可変フィードバックゲインを用いた車両の目標動特性設計方法の提案*

風間 恵介^{*1}, 孕石 泰丈^{*2}, 毛利 宏^{*2}

A Method to Design a Target Vehicle Dynamics by Using Variable Feedback Gain

Keisuke KAZAMA^{*1}, Yasutake HARAMIISHI and Hiroshi MOURI^{*1} University of Yamanashi, Graduate School of Medical and Engineering Department of Education
4-3-11, Takeda, Kofu-shi, Yamanashi, 400-8511 Japan

This paper describes an investigation of filter to design a relationship of gain and phase delay. In a linear system, gain and phase delay are deeply related. So, if the phase delay is reduced, the gain of high frequency range is increased unnecessarily. We clarified that an increase of high frequency gain makes ease of driving worse, by using non-linear filter that can design characteristics of gain and phase delay independently. When considering a practical use, it is necessary to propose new filter to be able to change this relationship easier and to evaluate filter's performance analytically. In this investigation, we proposed two kinds of filters. We have studied how gain and phase delay of yaw rate corresponding to steering angle input affect on ease of driving, from subjective rating and identification of driver dynamics on lane change task. We verified that ease of driving can be improved by shaping phase delay and high frequency gain properly to the driver's characteristics.

Key Words : Man-Machine Interface, Steering System, Vehicle Maneuverability, Nonlinear Control, Driving Simulator

1. 緒 言

一般に線形系では、位相遅れが小さいと高周波ゲインが大きいという不可分の関係が存在する。人と自動車の間には人間-機械系のフィードバック制御系が構成されており、「クロスオーバーモデル」の成立が知られている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。高周波ゲインの増大は、人と自動車が構成する系の速応性や安定性を劣化させ、自動車の運転しにくさにつながると考えられる。また位相遅れには最適値があり、大きすぎても小さすぎても運転しにくくなるという報告もある⁽⁵⁾。この要因も高周波ゲインの増大にあると推察できる。四輪操舵システムや直接ヨーモーメント制御などを用いた車両の目標性能の議論⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾では、運転しやすくするためにヨーレートや横加速度を単純な一次遅れ系とする場合が多く、それに伴う“高周波ゲインの増大”の影響を扱った議論は見当たらない。

筆者らは、ゲインには最適値があるものの、位相遅れはゼロが最も扱いやすいと考えた。そして位相に影響を与えずにゲインだけに作用する非線形フィルタを提案した⁽¹²⁾。このフィルタは信号の時間変化率を周波数に代用し、周波数感応の係数テーブルを用いて係数を設定して、この係数を出力信号に乗じて信号の振幅だけを変化させるフィルタである。このフィルタの性能をドライビングシミュレータによる被験者実験で評価した結果、高速走行時では車両応答の位相遅れ、高周波ゲインは両者とも単純に小さいほうが運転しやすくなることがわかった。

しかし、上述のフィルタには二つの実用上の課題がある。一つは非線形であるために周波数応答などのツールが使えず、性能の解析的評価が難しいこと。もう一つは設計自由度が高いものの、フィルタ設計に試行錯誤が必要になることである。

そこで本研究では、改めてゲインと位相の関係に注目して、より簡単にゲインと位相の関係が変更でき、性能解析が容易なフィルタを提案し、その設計方法について述べる。また位相遅れの低減に対して、高周波ゲインの

* 原稿受付 2013 年 4 月 15 日

^{*1} 学生員, 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4 丁目 3-11)^{*2} 正員, 山梨大学 医学工学総合研究部

E-mail: hmohri@yamanashi.ac.jp

増大をどの程度抑制することで運転しやすさが向上するのかを明らかにする。

2. フィルタの提案

2・1 提案フィルタの設計概念および原理

文献(12)で示したフィルタについて改めて解説するとともに、それとは設計概念の異なる2種類のフィルタを構築し、その概念と原理について述べる。

① HMI (Human Machine Interface) フィルタ

図1に示すHMIフィルタは「位相遅れを一定に保ったまま、高周波ゲインを小さくする」ことを目標とした、文献(12)で提案したフィルタである。人間と機械を上手につなぐインターフェースの実現を目指し、Human Machine Interface の頭文字から「HMI フィルタ」と名付けた。

ゲインは入力に対する出力の倍率であるから、これに適当な係数を乗ずればゲインの変更は可能である。その係数を周波数に応じて設定できればゲインの周波数整形が可能になると考え、図1(a)の構成とした。HMIフィルタは入力信号の時間変化率を求める部分 (HPF: High Pass Filter) とその時間変化率に応じて係数を設定する部分 (Gain table, LPF: Low Pass Filter) の2つで構成されている。入力信号の時間変化率 (=速度) を周波数と考え、それに応じた係数を図1(b)に示す係数テーブルから出力する。係数テーブルのパラメータ k_{upper} , k_{lower} , ω_{lower} , ω_{upper} は人間のフィーリングで決定するため、設計には試行錯誤が必要である。本例では出力値を1以下とし、必ず入力信号を小さくするものとなっている。入力信号にその係数を乗じるだけなので位相に影響を与えない。また、係数の急変を抑制するためにLPFを付加した。

Fig.1 System of HMI Filter

② VFG (Variable Feedback Gain) フィルタ

VFGフィルタの目標は「ゲインを一定に保ったまま、位相遅れを小さくする」ことである。図2に示すベクトル線図から、VFGフィルタの設計思想を説明する。式(1)に示す一次遅れ系の伝達関数のベクトル軌跡は、図2中の破線で示す半円状になる。

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (1)$$

図2(a)の実線は0.1~10Hzの周波数帯におけるSlow LPF (カットオフ周波数1Hz)のベクトル軌跡であり、(b)の実線は同帯域におけるFast LPF (カットオフ周波数5Hz)のベクトル軌跡である。一次遅れ系のベクトル軌跡はすべて同じ半円状となるが、各周波数でのベクトルの位置はカットオフ周波数に依存する。図2中の矢印は5Hzでのベクトルを示しており、(a)のSlow LPFではゲインが小さいものの、位相遅れが大きいことがわかる。(b)では位相遅れは小さいが、ゲインが大きい。このようにベクトル線図からも線形系のゲインと位相遅れの間に存在する不可分の関係が確認できる。

(c)は5Hz時のSlow LPFとFast LPFのベクトル軌跡を重畳したものである。白抜きの矢印のようにSlow LPFのゲインを一定に保ったまま、位相遅れはFast LPFと等しくなる目標特性 (Target vector) を実現するには、Slow LPFに位相進み要素 (Phase-lead element) を付加すればいい。つまりゲインが小さく、位相遅れは大きいLPFに、周波数に応じて変化する位相進み要素を付加しようというのが、VFGフィルタの思想である。

この思想を数学的に考えるために式(1)を以下のように変形し、ゲイン $|G(j\omega)|$ と位相 $\angle G(j\omega)$ を求めると式(2)となる。

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau_{\text{Slow}}s} = \frac{b}{s + a} \Rightarrow G(j\omega) = \frac{b}{j\omega + a} = \frac{ab}{a^2 + \omega^2} - j \frac{b\omega}{a^2 + \omega^2} \quad (a = b = 1/\tau_{\text{Slow}})$$

$$\therefore |G(j\omega)| = \frac{b}{a^2 + \omega^2} \sqrt{a^2 + \omega^2} = \frac{b}{\sqrt{a^2 + \omega^2}}, \quad \angle G(j\omega) = \tan^{-1} - \frac{\omega}{a} \quad (2)$$

周波数に応じて位相遅れを小さくしたい場合、式(2)の位相の式からフィードバックゲイン a を周波数に応じて大きくすればいい。同時にゲインを一定に保つ場合は、係数 b も周波数に応じて大きくすればいい。このように周波数に応じてフィードバックゲインを変化させることから、可変フィードバックゲイン；Variable Feedback Gain の頭文字をとって、「VFG フィルタ」と名付けた。

Fig.2 Concept of VFG Filter

Fig.3 System of VFG Filter

図3(a)にVFGフィルタの構成を示す。単純な一次遅れ系に、フィードバックゲインを変更する部分(HPF, Gain table)を付加した構成となっている。①で述べたHMIフィルタ同様、入力信号の時間変化率を周波数に代用するものとし、HPFによってその時間変化率を計算している。図3(b)の時間変化率に応じて変化する係数テーブルを用意し、フィードバックゲイン a と b を調整して位相遅れを小さくするものである。目標性能としてベースとなるSlow LPFのカットオフ周波数 f_{Slow} 、位相を改善したFast LPFのカットオフ周波数 f_{Fast} 、及びSlow LPFからFast LPFに遷移し始める周波数 ω_{lower} の3つが決定しているとき、係数テーブルは一意に設計できる。図3(b)を例に、係数テーブルの設計手順を以下に示す。

1. 縦軸の設定方法

- ・下限値 k_{lower} : 低周波でフィルタを作用させないので1とする。
- ・上限値 k_{upper} : 次式を用いて設定する。

$$k_{\text{upper}} = \frac{f_{\text{Fast}}}{f_{\text{Slow}}} \quad (\text{本例では } f_{\text{Slow}}=1\text{Hz}, f_{\text{Fast}}=5\text{Hz} \text{ より, } k_{\text{upper}}=5.)$$

2. 横軸の設定方法

- ・下限値 ω_{lower} : 目標性能(本例では人間の運転操作を想定して、0.5Hzとした)。
- ・上限値 ω_{upper} : 次式から設定する。

$$\frac{\omega_{\text{upper}}}{\omega_{\text{lower}}} = \frac{k_{\text{upper}}}{k_{\text{lower}}} = \text{const.} \Rightarrow \omega_{\text{upper}} = \frac{k_{\text{upper}}}{k_{\text{lower}}} \omega_{\text{lower}}$$

(本例では、 $k_{\text{upper}}=5$, $k_{\text{lower}}=1$, $\omega_{\text{lower}}=0.5$ より, $\omega_{\text{upper}}=2.5$.)

以上で係数テーブルに必要な4つのパラメータを一意に決定できる。

VFG フィルタの解析解の求め方を以下に示す. 図 3(a)の HPF をラプラス演算子 s , 係数テーブルを k と置き換え, 微分方程式は式 (3) となる.

$$\dot{y} = aki^2 u - bki^2 y \quad (3)$$

入力信号 $u(t) = Ae^{i\omega t}$ のとき, 式 (3) の微分方程式を解くと, 解析解は式 (4) となる.

$$e^{\frac{1}{2}A^2bk\omega e^{i\omega t}} y(t) = -i \frac{A^3ak\omega}{2(iA^2bk\omega)^{3/2}} \left(-2\sqrt{A^2bk\omega} e^{\frac{1}{2}A^2bk\omega e^{i2\omega t} + i\omega t} + \sqrt{2\pi} \operatorname{erfi} \left(\sqrt{iA^2bk\omega/2} e^{i\omega t} \right) \right) + C \quad (4)$$

③ 線形 HMI フィルタ

②で述べた VFG フィルタは, 周波数に応じて位相進み要素を付加するものであった. この位相進み要素を HPF と考え, 線形系だけで表現したものが「線形 HMI フィルタ」である.

図 4 にシステム構成を示す. 位相遅れの大きい Slow LPF と HPF を組み合わせることでノッチフィルタを構築する. ノッチフィルタを適用した周波数以降では出力される信号が減衰されないで, その出力信号に位相遅れの小さい Fast LPF をかけている. ここで構築されるノッチフィルタの特性は式 (5) のようになる.

$$N(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_2\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

ただし,

$$\zeta_1 = \frac{\tau_{\text{Slow}} + \tau_{\text{HPF}}}{\sqrt{\tau_{\text{Slow}}\tau_{\text{HPF}}}}, \quad \zeta_2 = \frac{\tau_{\text{HPF}}}{\sqrt{\tau_{\text{Slow}}\tau_{\text{HPF}}}}, \quad \omega_n = \frac{1}{\sqrt{\tau_{\text{Slow}}\tau_{\text{HPF}}}}$$

ノッチフィルタを上記のように用いることで, 特定の周波数帯域を遮断するためだけでなく, 段階的にゲインと位相の特性を変更する作用を持たせることができると考えた. 線形 HMI フィルタは線形系のため完全な周波数感応であり, 解析的に性能を評価できる. また②の VFG フィルタよりも簡単に設計が可能であり, 系の信頼性, ロバスト性についても解析的に評価できる. 目標性能であるノッチフィルタの減衰係数 ζ_1 , ζ_2 , 固有角振動数 ω_n は試行錯誤で決定する. 決定した目標性能と式 (5) から, 線形 HMI フィルタのパラメータである Slow LPF の時定数 τ_{Slow} , Fast LPF の時定数 τ_{Fast} , HPF の時定数 τ_{HPF} は自動的に決定できる. 本例では $\zeta_1=1.02$, $\zeta_2=0.83$, $\omega_n=1.20\text{Hz}$ ($=7.54\text{rad/s}$) とした. 上式から $\tau_{\text{Slow}}=0.16\text{sec}$, $\tau_{\text{Fast}}=0.03\text{sec}$, $\tau_{\text{HPF}}=0.11\text{sec}$ になる.

Fig.4 System of Linear HMI Filter

2・2 提案フィルタの原理確認

提案した 3 種類のフィルタについて, 振幅 1 の掃引正弦波を入力し, その動作を理想的な状態で確認した. 目標特性のゲインは Slow LPF (カットオフ周波数 1Hz), 位相遅れは Fast LPF (カットオフ周波数 5Hz) とした. 図 5 に 5Hz の正弦波信号入力時の時系列応答を示す. 図 5(a)において, 入力信号に対する Slow LPF の応答波形は振幅が小さくなるものの時間的に大きく遅れる. Fast LPF は, 遅れは小さいが振幅は大きくなっている. 2 つの応答波形から線形系に存在するゲインと位相遅れの間の不可分の関係が確認できる.

図 5(b)は, (a)に各提案フィルタの応答波形を重畳したものである. HMI フィルタの応答波形は, 振幅は Slow LPF にほぼ等しく, 遅れは Fast LPF と同等の性能を実現しており, 「位相遅れを一定に保ったまま, 高周波ゲインを小さくする」ことができています. VFG フィルタは, ベースとした Slow LPF に対して遅れが大幅に改善されて Fast LPF 同等となった. 一方で振幅は大きくなってしまったが, Fast LPF までは大きくない. なお係数テ

ブルを調整することで、振幅を低減できることも確認済みである。線形 HMI フィルタは Fast LPF よりも遅れが改善されており、振幅も VFG フィルタ同等となっている。

Fig.5 Time history to sinusoidal signal

図 6(a)に Slow LPF と Fast LPF の周波数応答を示す。こちらも位相遅れの低減に伴って高周波ゲインが大きくなるという、線形系に存在するゲインと位相の不可分の関係が確認できる。

図 6(b)には、(a)に提案した 3 種類のフィルタの周波数応答を重畳したものを示す。HMI フィルタの周波数応答は解析的に求めることができないので、入出力の時系列データを高速フーリエ変換処理することで求めた。HMI フィルタはゲイン特性が Slow LPF と、位相特性は Fast LPF と重なっており、周波数応答からも目標特性が実現されていることが確認できる。VFG フィルタの位相特性は 0.6Hz 付近から位相遅れが改善されはじめ、およそ 2Hz で目標特性に達している。そのときのゲイン特性は目標まで到達していないものの、Fast LPF のゲイン特性と比較すれば小さくなっている。線形 HMI フィルタは VFG フィルタ同様のゲイン特性である。位相特性は VFG フィルタよりも位相遅れが小さくなっており、目標特性である Fast LPF により近い特性となった。このように VFG フィルタと線形 HMI フィルタは、ゲインと位相の関係を局所的に変化させることができる。

(a) Relationship of linear systems (b) Frequency response of proposed systems

Fig.6 Comparison of frequency response

最後に、上述した 3 つの提案フィルタについて、その特徴をまとめる。

①HMI フィルタ：

- ・入力信号の周波数に応じた係数を設定して、入力信号にその係数を乗じることで、位相に影響を与えることなく出力信号の振幅を変化させる。
- ・フィルタ設計に試行錯誤が必要であり、信頼性、ロバスト性の確保が難しいなど、実用面で課題が残されている。

②VFG フィルタ：

- ・位相遅れの大きい一次遅れ系を基本に，入力信号の周波数に応じてフィードバックゲインに位相進み要素を付加することで，局所的にゲインと位相の特性を変化させる．
- ・フィルタ設計が容易であり，解析解から性能評価がしやすい．

③線形 HMI フィルタ：

- ・VFG フィルタの位相進み要素をノッチフィルタで再現し，VFG フィルタと同様，局所的にゲインと位相の特性を変化させる．
- ・線形系のみで構成されており，設計と性能解析が簡単に行える．

3. ドライビングシミュレータを用いた被験者実験

3・1 実験装置

提案した3種類のフィルタの効果を検証するために，自主製作したドライビングシミュレータを用いて被験者実験を行った．図7に実験で使用したドライビングシミュレータの構成図を示す．本装置はドライバの操舵角に応じて車両運動が計算され，視覚情報と操舵反力がドライバに与えられる．モーションの再現は行っていない．視覚情報はシミュレータの前方に設置したスクリーン（アイポイントからスクリーンまでの距離 1.6m，水平画角 50deg，垂直画角 20deg）に投影される．

Fig.7 Configuration of driving simulator

Fig.8 Experimental course

3・2 実験条件

検証に用いる車両特性は，操舵角に対して車両のヨーレイトの特性が2章で示した①Slow LPF，②Fast LPF，③HMI フィルタ，④VFG フィルタ，⑤線形 HMI フィルタに，通常車両⁽¹³⁾と等しい定常ヨーレイトゲインを乗じた計5仕様とし，車体横すべり角は常時ゼロとした．これによりゲイン特性が揃った仕様（①および③）と位相特性が揃った仕様（②および④）からゲインのみの違い，位相のみの違いによって生じる運転操作や制御成績の違いを考察できる．また，ハンドル操作で一般に使われる周波数帯域に限定してゲインと位相の関係を変更した場合（④および⑤）の効果についても調査する．なお，操舵反力は操舵角のみに対応して発生する構成とした．

実験コースを図8に示す．車線幅 3.5m の2車線道路をレーンチェンジ長 40m で左車線から右車線へ，右車線から左車線への車線変更を計8回繰り返す．車線中央から逸脱しないように，車速 100km/h 一定で走行する．速度調整はシミュレータが自動的に行い，被験者はステアリング操作のみを実施する．被験者は21～54歳の男女20名であり，被験者の募集に一切の強制はなく，参加は自由意思に基づいている．なお，被験者には事前に実験内容についての説明を書面で行い，本実験に参加する旨の同意を得た．

図9に実験の流れを示す．はじめに練習走行として通常車両を使って実験コースを何回か走行し，ドライビングシミュレータに慣れてもらう．その後評価習熟走行を行う．実験コースを各仕様1回ずつ，合計5回走行する．続いて実験走行として比較する仕様で1回ずつ，合計2回実験コースを走行する．最後に運転しやすさを評価し，実験走行と評価をあわせて1セットとする．被験者は表1に示す合計20セットを行う．表内の番号はある被験者の実験順序の一例を示したものである．順序効果をなくすために実験順序は乱数を用いて決定し，被験者ごとに変更した．

Fig.9 Experimental flow

Table1 Experiment conditions and their orders (an example)

		Control model (Second half)				
		①Slow LPF	②Fast LPF	③HMI	④VFG	⑤Linear HMI
Control model (First half)	①Slow LPF		1	6	16	12
	②Fast LPF	18		2	14	8
	③HMI	11	7		3	19
	④VFG	15	17	10		4
	⑤Linear HMI	5	13	20	9	

3・3 評価指標

評価は主観評価と客観評価によって行った。主観評価はメンタルワークロードの評価法として一般的なNASA-TLXのAWWL手法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を採用した。

客観評価はドライバの動特性を同定する手法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾を採用した。本手法はドライバの実際の操作量に最も近くなるドライバモデルのパラメータを求め、何秒先に注目して運転しているのかを推定するものである。図10に示す前方一次注視モデル^{(18)~(20)}に基づいてドライバをモデル化し、このときの操舵ゲイン h 、反応時間 τ_l 、先読み時間 τ_p の3つのパラメータを同定する。同定にはNelder-Meadシンプレックス法⁽²¹⁾を用いる。実験から取得したドライバの実際の操舵角データとドライバモデルの操舵角 θ を比較し、ドライバモデルのパラメータを変更して実際の操舵角データに近づけていき、誤差が収束するまでパラメータ計算を繰り返す方法である。

反応時間 τ_l はドライバの操舵余裕を表すものである。車両の応答性が良いときに反応時間 τ_l は大きくなり、運転者は余裕をもって操舵できる。操舵ゲイン h と先読み時間 τ_p はドライバの前方注視距離を表すもので、ドライバの前方注視距離が大きくなれば先読み時間 τ_p も大きくなり、操舵ゲイン h は小さくなる。このようになればドライバがより遠方を見る余裕が生まれたことになり、運転しやすくなったといえる。

評価手法の妥当性を検証するために、事前に確認実験を行った。確認実験では通常車両を実験仕様として、本実験と同様に車速100km/h一定で、ドライバはステアリング操作のみを実施した。実験コースは、図8のコースにおいて40mに設定されていたレーンチェンジ長を10m、20m、30mに変化させた。レーンチェンジ長が長くなれば運転が容易になることを官能評価でも確認した。図11に確認実験で得られたドライバパラメータの推定結果を示す。(a)操舵ゲイン h はレーンチェンジ長が長くなるとともに小さく、(b)反応時間 τ_l と(c)先読み時間 τ_p は大きくなっており、官能評価の結果とよく対応することから手法の妥当性が確認できた。

Fig.10 Block diagram of Driver/Vehicle system with preview model

Fig.11 Validity verification of evaluation method

4. 実験結果と考察

4・1 主観評価

図 12(a)に各仕様の 1Hz での位相遅れにおける主観評価を示す. (b)は(a)の横軸を 1Hz でのゲインに置き換えて示したものである. 主観評価は被験者間の平均点である. 5 つの実験仕様について, 各被験者の主観評価の平均値に対して分散分析⁽²²⁾を行い, 有意確率 $p=0.003$ という結果を得た. したがって, 有意水準を 0.05 としたとき, 5 つの実験仕様の間に有意な差があることが確認できている. また, 実験仕様の間にどの程度有意な差があるのか確認するため, Bonferroni の多重比較を行った. 詳細な数値は割愛するが, 有意水準を 0.05 としたとき, すべての組み合わせに対して有意な差があることを確認した. (a)において線形系の①Slow LPF と②Fast LPF を比較すると, Slow LPF に対して Fast LPF の点数が低くなっている. これは(b)に示すように, 位相遅れを低減しても高周波ゲインが増加する線形系の不可分の関係が影響しているものと考えられる.

提案した 3 種類のフィルタ③~⑤は破線で囲った部分のように全てで線形系よりも点数が上昇しており, 運転しやすかったことがわかる. 中でも③HMI フィルタが最高点となっており, ゲインと位相を独立に変更できる効果が表れている. ④VFG フィルタと⑤線形 HMI フィルタも点数が高く, 局所的であってもゲインと位相の間に存在する不可分の関係を解消できることは効果的だと言える.

Fig.12 Subjective rating of five systems

4・2 客観評価

図 13 にドライバ動特性同定の結果を示す. (a)は操舵ゲイン h , (b)は反応時間 τ_r , (c)は先読み時間 τ_p の結果であり, それぞれの値は被験者間の平均値である. 主観評価同様, 平均値に有意な差があることを確認済みである.

まず線形系の①Slow LPF と②Fast LPF を比較すると, Fast LPF よりも Slow LPF の(a)操舵ゲイン h が小さく, (c)先読み時間 τ_p は大きくなっていることから, Slow LPF が運転しやすかったことがわかる. しかし(b)反応時間 T_R は Slow LPF の方が小さくなっていて, ここにゲインと位相の不可分の関係が影響していると推察される.

提案した 3 種類のフィルタでは, (a)操舵ゲイン h では③HMI フィルタが圧倒的に小さく, 残りの 2 仕様も Slow LPF に近い値となっている. (b)反応時間 τ_r についても③HMI フィルタは最も値が大きく, 運転しやすかったことがわかる. 他の 2 仕様も Fast LPF 程度に大きくなっている. (c)先読み時間 τ_p は提案したフィルタ③~⑤のすべてで Slow LPF と Fast LPF よりも値が大きくなっていて, 前方注視距離が伸びて運転しやすくなっている.

Fig.13 Comparison of identification of driver dynamics

全体を通じて③HMI フィルタが一番余裕のあるドライバモデルとなっていて、主観評価同様、ゲインと位相を独立に変更できる効果が表れている。今回新たに提案した④VFG フィルタと⑤線形 HMI フィルタには劣るものの、ゲインと位相の関係を局所的に変更することで運転しやすくなることは確認できた。

5. 結 言

車両の目標性能は、1 次遅れ系などの線形系で表現されることが一般的である。しかしその議論は位相遅れを中心にされており、高周波ゲインには言及されていなかった。筆者らが前報で提案した HMI フィルタはゲインと位相を独立に設定でき、これにより高周波ゲインの増大が運転しにくさを助長することを明らかにした。つまり、目標性能にひと工夫加えることで、さらに動特性を改善できることを示した。本報では実用面を考慮し、より簡単にゲインと位相の関係を変更でき、性能を解析的に評価しやすいフィルタを提案した。そして、高周波ゲインの増大が位相遅れの低減と比較してどの程度運転しやすさに影響を及ぼすのか調べた。以下に本報の結論を記す。

1. HMI フィルタよりも設計と性能解析が容易な 2 種類のフィルタ（VFG フィルタと線形 HMI フィルタ）を提案し、目標性能を線形フィルタで表現するだけでなく、ひと工夫加えることでさらに動特性を改善できることを示した。
2. 上記 2 種類のフィルタと前報の HMI フィルタをドライビングシミュレータに適用し、被験者実験から運転しやすさを比較した結果、以下のことがわかった。
 - ゲインと位相の特性を独立に設計できる HMI フィルタが最も運転しやすく、前報で述べたように位相遅れ、高周波ゲインはともに小さいほうが良いことを再確認した。
 - 新たに提案した 2 種類のフィルタは、HMI フィルタ以上に運転しやすくなるはならなかったものの、従来の線形フィルタよりも運転しやすくなった。つまり必要な周波数帯域だけで、人間の運転操作では 1Hz 付近のみゲインと位相の関係を調整するだけでも、運転しやすさは向上することがわかった。
 - 位相遅れ低減に対して、高周波ゲインの増大を一樣に抑制せずとも、単純に小さくすれば運転しやすさは向上した。また十分に高周波の帯域、今回では 10Hz 付近において高周波ゲインの増大を抑制していないが、それ以前の帯域からの効果が持続するためにゲインを小さくすることができた。
3. 車両の目標性能は高周波ゲインの増大にも着目する必要がある、ゲインと位相の関係性から積極的に設計することが重要である。
4. 運転しやすさの客観評価手法としてドライバの動特性を同定し、主観評価に追従する結果が得られることを確認した。

本稿の内容において、実験の客観評価は 日産自動車 (株) 吉松祐香氏らの協力を得た。ここに感謝の意を表す。またこの研究は、独立行政法人 科学技術振興機構の研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) の一環として行われた。心より御礼申し上げる。

文 献

- (1) 教育図書編集委員会, 技術者育成委員会編, 自動車工学—基礎— (2002), pp. 142-147, 社団法人自動車技術会.
- (2) 堀内伸一郎, “人間—自動車系の理論的取り扱いについて”, *Vehicle Dynamics and Control —基礎講習会—*, No. 02 (1990), pp. 49-55.
- (3) Horiuchi, S., Yuhara, N. and Takeda, H., “Identification of Driver/Vehicle Multiloop Properties for Handling Quality Evaluation”, *Proceedings of 11th IAVSD Symposium* (1989), pp. 285-297.
- (4) McRuer, D. T. and Klein, R., “Effects of Automobile Steering Characteristics on Driver/Vehicle Performance for Regulation Tasks”, *SAE Paper 760778*, (1976).
- (5) Bergman, W., “Relationships of Certain Vehicle Handling Parameters to Subjective Ratings of Ease of Vehicle Control”, *Proceedings of 16th FISITA Congress*, Vol. 16 (1976), pp. 6.81-6.86.
- (6) 古川修, “四輪操舵システムによる操安性の改善”, 自動車技術, Vol. 40 (1986).
- (7) 中野史郎, 高松孝修, 西原修, 熊本博光, “ステアバイワイヤにおける操舵制御に関する研究—第一報: 操舵反力制御と前輪舵角制御について—”, 自動車技術会論文集, Vol. 31, No. 2 (2000), pp. 53-58.
- (8) 佐野彰一, 大山泰晴, “新しい操舵系の提案とその評価 (第1報): 方位角フィードバックシステムの構成と特性”, 自動車技術会論文集, Vol. 37, No. 3 (2006), pp. 13-17.
- (9) 藤岡健彦, 木村建, “最短コーナリング法に関する理論的研究”, 自動車技術会論文集, Vol. 23, No. 2 (1992), pp. 75-80.
- (10) 小竹元基, 永井正夫, “アクティブ操舵とDYCの協調制御に関する理論解析”, 自動車技術会論文集, Vol. 33, No. 3 (1996), pp. 279-284.
- (11) Chumsamutr, R. and Fujioka, T., “Improvement of Electric Vehicle’s Cornering Performance by Direct Yaw moment Control”, *Proceedings of AVEC2000*, pp. 49-55.
- (12) 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 吉松祐香, 鈴木卓馬, 上沼研也, “ドライバ操舵に対する車両挙動の位相遅れと高周波ゲインが運転しやすさに及ぼす影響”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 793 (2012).
- (13) 安部正人, 自動車の運動と制御 (2008), pp. 245-259, 東京電機大学出版局.
- (14) 三宅晋司, 神代雅晴, “メンタルワークロードの主観的評価法”, 人間工学, Vol. 29, No. 6 (1993), pp. 399-408.
- (15) 芳賀繁, 水上直樹, “日本語版NASA-TLXによるメンタル・ワークロードの測定”, 人間工学, Vol. 32, No. 2 (1996), pp. 71-79.
- (16) Ishio, J., Ichikawa, H., Kano, Y. and Abe, M., “Vehicle handling quality evaluation through model based driver handling behavior”, *Supplement of VSD Journal Proceedings of the 20th IAVSD symposium* (2007).
- (17) 安部正人, “「人と自動車」の研究—ドライバの操舵特性に関する研究を例にして—”, 自動車技術, Vol. 62, No. 6 (2008), pp. 2-3.
- (18) 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, No. 5 (1958), pp. 40-43.
- (19) McRuer, D. T., “A Review of Quasi-Linear Pilot Models”, *IEEE Transaction on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE-8, No. 3 (1967).
- (20) 井口雅一, 人間機械系—人による機械の制御 (1970), pp. 46-58, 共立出版.
- (21) Nelder, J. A. and Mead, R., “A simplex method for function minimization”, *Computer Journal*, Vol. 7 (1965), pp. 308-313.
- (22) 山田剛史, 杉澤武俊, 村井潤一郎, Rによるやさしい統計学(2008), pp. 159-202, オーム社.