操安方程式の非干渉化について

宮　部　道　夫

1．は　じ　め　に

車の横方向制御はスティアリングホイール一個の入力で行っている。しかし車の横方向運動には少なくとも横方向変位関係量と車体のヨー姿勢角関係量の２量は必須である。従って２量の干渉する制御操作では転舵と戻しが必要である。

操安性制御について，この２量の非干渉化を２次元モデルについて検討する。

2．非干渉化制御系

2．1　記号

A：システム行列

B：制御行列

C：出力行列

G(s)：伝達関数行列

G_d：非干渉系のフィードバック行列

H_d：非干渉系の制御行列

I：車両のヨー慣性モーメント

K_f，K_r：前，後輪コーナリングパワー

L：ホイールベース

l_f，l_r：重心より前，後車軸までの距離

U：制御ベクトル

u(t−τ)：単位ステップ関数

V：非干渉系の入力ベクトル

υ：車速

υ_1，υ_2：非干渉系の新入力要素

X：状態変数

Y：出力ベクトル

α_i：(２・７)の定義による

β：車両の重心点横滑り角

β_{ij}：非干渉系の極設定係数

γ：車両重心の進行方位角

δ_f，δ_r：前，後輪転舵角

ψ：車体軸方位角

$\dot{\psi}$：ヨーレイト

2．2　非干渉化の手順

m入力，m出力の可制御なシステム

$$\dot{X}=AX+BU \quad : \quad A(n\times n),\ B(n\times m) \qquad (2\cdot1)$$

$$Y=CX \quad : \quad C=(m\times n) \qquad (2\cdot2)$$

に対して新たな入力Vを考え，次のような状態フィードバックを行う。

$$U := G_d X + H_d V = -\underline{H_d}^{-1}\underline{G_d}X + \underline{H_d}^{-1}V \tag{2・3}$$

ここに

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{m1} & \cdots & C_{mn} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} \tag{2・4}$$

$$\underline{H_d} = \begin{bmatrix} C_1 A^{\alpha_1 - 1} B \\ \vdots \\ C_m A^{\alpha_m - 1} B \end{bmatrix} \tag{2・5}$$

$$\underline{G_d} = \begin{bmatrix} C_1 A^{\alpha_1} \\ \vdots \\ C_m A^{\alpha m} \end{bmatrix} \tag{2・6}$$

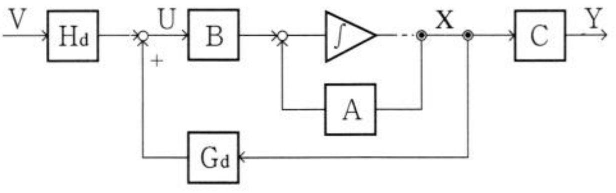

図2—1

$$\alpha_i = \min_j \{ j \mid C_i A^{j-1} B \neq 0 \, ; j = 1,2,\cdots n \} \tag{2・7}$$

極の設定はβ_{ik}を適当な値に設計して，

$$\frac{Y_i(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^{\alpha_i} + \beta_{i1} s^{\alpha_i - 1} + \cdots + \beta_{i\alpha i}} \tag{2・8}$$

即ち

$$y_i^{(\alpha i)} = -\beta_{i1} y_i^{(\alpha i - 1)} - \beta_{i2} y_i^{(\alpha i - 2)} - \cdots\cdots - \beta_{i\alpha i} y_i + v_i \tag{2・9}$$

となるように$y_i^{(\alpha i)}$を選ぶ。H_d，G_dは次のように定める。

$$H_d : H_d = \underline{H_d}^{-1} \tag{2・10}$$

$$G_d : (-H_d^{-1} G_d)_i = C_i A^{\alpha i} + \beta_{i1} C_i A^{\alpha i - 1} + \cdots\cdots + \beta_{i\alpha 1} C_i \tag{2・11}$$

このとき伝達関数G(s)は次のように対角化される。

$$G(s) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{s^{\alpha_1} + \beta_{11} s^{\alpha_1 - 1} + \cdots\cdots + \beta_{1\alpha 1}} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \dfrac{1}{s^{\alpha m} + \beta_{m1} s^{\alpha m - 1} + \cdots\cdots + \beta_{m\alpha m}} \end{bmatrix} \tag{2・12}$$

3．車体の運動式（車体固定座標）

3．1　運動式

質量m，慣性モーメントＩの車両が定速度υで進行しているときの運動を，重心点横滑り角β，ヨーレイト$\dot{\psi}$の２量で表すと，

$$m\upsilon\left(\frac{d\beta}{dt} + \dot{\psi}\right) = 2K_f\left(\delta_f - \beta - \frac{l_f \dot{\psi}}{\upsilon}\right) + 2K_r\left(\delta_r - \beta + \frac{l_r \dot{\psi}}{\upsilon}\right) \tag{3・1}$$

$$I\frac{d\dot{\psi}}{dt}=2l_fK_f\left(\delta_f-\beta-\frac{l_f\dot{\psi}}{\upsilon}\right)-2l_rK_r\left(\delta_r-\beta+\frac{l_r\dot{\psi}}{\upsilon}\right) \tag{3・2}$$

これより

$$\begin{bmatrix}\frac{d\beta}{dt}\\ \frac{d\dot{\psi}}{dt}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{2}{m\upsilon}(K_f+K_r), & -1-\frac{2}{m\upsilon^2}(l_fK_f-l_rk_r)\\ -\frac{2}{I}(l_fK_f-l_rK_r), & -\frac{2}{I\upsilon}(l_f^2K_f+l_r^2K_r)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{2K_f}{m\upsilon}, & \frac{2K_r}{m\upsilon}\\ \frac{2l_fK_f}{I}, & \frac{-2l_rK_r}{I}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_f\\ \delta_r\end{bmatrix} \tag{3・3}$$

従って

$$X:=\begin{bmatrix}\beta\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} \tag{3・4}$$

$$Y:=\begin{bmatrix}\beta\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} \tag{3・5}$$

$$A:=\begin{bmatrix}-\frac{2}{m\upsilon}(K_f+K_r), & -1-\frac{2}{m\upsilon^2}(l_fK_f-l_rK_r)\\ -\frac{2}{I}(l_fK_f-l_rK_r), & -\frac{2}{I\upsilon}(l_f^2K_f+l_r^2K_r)\end{bmatrix} \tag{3・6}$$

$$B:=\begin{bmatrix}\frac{2K_f}{m\upsilon}, & \frac{2K_r}{m\upsilon}\\ \frac{2l_fK_f}{I}, & -\frac{2l_rK_r}{I}\end{bmatrix} \tag{3・7}$$

$$U:=\begin{bmatrix}\delta_f\\ \delta_r\end{bmatrix} \tag{3・8}$$

$$C:=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{3・9}$$

と置けば上式は下式に纏まる。

$$\dot{X}=AX+BU \tag{3・10}$$

$$Y=CX \tag{3・11}$$

3．2　非干渉化

2．2節に従って非干渉化を進める。

$$C=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}:=\begin{bmatrix}C_1\\ C_2\end{bmatrix} \tag{3・12}$$

1）α_iの決定

$$C_1B=\left[\frac{2K_f}{m\upsilon},\frac{2K_r}{m\upsilon}\right]\neq(0,0) \tag{3・13}$$

∴

$$\alpha_1=1 \tag{3・14}$$

$$C_2B=\left[\frac{2l_fK_f}{I},-\frac{2l_rK_r}{I}\right]\fallingdotseq(0,0) \tag{3・15}$$

∴

$$\alpha_2=1 \tag{3・16}$$

2）伝達関数の設定

上の結果より，伝達関数行列の要素は１次遅れとなり，下式を設定する。

$$G(s):=\begin{bmatrix}\frac{1}{s+\beta_{11}} & 0\\ 0 & \frac{1}{s+\beta_{21}}\end{bmatrix} \tag{3・17}$$

3）H_dの決定

（２・11）より

$$(-H_d^{-1}G_d)_1=C_1A+\beta_{11}C_1=\left[-\frac{2}{m\upsilon}(K_f+K_r)+\beta_{11},\ -1-\frac{2}{m\upsilon^2}(l_fK_f-l_rK_r)\right] \tag{3・18}$$

$$(-H_d^{-1}G_d)_2=C_2A+\beta_{21}C_2=\left[-\frac{2}{I}(l_fK_f-l_rK_r),-\frac{2}{I\upsilon}(l_f^2K_f+l_r^2K_r)+\beta_{21}\right] \tag{3・19}$$

（２・５）より

$$\underline{H_d}=(C_iA^{\alpha i-1}B)=\begin{bmatrix}C_1B\\C_2B\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{2K_f}{m\upsilon}, & \frac{2K_r}{m\upsilon}\\ \frac{2l_fK_f}{I}, & -\frac{2l_rK_r}{I}\end{bmatrix} \tag{3・20}$$

ここで

$$|\underline{H_d}|=-\frac{4LK_fK_r}{mI\upsilon}\fallingdotseq0 \tag{3・21}$$

を確認してH_dが（２・10）に従い下のように求まる。

$$H_d=\underline{H_d}^{-1}=\begin{bmatrix}\frac{l_rm\upsilon}{2LK_f}, & \frac{I}{2LK_f}\\ \frac{l_fm\upsilon}{2LK_r}, & -\frac{I}{2LK_r}\end{bmatrix} \tag{3・22}$$

4）G_dの決定

$$-(H_d^{-1}G_d)\equiv\begin{bmatrix}-(H_d^{-1}G_d)_1\\-(H_d^{-1}G_d)_2\end{bmatrix} \tag{3・23}$$

∴

$$G_d=-H_d\begin{bmatrix}-(H_d^{-1}G_d)_1\\-(H_d^{-1}G_d)_2\end{bmatrix} \tag{3・24}$$

（３・22），（３・18），（３・19）によってこれを計算すると下式を得る。

$$G_d=\begin{bmatrix} 1-\frac{l_r m\upsilon}{2LK_f}\beta_{11}, & \frac{l_f}{\upsilon}+\frac{l_r m\upsilon}{2LK_f}-\frac{I}{2LK_f}\beta_{21} \\ 1-\frac{l_f m\upsilon}{2LK_r}\beta_{11}, & -\frac{l_r}{\upsilon}+\frac{l_f m\upsilon}{2LK_r}+\frac{I}{2LK_r}\beta_{21} \end{bmatrix} \qquad (3\cdot25)$$

以上より非干渉化の要素の値が確定する。

5）伝達関数G(s)の確認

伝達関数は（2・1），（2・2），（2・3）により

$$Y=CX=C(sI-A-BG_d)^{-1}BH_dV \qquad (3\cdot26)$$

よって

$$G(s)=C(sI-A-BG_d)^{-1}BH_d \qquad (3\cdot27)$$

これにC（3・9），A（3・6），B（3・7），G_d（3・25），H_d（3・22）を入れて計算を実行すれば

$$Y=\begin{bmatrix}\beta \\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=C(sI-A-BG_d)^{-1}BH_dV=\begin{bmatrix}\frac{1}{s+\beta_{11}}, & 0 \\ 0, & \frac{1}{s+\beta_{21}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\upsilon_1 \\ \upsilon_2\end{bmatrix} \qquad (3\cdot28)$$

即ち

$$G(s)=\begin{bmatrix}\frac{1}{s+\beta_{11}}, & 0 \\ 0, & \frac{1}{s+\beta_{21}}\end{bmatrix} \qquad (3\cdot29)$$

が確認される。

4．車体の運動式（対地座標）

4．1　運動式

図4—1のように車体軸方位角ψ，車両重心の進行方位角γを対地座標に取るとする。前，後軸の横滑り角β_f，β_rは

$$\beta_f=\psi+\delta_f-\gamma-\frac{l_f}{\upsilon}\frac{d\psi}{dt} \qquad (4\cdot1)$$

$$\beta_r=\psi+\delta_r-\gamma+\frac{l_r}{\upsilon}\frac{d\psi}{dt} \qquad (4\cdot2)$$

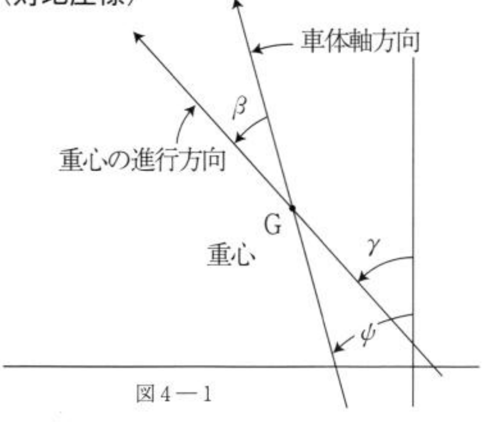

図4—1

よって$\gamma-\psi$系の表示で運動式は

$$m\upsilon\frac{d\gamma}{dt}+2(K_f+K_r)\gamma+\frac{2}{\upsilon}(l_fK_f-l_rK_r)-2(K_f+K_r)\psi=2K_f\delta_f+2K_r\delta_r \qquad (4\cdot3)$$

$$I\frac{d^2\psi}{dt^2}+\frac{2}{\upsilon}(l_f^2K_f+l_r^2K_r)\frac{d\psi}{dt}-2(l_fK_f-l_rK_r)\psi+2(l_fK_f-l_rK_r)\gamma=2l_fK_f\delta_f-2l_rK_r\delta_r \qquad (4\cdot4)$$

4・2　β−ψ 系の表示

$$\gamma=\psi+\beta \qquad (4\cdot5)$$

の関係を用いて（4・3),（4・4）を整理すれば，

$$\begin{bmatrix}\frac{d\beta}{dt}\\ \frac{d^2\psi}{dt^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{2}{m\upsilon}(K_f+K_r), & -\left\{1+\frac{2}{m\upsilon^2}(l_fK_f-l_rK_r)\right\}\\ -\frac{2}{I}(l_fK_f-l_rK_r), & -\frac{2}{I\upsilon}(l_f^2K_f+l_r^2K_r)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta\\ \frac{d\psi}{dt}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{2K_f}{m\upsilon}, & \frac{2K_r}{m\upsilon}\\ \frac{2l_fK_f}{I}, & -\frac{2l_rK_r}{I}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_f\\ \delta_r\end{bmatrix} \qquad (4\cdot6)$$

ここで３．２節で導いた非干渉化の条件を入れる。即ち

$$\begin{bmatrix}\delta_f\\ \delta_r\end{bmatrix}=U=H_dV+G_dX=H_d\begin{bmatrix}\upsilon_1\\ \upsilon_2\end{bmatrix}+G_d\begin{bmatrix}\beta\\ \frac{d\psi}{dt}\end{bmatrix} \qquad (4\cdot7)$$

これにH_d（3・22),G_d（3・25）を入れ，（4・6）に戻して整理すれば

$$\begin{bmatrix}\frac{d\beta}{dt}\\ \frac{d^2\psi}{dt^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\beta_{11} & 0\\ 0 & -\beta_{21}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta\\ \frac{d\psi}{dt}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\upsilon_1\\ \upsilon_2\end{bmatrix} \qquad (4\cdot8)$$

更に

$$\psi(t)=\int_0^t\frac{d\psi(\tau)}{d\tau}d\tau \qquad (4\cdot9)$$

として

$$\begin{bmatrix}\beta(s)\\ \psi(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{s+\beta_{11}}, & 0\\ 0, & \frac{1}{s(s+\beta_{21})}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\upsilon_1(s)\\ \upsilon_2(s)\end{bmatrix} \qquad (4\cdot10)$$

これを（4・5）で書き直せば，

$$\begin{bmatrix}\gamma(s)\\ \psi(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta(s)\\ \psi(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{s+\beta_{11}}, & \frac{1}{s(s+\beta_{21})}\\ 0, & \frac{1}{s(s+\beta_{21})}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\upsilon_1(s)\\ \upsilon_2(s)\end{bmatrix} \qquad (4\cdot11)$$

を得る。

5．応　　答　　性

5．1　新入力Ｖに対する転舵輪の応答

（2・3),（3・26),（3・27）より

$$U=G_dY+H_dV=\{G_dG(s)+H_d\}V \qquad (5\cdot1)$$

G_d（3・25）, G(s)（3・29）, H_d（3・22）を入れて表せば，

$$\begin{bmatrix}\delta_f\\ \delta_r\end{bmatrix}=\left\{\begin{bmatrix}1-\dfrac{l_r m\upsilon}{2LK_f}\beta_{11}, & \dfrac{l_f}{\upsilon}+\dfrac{l_r m\upsilon}{2LK_f}-\dfrac{I}{2LK_f}\beta_{21}\\ 1-\dfrac{l_f m\upsilon}{2LK_r}\beta_{11}, & -\dfrac{l_r}{\upsilon}+\dfrac{l_f m\upsilon}{2LK_r}+\dfrac{I}{2LK_r}\beta_{21}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{1}{s+\beta_{11}} & 0\\ 0 & \dfrac{1}{s+\beta_{21}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{l_r m\upsilon}{2LK_f}, & \dfrac{I}{2LK_f}\\ \dfrac{l_f m\upsilon}{2LK_r}, & -\dfrac{I}{2LK_r}\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}\upsilon_1(s)\\ \upsilon_2(s)\end{bmatrix} \quad (5\cdot 2)$$

これは新入力Vに対する転舵輪の応答を表す。Vに対してゲインが大きいと，アクチュエータの負担は問題となる。

5．2　Vに対する車体の応答

1）車体座標系

（3・28）よりv_1ステップ入力応答は

$$\begin{bmatrix}\beta\\ \dot\psi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{\beta_{11}}(1-e^{-\beta_{11}t})\\ 0\end{bmatrix} \quad (5\cdot 3)$$

同様にv_2ステップ入力応答は

$$\begin{bmatrix}\beta\\ \dot\psi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{1}{\beta_{21}}(1-e^{-\beta_{21}t})\end{bmatrix} \quad (5\cdot 4)$$

即ちv_1ステップ入力のとき重心横滑り角βは$1/\beta_{11}$を終値として1次遅れで立上り，ヨーレイト$\dot\psi$は0のままである。v_2ステップ入力ならβは0のままヨーレイトは$1/\beta_{21}$を終値として1次遅れで立上り，定常円旋回を志向する。

2）対地座標系

v_1ステップ入力の場合，（4・10）より

$$\begin{bmatrix}\gamma\\ \psi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{\beta_{11}}(1-e^{-\beta_{11}t})\\ 0\end{bmatrix} \quad (5\cdot 5)$$

即ち車体軸方向不変のまま重心は$1/\beta_{11}$を終値とする方位へ1次遅れで立上る。

v_2ステップ入力の場合は同様に

$$\begin{bmatrix}\gamma\\ \psi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix}\left\{\frac{1}{\beta_{21}}t-\frac{1}{\beta_{21}{}^2}(1-e^{-\beta_{21}t})\right\} \quad (5\cdot 6)$$

即ち$\gamma=\psi$となって時間と共に増加し直線$\dfrac{t}{\beta_{21}}-\dfrac{1}{\beta_{21}{}^2}$に漸近する。

5．3　逆問題

コースの条件などから出力が規制されるとき，入力Vの条件を逆に求めて見る。

１）車体軸座標

（３・28）より

$$\begin{bmatrix} \upsilon_1(s) \\ \upsilon_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s+\beta_{11}, & 0 \\ 0, & s+\beta_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{5・7}$$

障害物を横滑りのみで避ける場合を想定し，α，τを状況に則して選び下式のように置く。

$$\begin{bmatrix} \beta(s) \\ \dot{\psi}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\alpha}{s(s+\alpha)}(1-e^{-\tau s}) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5・8}$$

このとき（５・７）より

$$\begin{bmatrix} \upsilon_1 \\ \upsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11}-(\beta_{11}-\alpha)e^{-\alpha t}-\{\beta_{11}-(\beta_{11}-\alpha)e^{-\alpha(t-\tau)}\}u(t-\tau) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5・9}$$

このように出力側に２次の仮定をした場合υ_1はt＝０，τでステップ状操作を要する。

次にヨーレイトのみ操作してカーブをトレースする場合を想定し，下式を置く。

$$\begin{bmatrix} \beta(s) \\ \dot{\psi}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{\alpha}{s(s+\alpha)}(1-e^{-\tau s}) \end{bmatrix} \tag{5・10}$$

このとき入力動作は，同様に

$$\begin{bmatrix} \upsilon_1 \\ \upsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_{21}-(\beta_{21}-\alpha)e^{-\alpha t}-\{\beta_{21}-(\beta_{21}-\alpha)e^{-\alpha(t-\tau)}\}u(t-\tau) \end{bmatrix} \tag{5・11}$$

カーブの入口（t＝０）と出口近く（t＝τ）でυ_2に機敏な操作を要する。

２）対地座標

（４・10）より

$$\begin{bmatrix} \upsilon_1(s) \\ \upsilon_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s+\beta_{11}, & -(s+\beta_{11}) \\ 0, & s(s+\beta_{21}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma(s) \\ \psi(s) \end{bmatrix} \tag{5・12}$$

緩和部を持つ実際のコースで，γ或いはψの一定時間の継続を考えて見る。

a．車体方位不変のまま進行方位のみ一時変化：

出力の要請を

$$\begin{bmatrix} \gamma(s) \\ \psi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\alpha\beta}{s(s+\alpha)(s+\beta)}(1-e^{-\tau s}) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5・13}$$

とすれば入力操作は（5・12）より，

$$\begin{bmatrix} \upsilon_1 \\ \upsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11}+\dfrac{\beta(\alpha-\beta_{11})}{\beta-\alpha}e^{-\alpha t}-\dfrac{\alpha(\beta-\beta_{11})}{\beta-\alpha}e^{-\beta t}-\left\{\beta_{11}+\dfrac{\beta(\alpha-\beta_{11})}{\beta-\alpha}e^{-\alpha(t-\tau)}-\dfrac{\alpha(\beta-\beta_{11})}{\beta-\alpha}e^{-\beta(t-\tau)}\right\}u(t-\tau) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5・14}$$

とせねばならない。υ_2操作は不要である。

b．横滑り角0のまま車体方位を変えてカーブを通過する場合

α，β，τを状況に合せて選ぶことにより，出力の要請を下式のように置く。

$$\begin{bmatrix} \gamma(s) \\ \psi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{\alpha\beta}{s(s+\alpha)(s+\beta)}(1-e^{-\tau s}) \tag{5・15}$$

このとき入力要件は

$$\begin{bmatrix} \upsilon_1 \\ \upsilon_2 \end{bmatrix} = \frac{\alpha\beta}{\beta-\alpha}\begin{bmatrix} 0 \\ (\beta_{21}-\alpha)e^{-\alpha t}-(\beta_{21}-\beta)e^{-\beta t}-\{(\beta_{21}-\alpha)e^{-\alpha(t-\tau)}-(\beta_{21}-\beta)e^{-\beta(t-\tau)}\}u(t-\tau) \end{bmatrix} \tag{5・16}$$

このようにυ_1入力は常に0でよく，操作は直截簡明になる。

6．考　　察

1）操安性制御の出力に重心横滑り角β，ヨーレイト$\dot{\psi}$の2量は不可欠であって，これに呼応しして入力側に前・後輪操舵角δ_f，δ_rが用意出来れば，運動可能の領域は格段に拡大する。

即ちFWSでは1入力だから

$$(sI-A)X=Bu \quad 或いは \begin{bmatrix} s-a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21}, & s-a_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}\delta_f \tag{6・1}$$

と表すとき，βと$\dot{\psi}$の間には常に

$$\frac{\beta(s)}{(s-a_{22})b_1+a_{12}b_2} = \frac{\dot{\psi}(s)}{a_{21}b_1+(s-a_{11})b_2} \tag{6・2}$$

の制約が存在する。即ちβと$\dot{\psi}$とは互いに独立ではない。

2）しかし入力が2量となって出力数と等しくなれば非干渉化が可能となる。操作空間Uと状態量空間Xの間の写像f：U→X，f^{-1}：U←Xは全単射である。

3）制御行列B，出力行列Cが正則ならば（2・1），（2・2）のシステムで

$$Y=C(sI-A)^{-1}BU \rightleftarrows U=B^{-1}(sI-A)C^{-1}Y \tag{6・3}$$

これより出力に対して入力を1：1に辿ることが出来る。即ちこの場合での逆問題が解ける。（5・8），（5・10）で出力側に2次遅れを仮定したが，入力側ではステップ状の急速操作が混じっ

て来る。出力側1次遅れの仮定ならば，入力側にはδ関数を招来する。

コースの緩和曲線を見込んで緩やかな出力を想定しても，入力側は微分要素を遡行するので可成り俊敏な操作を要することが判る。実際にはコーナリングフォース，操舵系，サスペンションに更に遅れ要素が介在し，車体ロールも加わるため，運転者には更に機敏な操作を要する。

この場合非干渉化による対角行列伝達関数を持つことは，$v_1 \rightarrow \beta$，$v_2 \rightarrow \dot{\psi}$の直接的な対応となり，操作負担が軽減し同時に応答性が向上する。スティアリングコラムの左右傾角をβに，またスティアリングホイールの回転角を$\dot{\psi}$に対応させれば，操作は可能である。

4）実際問題としては，重心横滑り角β，ヨーレイト$\dot{\psi}$を検出するセンサ，大きい後輪転舵角δ_rを確保するアクチュエータと制御エネルギ，後部車体のスペースレイアウト等の問題がある。センサについては進歩したABSの貢献が大きい。

お わ り に

定速2次元モデルについて重心点横滑り角とヨーレイトを独立に制御する操縦系について検討した。この2量を1入力で制御するには運動の状態空間上に制約を課していることになる。この制約を払って，既に実用化されている駆・制動トルクの前後・左右分割機能と4輪操舵とを合せ，4輪各々の摩擦円を迅速に，最大に利用するように出来れば，走行安全性への寄与にも可能性が拡がると思われる。

参 考 文 献

白石昌武；入門現代制御理論，日刊工業新聞社，1995
小郷　寛，美多　勉；システム制御理論入門，実教出版，1979
安倍正人；自動車の運動と制御，山海堂，1992
岡本良夫；逆問題とその解き方，オーム社，1992