操舵支援制御時におけるドライバ特性に関する研究*

藤岡 健彦^{*1}, 白野 康之^{*2}Research on Driver's Behavior
under Steering Assist ControlTakehiko FUJIOKA^{*3} and Yasuyuki SHIRANO^{*3} The University of Tokyo, Dept. of Mechanical Engineering,
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

Driver's behavior under steering assist systems is studied in this paper. Steering assist system is one of subsystems in ITS (Intelligent Transport Systems). Dual port element of electric circuit theory is proposed to analyze steering assist systems. By the use of dual port element, a (linear) steering assist system is described by 6 coefficients. In the latter part of this paper, weighted control of steering assist systems is proposed. Weighted control can be expanded to a variety of steering assist systems by changing the weighted function. Drivers' test of the system is done by a driving simulator. The results show that there is interference between the driver and system if weights of them are around halves.

Key Words: Drivers' Behavior, Driving Simulator, ITS (Intelligent Transport Systems), AVCSS (Advanced Vehicle Control and Safety Systems), Steering Assist System, Steering by Wire

1. 緒言

ITS(Intelligent Transport Systems)に関するサービスは, AHS-*i*(情報提供サービス), AHS-*c*(制御支援サービス), AHS-*a*(自動走行サービス)に分類されることがある[1]. 時間軸で見たとき, おおむねこの順番にサービスが開始されると考えられている. このITSの分類に従えば本論文で対象としている操舵支援システムは, AHS-*a*を視野に入れたAHS-*c*に属する研究である.

ドライバの操舵支援を行うシステムは二つの方式に分かれるように思われる. 一つは, 擬似自動運転システム(Quasi Automatic Driving System)とも言うべき方式である[2, 3, 4]. この方式では, ドライバへの操舵支援が常時行われ, 車線追従成績の向上やドライバの運転負荷の軽減が主な目的となる. 二つ目の形式は, 車線逸脱警告システム(Lane Departure Warning System)とも言うべき方式である[5, 6]. この方式では, 危険度が高い場合にのみ操舵支援が行われ, ドライバに警告を与え, 安全に車線復帰させることがその主な目的となる.

本論文ではまず(第2章), 操舵支援システムを, 電気回路理論でいう四端子網(双対端子網)により定式化することを提案している. 操舵支援システムでは, 従来のようなハンドルと操舵輪(前輪)とが直接結合されたシステムのみならず, この二つが直接結合されていない(ステアバイワイヤ)システムも, 当然対象に含まれる. 本

論文で提案している四端子網による定式化によればステアバイワイヤシステムも統一的な形で定式化することができ, 様々な考案されてきた, さらにこれからもされるであろう操舵支援システムの整理分類が整然と行える.

本論文ではつぎに(第3章), 具体的な操舵支援システムとして, 擬似自動運転システムの一つである重み付制御を提案し, ドライビングシミュレータ[7]を用いた実験により, 提案システムの有効性及問題点を, 特にドライバの運転挙動とシステムとの相互干渉との観点から論じている.

ドライビングシミュレータは様々なに使われているが, 本論文ではITS環境というまだ確立されていない環境を実現するための道具として使用している[8, 9].

2. 操舵支援システムの四端子網による定式化

ドライバの操舵動作では, 昔から操舵角(変位)入力か, 操舵トルク(力)入力かという議論があった. どちらと考えるかにより, たとえばパワーステアリング(以下パワステ)の設定も評価が異なってくる. 一般的には, 車庫入れのような極低速の運転はほぼ操舵角入力であり, 山道の運転のような場合には操舵力入力の要素が多いと言われている.

電気回路理論においては, 電圧入力か電流入力かが条件により異なる^{**1}システムを四端子網により表現することが行われており, 周知である[10]. 本論文では, この

^{**1}厳密に言えば, つねにこの中間である.

* 原稿受付 1999年4月7日.

^{*1} 正員, 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).^{*2} 学生員, 東京大学大学院.

E-mail: fujioka@mech.t.u-toyko.ac.jp

考え方を操舵支援システムあるいはパワステなどを含む操舵制御装置の定式化に適用することを提案する。

2.1 操舵支援システムのブロック線図 一般的な操舵支援システムをブロック線図で記述すると図1の形で記述できると考えられる。ここで δ :タイヤ舵角, δ_h :操舵角, SAT :セルフライニングトルク, T :操舵トルク, Env :環境情報, p :運動情報である。

Fig.1 Generalized steering assist system

もっとも原始的な「操舵支援システム」であるパワステを例にとれば、図1は以下のように説明できる**2。すなわち、 Env および p （たとえばパワステの場合には、車速and/orエンジン回転数だけのことが多い）の情報によりステアリング制御装置（パワステ）の特性が決まる。ステアリング制御装置の特性によって、ドライバが操舵角か操舵力の一方を決めれば、他の一方は車両の運動状態（主項はもちろんその運動状態のときのタイヤ特性）に従って自動的に決まる。

次々節で触れるように、従来提案されてきた「操舵支援システム」との整合性を考慮して、操舵角とセルフライニングトルクを独立変数と考えれば図1は以下の2式になる。

$$\delta = \delta(\delta_h, SAT; Env, p) \quad (1)$$

$$T = T(\delta_h, SAT; Env, p) \quad (2)$$

上記の説明からもわかるように、 δ_h, T がドライバ側の二端子、 δ, SAT が車両側の二端子であり、 Env と p はこの装置の特性を決める入力である。

なお、電気回路と機械回路の相似性という観点で見れば、変数として操舵力と（操舵角ではなくて）操舵速度を使って定式化すべきであるが、自動車運動力学の分野では、操舵速度は操舵角ほど一義的な変数とは思われないので、本論文の提案では操舵力と操舵角を使って定式化した。

2.2 仮想ドライバによる操舵支援システムの線形化

図1のブロック線図は、一般的な形になりすぎていて、このままでは具体的な操舵支援装置をこの図から考えるににくい。そこで本節では、仮想ドライバにより操舵支援システムをもう一段具体化することを考察する。

**2もちろんパワステは本論文でいう操舵支援システムには入らない。わかりやすい例としてパワステを操舵支援システムとしてわざわざ定式化してみようということである。

ここでは、仮想ドライバを、操舵支援システムが計測しうる情報をもとに、ある状態の時の操舵角を決定する装置と定義する。ひらたく言えば計算機による（操舵角入力を行う）ドライバのことである。なお、仮想ドライバの構成方法は本論文の対象とはしていないが、本論文でも後述（第3.1節）するように、ドライバモデルを利用すればとりあえず簡単に構成できる。仮想ドライバにより図1のブロック線図は図2になる。ここで δ_v :仮想ドライバの操舵角である。

図2の操舵制御装置を線形化した式で表せば、以下の2式になる。

$$\delta = \alpha_{11}\delta_h + \alpha_{12}SAT + \beta_1\delta_v \quad (3)$$

$$T = \alpha_{21}\delta_h + \alpha_{22}SAT + \beta_2\delta_v \quad (4)$$

ここで

$$\beta_1 = \beta_1(Env, p) \quad (5)$$

$$\beta_2 = \beta_2(Env, p) \quad (6)$$

である。

Fig.2 Steering assist system with Virtual driver

2.3 操舵支援システムの四端子網による定式化、分類の例 本章で説明してきた、四端子網による操舵支援システムの定式化の例をあげ、この方式により各制御が定式化できることを示す。

2.3.1 完全手動運転 完全な手動運転環境では、仮想ドライバによる操舵角 δ_v は無視され、実ドライバによる操舵角 δ_h がそのまま出力される。従って、式は次のようになる。

$$\delta = \delta_h \quad (7)$$

$$T = SAT \quad (8)$$

2.3.2 完全自動運転 完全自動運転環境では、操舵角は制御アルゴリズムにより決定される。従って、使用している制御アルゴリズムにより決定される操舵角が仮想ドライバの操舵角であると考えられる。つまり、実ドライバによる操舵角 δ_h は無視され仮想ドライバによる操舵角 δ_v が出力される。また操舵トルクは発生しないものとする、完全自動運転を表す式は以下のようになる。

$$\delta = \delta_v \quad (9)$$

$$T = 0 \quad (10)$$

2.3.3 操舵力による操舵支援システム 文献[3]では,従来の操舵装置(パワステ)にアクチュエータを加えるだけで実現できる操舵支援システムが提案されている。このシステムは,ドライバによる操舵角と仮想ドライバによる操舵角の差に比例して支援トルクを発生するシステムで,操舵角とタイヤ舵角は等しい。四端子網による定式化では以下の式で表現できる。

$$\delta = \delta_h \quad (11)$$

$$T = SAT + k(\delta_v - \delta_h) \quad (12)$$

次に,ステアバイワイヤを想定した操舵支援システムである重み付け制御を説明する。

2.3.4 重み付け制御 重み付け制御は本論文で提案する操舵支援システムの制御方式であり,ドライババイワイヤを想定している。この制御では,ドライバにより決定される操舵角 δ_h ,仮想ドライバにより決定される操舵角 δ_v に重みを付けてタイヤ舵角を決定する。この制御は,重み関数 ω の値によって,完全手動運転と完全自動運転とを連続的につなぐ制御方式になっている。重み関数の決め方で様々な操舵支援システムが実現できる。

またこの重み関数 ω をSATに乗じたハンドル反力をドライバにもどすことを想定する。これによりドライバはハンドル反力の大きさの変化から ω の変化を感じることができる。

以上を式であらわすと以下のようにになる。

$$\delta = \omega\delta_h + (1 - \omega)\delta_v \quad (13)$$

$$T = \omega SAT \quad (14)$$

ここで

$$\omega = \omega(Env, p) \quad (15)$$

である。

本節で述べた四つの制御は表1のようにまとめることができる。

	α_{11}	α_{12}	β_1	α_{21}	α_{22}	β_2
Manual Driving	1	0	0	0	1	0
Autonomous Driving	0	0	1	0	0	0
Attached Actuator	1	0	0	-k	1	k
Proposed(Weighed Control)	ω	0	1 - ω	0	ω	0

Table 1: Parameters on each control method

3. 重み付け制御による操舵支援システムの実験

3.1 実験概要 本論文では,重み付け制御を操舵支援システムとして使用したときの走行実験をドライビングシミュレータ[7]により行った。

Fig.3 Experimental course

車両の走行速度は運転負荷がある程度発生するように80[km/h],120[km/h]の二通りで行った。また走行コースは図3に示すように首都高速道路環状内周コースを想定した道路の,図3において実線で示された約四分の一である。

仮想ドライバはもっとも簡単なドライバモデルである前方注視1次モデルを使用した。

$$\delta_v = K_p \varepsilon + K_d \dot{\varepsilon} \quad (16)$$

ただし $K_p:0.018$, $K_d:0.00375$, $\tau:0.8[s]$ である(図4参照)。

Fig.4 Predicted lateral displacement

重み関数は,様々なものが考えられるが,本論文では車両横変位のみの関数とし,2通りについて実験を行った。重み関数1は(車両横変位の値に関わらず) ω を一定する制御である。すなわち,

$$\omega = \omega_0 \quad (17)$$

本実験では ω_0 を0(完全自動運転)から1(完全手動運転)まで0.25ずつ変化させて実験を行った。重み関数1を図5に示す。重み関数2は車両横変位 y に対して以下のような正規分布状の関数で表される制御である。

$$\omega = e^{-\left(\frac{y}{L}\right)^2} \quad (18)$$

本実験では L を0.5[m],1.0[m],1.5[m]と変化させて実験を行った。 $L \rightarrow 0$ の場合は完全自動運転に, $L \rightarrow \infty$ の場合は完全手動運転になる。重み関数2を図6に示す。

Fig.5 Weighting function 1

Fig.6 Weighting function 2

走行実験の評価項目としては、車線追従の正確さと操舵支援システムがどの程度運転に介入したかとのトレードオフを調べるために下記の2項目を使用した。

車線追従の正確さを表す車線追従成績としては、車両横変位の分散を使用した。従って、車線追従成績は車両横変位を y 、車両横変位の平均値を $\bar{y}$ 、車両横変位分布の確率密度関数を $D(y)$ とした場合に、

$$\int_{-\infty}^{\infty} (y - \bar{y})^2 D(y) dy \quad (19)$$

で表される。

操舵支援システムがどの程度介入したかを表すシステム介入度は以下で定式化した。ドライバが覚醒状態にある場合、危険度が低い場合にはシステムが介入する必要性はあまりない。従って同程度の車線追従成績を与える2種類のシステムがある場合には、ドライバから見れば2種類の内、介入度が低い方が通常のシステムとの違和感もなく望ましいであろう。ここではシステム介入度として、走行全体におけるシステムの重みの平均値を考える。ドライバの重みを ω とした場合に、システムの重みは $1 - \omega$ となる。従って、システム介入度は車両横変位を y 、車両横変位の確率密度関数を $D(y)$ とすると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \{1 - \omega(y)\} D(y) dy \quad (20)$$

のようになる。ここで常に $0 \leq \omega \leq 1$ が成り立つことより、システム介入度は最大で1、最小で0の値をとる。重み関数1においては ω は y によらず一定なので、システム介入度は $1 - \omega$ に等しい。

3.2 実験結果 実験は被験者3名について行った。いずれも20代前半男性で免許取得後数年の運転歴がある。3名ともほぼ同じ傾向だったので本論文では典型的な1名の被験者の例を示す。また同じ条件の実験を3～4回ずつ行った。

重み関数1を用いた場合の車線追従成績を図7、図8に示す。これらの図において横軸はドライバの重み ω で、縦軸は車線追従成績である。 ω が0の場合は、完全な自動運転の制御結果を示している。また ω が1の場合は、完全な手動運転の制御結果を示している。図8では ω が0.5の場合には車線追従成績が大きくなる。このことは、ドライバとシステムの重みを半分ずつとすると、ドライバの操舵動作とシステムの操舵動作が干渉し、システムの介入によりかえって制御が悪くなる場合があることを示している。図8にこの傾向が顕著に現れることから、ドライバの負担が大きい時に、この傾向が顕在化するのではないかと推測できる。一方、重み関数2を用いた場合の車線追従成績を図9、図10に示す。図9、図10では横軸は重み関数 $\omega = \exp\{-(y/L)^2\}$ の L で、縦軸は車線追従成績である。図の点線は $L = \infty$ (完全手動運転) のときの平均値を表している。重み関数2の場合には、実験の範囲では L (システム介入度) の増加とともに車両追従成績が向上している。

Fig.7 Lane following performance (weight func 1, 80[km/h])

Fig.8 Lane following performance (weight func 1, 120[km/h])

次に図11、図12にそれぞれ時速80[km/h]、120[km/h]の場合のシステム介入度と車線追従成績の関係を示す。

点線は重み関数1を用いた場合の結果で,*、×、□が重み関数2を用いた場合の結果である。図から分かるように、車線追従成績が等しい時には、速度に関係なく重み関数1を用いた場合よりも、重み関数2を用いた場合の方がシステム介入度が低い事が分かる。つまり重み関数2を用いた場合の方が、重み関数1を用いた場合よりもシステム介入度を低く押えたまま車線追従成績を向上させることができることを示している。

Fig.9 Lane following performance (weight func 2, 80[km/h])

Fig.10 Lane following performance (weight func 2, 120[km/h])

Fig.11 System interference and lane following performance (80[km/h])

4. 結言

本論文前半では四端子網の概念により操舵支援システムを定式化することを提案した。この方式によれば、ステアバイワイヤを含む操舵支援システムが定式化できる。さらに仮想ドライバを使って具体化したシステムでは、線形の範囲であれば操舵支援システムが六つの値(四端子網の係数 2×2 + 入力係数2)により記述できることになる。この定式化により、数多く提案されてき

Fig.12 System interference and lane following performance (120[km/h])

た、またされるであろう操舵支援システムが整理分類され、それぞれの特徴が比較しやすくなる。さらにこの定式化は操舵支援システムの標準化に利用できると期待できる。

本論文後半では、ステアバイワイヤを想定した操舵支援システムとして重み付き制御を提案した。この方式は重み関数を変化させることにより様々な運転支援システムが実現できる。重み関数として一様関数と正規分布状の関数を使用したときの運転実験をドライビングシミュレータにより行った。この実験の結果以下のことがわかった。

1. 重み関数の形状によりシステム介入度を低く押えたまま車線追従成績を向上させることができる。
2. ドライバとシステムの干渉例として、ドライバと仮想ドライバの重みが同程度の場合には、システムの介入がない場合よりかえって車線追従成績が悪化してしまう場合がある。

なお、本研究の研究経費の一部は運輸施設整備事業団の運輸分野における基礎的研究推進制度による公募研究「人間・社会・技術を統合した安全交通システム設計法とその評価方法の研究」による。

引用文献

- [1] 走行支援道路システム開発機構 (Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association), URL <http://www.ahsra.or.jp/>
- [2] K.Naab, and G.Reichart., "Driver Assistance Systems for Lateral and Longitudinal Vehicle Guidance - Heading Control and Active Cruise Support", Proc. of International Symposium on Advance Vehicle Control, Tsukuba, Japan, (1994), pp.449-454.
- [3] S.Horiuchi and K.Sunada, "Synthesis of Driver Assistance System for Lane-Following Using Generalized Predictive Control", Proc. of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, (1998), pp.467-472.

- [4] M.Ikegaya, N.Asanuma, S.Ishida and S.Kondo, "*Development of a Lane Following Assistance System*", Proc. of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, (1998), pp.473-478.
 - [5] K.Sato, T.Goto and Y.Kubota, "*A Study on a Lane Departure Warning System using a Steering Torque as a Warning Signal*", Proc. of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, (1998), pp.479-484.
 - [6] K.Ishimoto, T.Niibe, T.Suetomi and T.Butsuen, "*Development of Lane-Keeping System for Lane Departure Avoidance*", The Second World Congress on Intelligent Transport Sysmtes, Vol.III, (1995), pp.1266-1271.
 - [7] 鄭 東勲, 藤岡 健彦, 藤井 誠, "簡易型ドライビングシミュレータの製作", 自動車技術会学術講演会前刷集, No.881, (1988), pp.101-104.
 - [8] 藤岡 健彦, 村松 孝治, 麻生 誠, "シミュレータを用いた自動運転環境におけるドライバ挙動に関する研究", 自動車技術会学術講演会論文集, Vol.28, No.4, (1997), pp.135-139.
 - [9] S.Hahn, "*Switching between Autonomous and Conventional Car Driving - A Simulator Study*", Preceedings of the Intelligent Vehicle '93, (1993), pp.25-30.
 - [10] 学部レベルの標準的な教科書,たとえば,電気学会大学講座,電気回路論,電気学会, (1970), 第7章.
-