に対する収束性を改善する。

(2) 車両実験の結果と、計算機シミュレーションの結果とは比較的良好一致し、操舵トルク入力系としてみた自動車の平面運動を 2 次、ステアリング系を 2 次とした、簡単な近似モデルで安定性の解析が可能である。

(3) 筆者らの提案した後輪を動的に操舵する方式は、前輪操舵車と同じ定常ヨーレートゲインをもちながら、安定性を向上させることができる。また比例制御と同じ定常ヨーレートゲインとした場合も、比例制御より安定性への寄与度は大きい。

また、本研究で用いた四輪操舵車の車両実験を実施したドライバは、突風など外乱を受けても運転がしやすいことをコメントしており、自動車は操舵角だけでなく操舵トルクによって操舵されているものと考えられる。本論文では自動車固有の安定性について論じたが、今後人間-自動車系としての安定性を考察していきたい。

参 考 文 献

- 1) S. Sano, Y. Furukawa and S. Shiraishi: Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Angle, SAE Technical Paper Series, 860625 (1986)
- 2) 田中, 中本: マツダ車速感応型四輪操舵, 自動車技術会, 4 WS シンポジウム, June (1987)
- 3) Y. Fukunaga, N. Irie, J. Kuroki and F. Sugawara: Improved Handling and Stability Using Four-Wheel Steering, The 11th Int. Conf. on Experimental Technical Safety Vehicles, Washington D.C., U.S.A., May 12-15 (1987)
- 4) 中谷, 小口: 四輪操舵車の特性とその将来, 自動車技術, 39-1, 58/65 (1985)
- 5) 伊藤, 藤代, 川辺, 金井, 越智: 四輪操舵車の新しい制

- 御法, 計測自動制御学会論文集, **23-8**, 828/834 (1987)
- 6) 永井, 橋ヶ谷: 仮想モデルフロ잉制御による四輪操舵車の性能解析, 第 29 回自動制御連合講演会前刷, 517/518 (1986)
- 7) 井口雅一: 四輪操舵車の前・後輪協調制御方式に関する理論的研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 861, 159/164 (1986)
- 8) 林, 福井, 天野: 特性根による人間-四輪操舵車系の解析, 自動車技術会論文集, No. 36, 167/173 (1987)
- 9) M. C. Good: Effects of Free-Control Variable on Automobile Handling, Vehicle System Dynamics, **8-4**, 253/285 (1979)
- 10) 入江, 芝端: アクティブ制御による操縦安定性の向上, 自動車技術, **40-3**, 360/369 (1986)
- 11) K. Ito, T. Fujishiro, K. Kanai and Y. Ochi: Four Wheel Steering System Synthesized by Model Matching Control, IEE-IMEchE 6th Int. Conf. on Automotive Electronics No. 280, 237/241, London (1987)
- 12) 藤代, 伊藤, 金井, 越智: モデル追従と四輪操舵車, 自動車技術, **42-3**, 304/310 (1988)
-