

コーナリング・ドライバモデル：車両運動力学と制御工学の両面から 曲線追従へ拡張された前方注視ドライバモデル (作動原理レベルにおける拡張)

酒井 英樹*¹

Cornering Driver Model: A Preview Driver Model Extended to Curve Following Based on Both Vehicle Dynamics and Control Engineering (Extension at Operating Principle Stage)

Hideki SAKAI*¹

The preview driver model (Kondo model) on which lane-keeping control is based was established for the analysis of “stability on straight lines driving.” As a result, deviations occur between the target course and the vehicle trajectory on curves. To eliminate this deviation, in this paper I first reconstruct the Kondo model suppose curves. I then improve this model from a control engineering perspective. As a result, I was able to construct a driver model in which the trajectory error is theoretically zero.

Keywords: Preview Driver Model, Driver Model, Course Angle, Feed Forward Control, Feed Back Control, Integral Control

1. はじめに

自動車を道路上で走らせるためには、カーブでハンドルを切らなければならない。その切り方を表わす数式をドライバモデル⁽¹⁾と呼ぶ。数多あるドライバモデルの中で、主に用いられるのは、近藤の提案した「前方注視モデル」とその発展形である。前方注視モデルとは、図 1 に示されるように、車両の L_p [m] 前方の仮想の点と目標コースとの差 ΔY_p に比例した舵角を生じさせるものであり、これによって目標直線上を安定して走行することが指摘されている^{(2) (3)}。発展形とは例えば、前方注視点を複数設定する⁽⁴⁾とか、比例定数の代わりにファジ制御のメンバーシップ関数を使う⁽⁵⁾とかである。しかし、広く使われている発展形は見当たらないので、ドライバモデルとは、一般に近藤の提案したモデル（以後「近藤モデル」）を指すと考えてよい。

このような近藤モデルの用途の一つに、自動運転の機能の一部である車線維持（とそのアシスト）制御がある。しかし、曲線部で目標コース上に車両を走行させるよう

にこの制御を開発するには「苦労」する旨の相談を、著者は自動車メーカーのエンジニアから相談を受けたことがある。

そこで、本論文では近藤モデルの曲線追従性能の抜本的改良を図る。本論文は、近藤モデルの直線における作動原理を曲線に拡張し、さらに制御工学的知見を加えて、良好な曲線追従が可能なモデルを構築する。

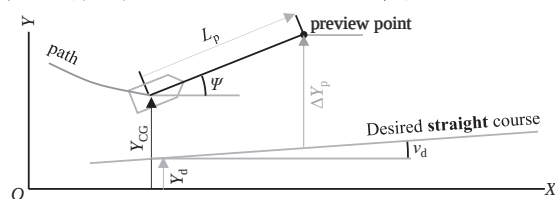


図 1. 前方注視モデル

2. 近藤モデル

2.1 近藤モデルの作動原理

近藤は、目標コース外の車両が目標直線路に向かい、最終的にその上を走り続けるモデルを提案した。その明示された作動原理は2つの要件からなる。

原稿受付 2024 年 12 月 1 日

*¹ 近畿大学工学部 ロボティクス学科 准教授, 次世代基盤技術研究所 准教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)
E-mail sakai@hiro.kindai.ac.jp

要件 1：目標直線上を直進しているとき、図 1 に示されるように、重心位置 Y_{CG} は目標直線上にある。

そのため、目標直線上に車両がない場合、目標直線上に乗せるための修正操舵が必要である。その操舵として、重心が目標コースから左 ($Y_{CG} > Y_d$) にあるとき、右にハンドルを切ることにして、この舵角 (の成分) δ_Y の式を近藤は

$$\delta_Y = -h(Y_{CG} - Y_d) \quad (1)$$

と想定した。ここで h は比例定数であり、単位は rad/m である。式(1)で操舵すると、車両軌跡の定常部分は振幅一定の正弦波になり、その周波数は h に依存する。応答を速くするために、この周波数を高くするには、 h を大きくすれば良い。

要件 2：目標直線上を直進しているとき、車両中心線の向き (ヨー角) ψ は目標直線路に平行である。

そのため、平行でない場合は、平行にするための修正操舵が必要になる。その操舵として、車両中心線が目標コースの向き v_d よりも左を向いたら ($\psi > v_d$)、右にハンドルを切ることにして、この舵角成分 δ_ψ の式を近藤は

$$\delta_\psi = -g(\psi - v_d) \quad (2)$$

と想定した。ここで g は比例定数であり、単位は rad/rad である。式(2)だけで操舵すると、その軌跡は指数関数によって表され、収束する。したがって、 g が大きいほど収束が速い。

式(1)～(2)から、目標直進に乗るための舵角 δ は

$$\delta = \delta_Y + \delta_\psi = -h \left[(Y_{CG} - Y_d) + \frac{g}{h} (\psi - v_d) \right] \quad (3)$$

と書ける。

式(3)においても、 h が大きいほど軌跡の固有振動数が大きくなり、 g が大きいほど目標直線への収束が速くなるため、振動が目立たなくなる (減衰が大きくなる)。

繰り返しになるが、式(3)の操舵によって、最初は目標コース外にあった車両が、最終的に目標直線上に乗り、その線上を走行し続ける。一定の状態へ収まることは、制御工学的には、安定平衡点への収束であり、これを「安定」と呼ぶ。

一方、式(3)の[]の項は、図 1 に示される距離 ΔY_p を意味し、これを「前方偏差」と呼ぶ。式(3)中の g/h の単位は m なので

$$L_p = \frac{g}{h} \quad (4)$$

と記し、 L_p を前方注視距離と呼ぶ。

前方偏差に比例して操舵するのは、ドライバが L_p 前方を注目しているからだと仮定し、さらに L_p 前方を「遠く」と表現すれば、「遠くを注目」するによって「安定」した走行が可能になると解釈できる^{(2) (3)}。これが近藤の主張であり、近藤モデルの本来の使用法であった。すなわち近藤モデルは「直線」における「安定性」において合目的であり、「曲線」における「軌跡」については言及されていないのである。

2.2 曲線路における近藤モデルの問題

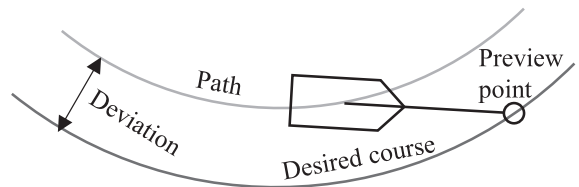
曲線路における近藤モデルの問題は、少なくとも 4 つある。

1 つは、操舵のタイミングが不適切なことである。例えば図 2(A) に示されるように、直進から曲線に侵入する際に、車両が曲線の L_p [m] 手前、つまり本来操舵すべき位置よりも手前で操舵をしてしまう。その対策として、井口は、前方偏差が生じた瞬間に操舵するのではなく、 L_p [m] 走行する間の時間だけ操舵を遅延させている⁽⁶⁾。

2 つ目の問題として、図 2(B) に示されるように、前方偏差がほぼ 0 のとき、一般に、車両は目標コースを通らないことを著者は指摘したい。



(A) 操舵開始位置と車両位置との乖離



(B) 前方注視点の軌跡と車両の軌跡との乖離

図 2 曲線における近藤モデルの問題点

これらの根本原因は FB 制御の作動原理にある。FB 制御のしくみは「偏差を使って、つまり偏差 $\rightarrow$ 0 (目標値 $\rightarrow$ 制御量) になるように制御」することである⁽⁷⁾。そのため近藤モデルでは前方偏差 $\rightarrow$ 0 になるように操舵するが、曲線で偏差を 0 にしたいのは前方注視点ではなく車両位置である。この矛盾が、曲線路で生じるのである。

この矛盾は、 g や h の設定でも顕在化する。曲線路で車両偏差を 0 にするためには、非 0 の特殊な前方偏差が

必要であり、その実現のために g や h を調整する必要がある。しかし前述の通り、 g は応答性、 h は収束性の調整を担っている。したがって応答性と収束性に偏差を加えた3指標を任意に設定するには、 g と h の2係数だけでは足りないのである。これが3つ目の問題点であり、第1章で紹介した「苦勞」の原因であろう（4つ目の問題点は5.5節で述べる。）

これらのように、曲線の目標コース上を狙って車両を走行させるために、本報告は式(3)を原理レベルから改良する。その際、人間のドライバの操作からドライバモデルを構築するのではなく、本論文はコースを目的として車両運動力学と制御工学の面からドライバモデルを構築する。

3. 近藤モデルの曲線への拡張

ここでは直線の目標コースを前提とした原理を、曲線目標に適応するように拡張する。

原理以前の前提として、曲線路では、車両前部の軌跡と後部の軌跡は一般に異なる。そのため、車両中心線上の1点又は2点だけしか目標軌跡に追従させられない。その位置の選び方は、用途によって異なる。例えば、車線追従制御では車両全長の中点付近が目標コース上にあることが望ましい。

そこで、目標コースに追従させる車両内の点を自由に設定するために、本報告では、追従させる位置を図3に示される後輪から x_r 前方の点 x_r として表わす。そして点 x_r を用いて要件1~2を次節で拡張する。

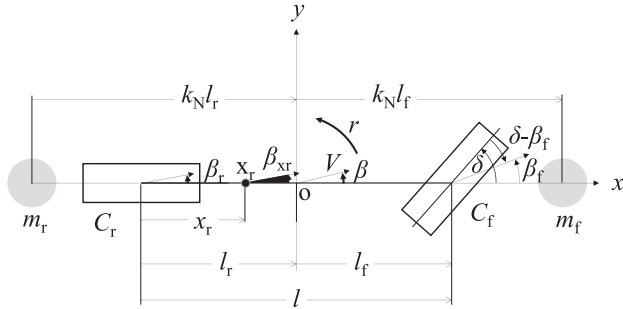


図3 点 x_r の定義と車両モデル (付録参照)

3.1 要件1の拡張

要件1の趣旨は、曲線でもそのまま成立つ。

要件1'：車両上の点 x_r が目標コース上を走行するとき、点 x_r は目標コース上にある。

そのため、目標コース上に車両がない場合、目標コースに乗せるために、左に逸れたら、右に操舵する。車両上の点 x_r の地上固定座標系における Y 座標を Y_{xr} 、 Y_{xr} 付近の目標コースの Y 座標を Y_d と記す。そして、この舵角成分 δ_Y を、

$$\delta_Y' = -h'(Y_{xr} - Y_d) \quad (1')$$

と想定しよう。ここで h' は係数であり、修正による走行軌跡の固有振動数（応答の速さ）に対応する。なお伝達関数 Y_{xr}/δ は、図3の線形2自由度モデルの場合、次のように表される。

$$\frac{Y_{xr}}{\delta}(s) = \frac{C_f}{k_N^2 l V} \frac{[(k_N^2 - 1)k_N^2 l_r + x_r]V s^2 + C_r x_r s + C_r V}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{1}{s^2} \quad (5)$$

この式の記号などは付録に記してある。

3.2 要件2の拡張

要件2には旋回姿勢を加味する必要がある。旋回中は、一般に車体横滑り角が生じるため、車両中心線の向きと車両上の点 x_r における速度ベクトルの向きとが異なるからである。ここで、点 x_r における車速ベクトルの向き（進路角） v_{xr} は、点 x_r における車体横滑り角を β_{xr} と記すと、

$$v_{xr} = \psi + \beta_{xr} \quad (6)$$

である。この v_{xr} を用いて、要件2を次のように拡張する。

要件2'：車両上の点 x_r が目標コース上を走行するとき、点 x_r の速度ベクトル v_{xr} の向きは、点 x_r での目標コースの接線の向きに一致する。

そのため、車両がコース上にない場合は目標コースに乗せるために、目標コースの接線よりも速度ベクトルが左を向いたら右に操舵する。

Y_{xr} 付近の目標コースの接線の向きを v_d と記し、この舵角成分 δ_v' を

$$\delta_v' = -g'(v_{xr} - v_d) \quad (2')$$

と想定する。 g' は比例定数であり、 g' が大きいほど減衰が大きくなる。

なお伝達関数 v_{xr}/δ は、図3の線形2自由度モデルの場合、次のように表される。

$$\frac{v_{xr}}{\delta}(s) = \frac{C_f}{k_N^2 l V^2} \frac{[(k_N^2 - 1)k_N^2 l_r + x_r]V s^2 + C_r x_r s + C_r V}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{1}{s} \quad (7)$$

3.3 前方偏差の拡張

誤差修正を担当する要件1~2は、式(1')と式(2')とから、

$$\begin{aligned} \delta_{FB} &= \delta_Y' + \delta_v' = -h'(Y_{xr} - Y_d) - g'(v_{xr} - v_d) \\ &= -h' \left[(Y_{xr} - Y_d) + \frac{g'}{h'} (v_{xr} - v_d) \right] \quad (3') \end{aligned}$$

と書ける.

この[]内の項は, 図4に示される $\Delta Y_p'$ を意味する.
すなわち

$$\Delta Y_p' = (Y_{xr} - Y_d) + \frac{g'}{h'}(v_{xr} - v_d) \quad (8)$$

である. これが曲線追従に拡張された前方偏差である.
この式中の分数項は, 曲線追従における前方注視距離 L_p'
であり,

$$L_p' = \frac{g'}{h'} \quad (4')$$

である.

なお, 図4には, 近藤モデルを曲線に適用した藤井⁽⁸⁾の
前方偏差 ΔY_p も示してある (ただし $g=g'$ かつ $h=h'$ の場合
である).

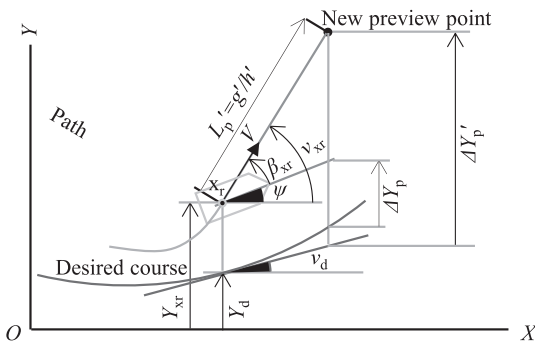


図4 要件1'と2'

3.4 制御系の形式

式(1')は比例制御(P制御)を意味する. その右辺($Y_{xr} - Y_d$)は目標値と制御量(車両応答)との偏差であり, h' は比例定数だからである.

位置 Y は角度 ψ と関係がある. 車両の進路角 v_{xr} に車速 V を乗じた $v_{xr}V$ が, 車両上の点 x_r の速度ベクトルになる. これを積分する($1/s$ を掛ける)と式(5)になる. したがって Y_{xr} の微分は v_{xr} に比例する. 同様に目標コース Y_d の微分はその接線の向き v_d に比例する. したがって式(3')はこう書ける.

$$\delta = -h' \left(1 + \frac{L_p'}{V} s \right) (Y_{xr} - Y_d) \quad (3')$$

ここで s はラプラス演算子である. 式(3')は位置 Y_{xr} のPD(比例微分)制御である.

これは広い意味でのPID制御の一種である. PID制御の

バリエーションの一つは, 目標波形に応じた積分の設定である⁽⁷⁾.

4. 制御工学的拡張

この章では制御設計⁽⁷⁾のプロセスに基づいて式(3')を吟味し, 必要に応じて拡張する. 制御設計とは, 制御系の使用目的や制御対象の性質に応じたカスタマイズであり, そのバリエーション選択には, 目標値の波形が影響する.

4.1 目標コース

制御系を設計する上で, 目標値の時系列波形を想定することが推奨されている⁽⁷⁾. そこで, 図5に示される曲率($=1/\text{半径}$) ρ_d のコースを想定する. このコースは直線→緩和曲線(クロソイド曲線)→定常旋回部の順に変化する.

4.2 制御系の選択

変化する目標値に追従させるためには, ①FF制御単体または②2自由度制御系(FF制御+FB制御)が適する⁽⁷⁾.

この場合は②が適する. なぜなら, 式(3')はFB制御があるので, これを使うと必然的に②になるからである.

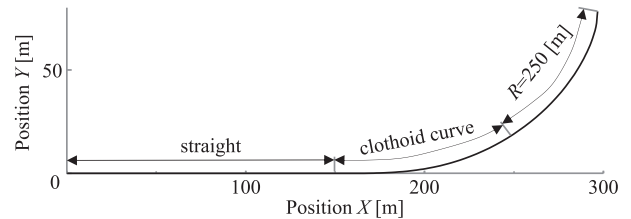


図5 想定走行コース

4.3 FB制御部の設計

図5に示される目標値の定常旋回部は, 円弧であり, その微小区間は2次関数で表すことができる. したがって, 地上固定座標系の取り方によっては, 目標コース Y_d は局所的に $Y_d \propto t^2$ と書ける. このような2次関数の目標値は, 制御工学では定加速度入力と呼ばれる.

定加速度入力下の定常応答の偏差(定常偏差)を無くすには直列積分が3個含まれる3型サーボ系が必要⁽⁷⁾だから, 曲線路での近藤モデルを3型サーボ系として構成することが制御設計の基本に則している. 応用編としては, 2型サーボにして応答を速め, 過渡部での誤差を減らすほうが得策な場合もある⁽⁷⁾が, 本研究では, 基盤研究として基本を重視して3型サーボ系を選定する.

なお緩和曲線部での定常偏差も0にするには4型サーボ系が必要だが, 緩和曲線区間は一般に2秒程度だろうから, このような短時間の定常偏差を0にすることと引

換に、過渡応答を遅らせる必要性は薄い。したがって 3 型サーボ系が最善手であろう。

サーボ系の型は、制御部と制御対象とに含まれる積分で決まる。式(5)には積分が 2 つ ($1/s^2$) が含まれるから、2 型サーボ系である。そこで 3 型サーボ系にするために、積分を 1 つ追加する必要がある。そこで、位置の偏差 $Y_{xr} - Y_d$ の積分に比例した舵角成分を加える。

その比例係数を k とすると、この FB 制御の舵角成分 δ_{FB} は

$$\begin{aligned}\delta_{FB} &= -h' \left(1 + \frac{Lp'}{V} s \right) (Y_{xr} - Y_d) - k \frac{Y_{xr} - Y_d}{s} \\ &= -h' \left(1 + \frac{Lp'}{V} s + \frac{1}{T_I} \frac{Y_{xr} - Y_d}{s} \right) (Y_{xr} - Y_d) \quad (9)\end{aligned}$$

となる。ここで

$$\frac{1}{T_I} = \frac{k}{h} \quad (10)$$

である。 T_I は h で正規化した k であり、積分時間 τ と呼ばれ、単位は s である。 T_I が小さいほど、早く定常偏差がなくなる。式(9)の制御を PID 制御と呼ぶ。

この PID 制御の計算例を図 6~7 に示す。半径一定区間の定常状態において、式(9)は目標コースに一致する。したがって、3 型 FB 制御系は原理通りに作動していることが分かる。

なお、近藤モデルである式(3)は 2 型サーボのため、半径一定部の定常応答において誤差（位置偏差と呼ばれる定常偏差）がある。結果は省略するが、この誤差は 2 型サーボ系の式(3)でも生じる。

このように式(9)が 2 自由度制御系の FB 制御部になる。

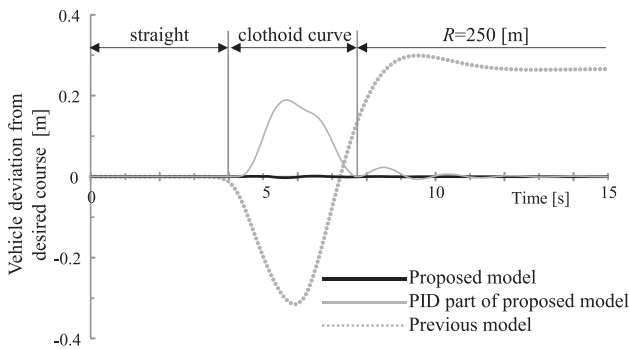


図 6 目標コースに対する車両軌跡の偏差の時刻歴応答

4.4 FF 制御部の設計

FF 制御とは目標値だけを使って操作量を決める制御である ω 。この場合、目標値は曲率であり、操作量は舵角

である。

この舵角成分 δ 、舵角 δ に対する車両上の点 x_r の走行軌跡の曲率 ρ_{xr} の伝達関数を $G(s)$ と記すと、

$$\delta_{FF} = \frac{1}{G(s)} \rho_d \quad (11)$$

である。 ρ_d は目標コースの曲率である。 $G(s)$ は、図 3 の線形 2 自由度モデルの場合

$$G(s) = \frac{\rho}{\delta}(s) \quad (12)$$

$$= \frac{C_f}{k_N^2 l V^3} \frac{[(k_N^2 - 1)k_N^2 l_r + x_r] V s^2 + C_r x_r s + C_r V}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

である。（式(13)は、舵角に対する x_r における横加速度の伝達関数を V^2 で割ることによって導かれる。）

式(11)の逆関数である $1/G(s)$ の相対次数 η は 0 だから、伝達関数 $1/G(s)$ を部分分数に分解すると、厳密にプロパー（分母の s の次数 > 分子の s の次数）な伝達関数と比例項との組合せで表現できる。そのため微分せずに式(11)をリアルタイムに計算できる（より正確に言えば「因果律に反せずに計算できる」）。

また一般に ω_n も ζ も正だから、この $1/G(s)$ に不安定零点はない。

したがって、式(11)と式(13)との組合せのままで FF 制御として機能する。

図 6~7 には、式(11)だけで操舵した結果も示されている。図 6 から有意な偏差はない（ごく僅かな誤差は、第 5 章で議論する。）

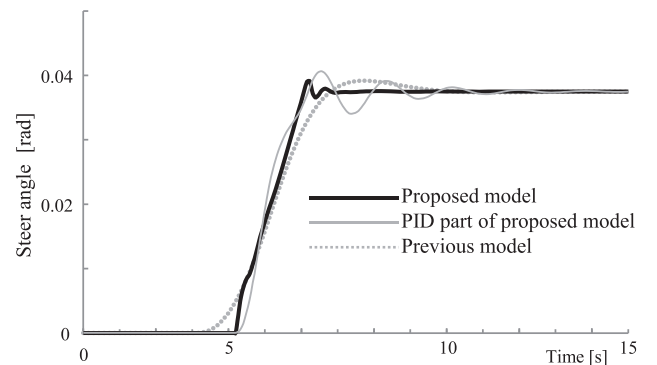


図 7 舵角の時刻歴応答

4.5 2自由度制御系化

このFF制御部とFB制御部との組合せが、2自由度制御系の操舵方程式になる。すなわち

$$\delta = \delta_{FF} + \delta_{FB} \quad (13)$$

である。この式による計算結果は、図6～7に示されているFF制御と区別がつかなかったの、これらの図には載せていない。したがって、この偏差はほぼ0である。

5. 考察

5.1 コース追従精度

このFF制御部は、制御対象の完全な逆モデルなので直線・曲線に対して理論上、偏差0で追従できる。車両上の点 x_r の走行軌跡の曲率 ρ は、式(11)に式(12)を代入することで

$$\rho = \delta_{FF} G(s) \quad (14)$$

となる。この式に式(11)～(12)を代入すると、

$$\rho = \rho_d \quad (15)$$

となるので、車両軌跡の曲率は目標コースの曲率と一致する。また車両上の点 x_r の進路角 v は

$$v = \frac{\rho V}{s} \quad (16)$$

だから、この式に式(15)を代入すると

$$v = \frac{\rho_d V}{s} = v_d \quad (17)$$

となり、目標の進路角に一致する。さらにまた車両上の点 x_r の地上の位置 Y は

$$Y = \frac{v V}{s} = v_d \quad (18)$$

であり、式(17)を代入すると、

$$Y = \frac{v_d V}{s} = Y_d \quad (19)$$

となるので、目標位置に一致する。

このように、曲率と進路角、位置が全てにおいて目標コースと車両軌跡は一致する。そこでこのモデルを「コーナリング・ドライバモデル」(Cornering driver-model)と命名する。

5.2 計算精度

式(14)～(19)のように、ラプラス変換を使うと式(19)が成り立つので、数値計算による図6に現れているごく

僅かな偏差は数値計算に起因するものである。この意味での誤差は、コーナリング・ドライバモデルでも排除することができない。

5.3 適用範囲

式(14)～(19)の数値計算はインパルス入力の場合、不都合が生じる。ラプラス変換では単位インパルスを積分すると単位ステップになるが、数値的にはそうではないからである。そのため、インパルスを含む曲率目標値やそれ以上に s の高次の波形に対して、このモデルは完全には追従できない。

曲率波形がインパルスの場合、進路角波形はステップ(不連続)、位置波形はランプ状である。これよりも s が1つ高次の場合、進路角波形がインパルス、位置波形がステップ(不連続)であり、2つ高次の場合、位置波形がインパルスである。これらを含む目標コースには追従できない。

逆に、走行可能なのは曲率波形がステップ(進路角波形がランプ)かそれよりも低次の波形である。曲率波形がステップなコースとは、直線からいきなり(緩和曲線なしで)半径一定になるコースである。1つ低次なのは図5のクロソイドのように曲率波形がランプのコースである。

5.4 モデル化誤差・外乱

車両モデルと実際の車両との差や、FF制御部のモデルに含まれない誤差に起因する、目標コースからの車両の偏差は、モデルを使わないFB制御(PID)部が抑制する。このFB制御部は3型サーボのため、図6に示されるように、半径一定の旋回部の定常応答において偏差が0になる。この効果は、車両モデルに誤差があっても有効である。なお近藤モデルは2型サーボ系のため、車両位置偏差も前方位置偏差も0にはならない。

3型サーボは外乱についても、効果がある。計算結果は省略するが、道路横断勾配(カント)の斜面に沿った重力の分力が車両に働く場合、2型の近藤モデルは、半径一定の定常状態において、時間に比例して目標コースに対する偏差が増加する。一方、このモデルでは、偏差は非0の一定値である。

5.5 近藤モデルとFF制御部との干渉

コーナリング・ドライバモデルがコースに完全に追従できるのは、式(11)～(13)によるFF制御部だけの効果であり、FB制御部は、何らかの要因で車両が車線中央にならない場合、車線中央への修正だけをおこなう。このように曲線への追従へはFF制御部「だけ」が、車線中央への修正はFB制御部「だけ」がおこなう。このようにコーナリング・ドライバモデルでは役割分担がなされている。

もしこのFB制御に近藤モデルを使うと、完全追従はで

きなくなる．近藤モデルの前方偏差（図4の ΔY_p ）には曲線の曲率の影響が含まれるため，車線中央への修正だけではなく，曲線への追従もする．そのため，FF 制御部があるばあい，曲率をダブルカウントして，舵角が過剰になってしまう．その結果，図8に示されるように，FF 制御があっても目標コースに対する車両偏差は0にならないのである．

したがってFF制御部と組合せる場合のFB制御部には，式(3')を用いることが望しく，近藤モデルを使うべきではない．このように，近藤モデルとFF制御との組合せによる干渉が，2.2節で述べた近藤モデルの曲線路における問題点の4つ目だったのである．

ただし，4つの問題は，近藤モデル自体に起因するのではなく，曲線路に適用する「目的外使用」に起因する．

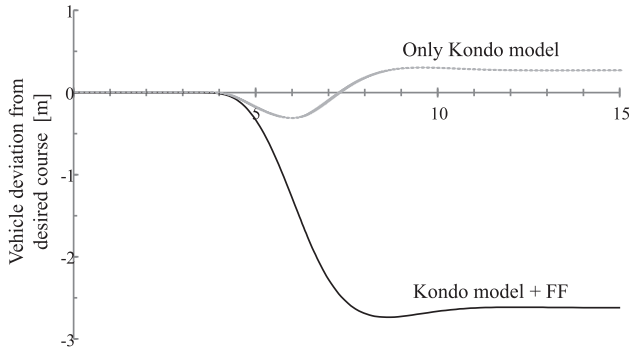


図8 FF制御部と近藤モデルとの干渉

6. まとめ

本論文は，直線における安定性を論じるための近藤モデルの作動原理を曲線に拡張した上で，制御工学的な視点から制御系を設計することで，曲線路に完全に追従する「コーナリング・ドライバモデル」を導いた．この研究が自動運転やレーンキープアシスト制御等に貢献できれば幸甚である．

参考文献

- (1) 酒井英樹，自動車運動力学～気持ちよいハンドリングのしくみと設計～，森北出版(2015-12)，pp.39-195
- (2) 近藤政市，自動車技術講座：自動車の安定性・操縦性・運動性(3)，自動車技術，7巻8号(1953-8)，pp.206-209
- (3) 近藤政市，自動車の操舵と運動間に存在する基礎的關係について，自動車技術会論文集，5巻(1958-4)，pp.41-43
- (4) Ungoren,A.Y. and Peng,H., "An Adaptive Lateral Preview Driver Model", *Vehicle System Dynamics*,

Vol. 43, No. 4, pp. 245-259.

- (5) Ungoren,A.Y. and Peng,H., "A Preview Driver Model Based on Sliding Mode and Fuzzy Control for Articulated Heavy Vehicle", *Meccanica, An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 1853-1878, doi.org/10.1007/s11012-022-01532-6, Sep. 2022.
- (6) 井口雅一，ほか2名，模擬自動車による運転者の制御動作の基礎的研究，自動車技術会論文集，7巻(1960-4)，pp.1-7
- (7) 酒井英樹，11 ステップ制御設計，森北出版(2021-3)，pp.1-195
- (8) 藤井澄二，自動車の操縦性と人間工学，人間工学，1巻2号(1965)，pp.1-7

付録A 車両モデルとその記号

A.1 車両モデルとその記号

図3のモデルの補助式は次の通りである．

$$m_f = \frac{l_f}{l} m \quad (A1)$$

$$m_r = \frac{l_r}{l} m \quad (A2)$$

$$C_f = \frac{2K_f}{m_f} \quad (A3)$$

$$C_r = \frac{2K_r}{m_r} \quad (A4)$$

$$I_z = k_N^2 m_f l_f^2 + k_N^2 m_r l_r^2 = k_N^2 m l_f l_r \quad (A5)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{C_r + \left(\frac{C_f l}{V^2} - 1\right) C_f}{k_N^2 l}} \quad (A6)$$

$$\zeta \omega_n = \frac{\frac{l_f + k_N^2 l_r}{l} C_f + \frac{k_N^2 l_f + l_r}{l} C_r}{2 k_N^2 V} \cong \frac{C_f + C_r}{2 k_N V} \quad (A7)$$

$$T_r = \frac{V}{C_r} \quad (A8)$$

図3に示されるように後輪よりも前方の点 x_r における横滑り角を β_{x_r} とする．点 x_r における進路角 ψ_{x_r} は $\psi_{x_r} = \beta_{x_r} + \psi$ と表わされ， $\psi = dl/s$ である．

A.2 記号

C : 加速度次元の等価コーナリング係数

($C_f=100$, $C_r=200$ [(m/s²)/rad])

F : コーナリングフォース

I_z : ヨー慣性モーメント

K : 等価コーナリングパワ

k_N : ヨー慣性半径係数 ($\cong 1$)

k_N^2 : ダイナミックインデックス (≈ 1)

l : ホイールベース (2.5[m])

l_f : 前輪～重心間距離 (1.25[m])

l_r : 前輪～重心間距離 (1.25[m])

m : 車両質量

m_f, m_r : 前後輪負担質量

R : 定常旋回における旋回半径

r : ヨーレート

s : ラプラス演算子

t : 時刻

V : 重心位置車速

θ : 重心位置 (車体) 横滑り角

θ_{xr} : x_r 位置の車体横滑り角

ω_h : ヨー固有振動数

ψ : ヨー角

ζ : ヨー減衰比

$\zeta\omega_h$: ヨー速応性