

車線追従のための操舵支援システムと 多入力ドライバモデルを用いた評価

堀内伸一郎* 砂田 圭**

本論文は一般化予測制御理論に基づいた操舵支援システムを提案し、多入力ドライバモデルを用いたシミュレーションによりその評価を行った。この操舵支援システムにより、ドライバは適切な操舵を指示する制御情報を筋肉感覚情報としてハンドルから得ることができる。シミュレーションによる評価結果と比較するため、固定式ドライビングシミュレータによる実験も実施した。これらの比較から、提案する操舵支援システムが車線追従性能を向上させるばかりではなく、ドライバのワークロードを軽減する効果のあることがわかった。

A Steering Assistance System for Lane Following and its Evaluation Using Multi-Input Driver Model

Shinichiro HORIUCHI* Kei SUNADA**

This paper proposes a new steering assistance system based on the Generalized Predictive Control theory and evaluates the system by means of a series of computer simulations using a multi-input driver model. With this system, the driver receives active kinesthetic control information from the steering wheel indicating the appropriate steering action for lane following task. Fixed base driving simulator tests were carried out to confirm the evaluation results of the computer simulations. The results show that the system makes it possible to improve the task performance and reduce driver workload.

1. はじめに

近年、交通システムのインテリジェント化の一環として自動車の自動運転に関する研究が盛んに行われている。しかし現在までのところ完全な自動運転は、システムの信頼性、事故に対する責任問題、インフラの整備などの関係から実用化には至っていない。

そこで、完全自動運転と従来の手動運転の中間に位置するシステムとして、ドライバの運転を支援するシステムが提案されている。このようなドライバ支援システムにおいてはドライバが常に制御ループの中に存在し、運転に関する主導権を持っているため、完全自動運転に付随する問題は回避できると考えられる。

ドライバ支援システムの機能は、情報提供、警告、運転介入の三種類に分けられる。情報提供機能は現在のカーナビゲーションシステムなどで一部実用化されている。警告は危険な状況をシステムが判断し、警報を発生してドライバの注意を促す機能である。この一例として、Matthewsら¹⁾によって提案された、

* 日本大学理工学部助教授
Associate Professor, College of Science and Technology,
Nihon University

** 日本大学大学院理工学研究科
Graduate Student, College of Science and Technology,
Nihon University
原稿受理 2000年7月3日

ニューラルネットワークとファジィ理論の組み合わせにより前方の障害物を認識し、ドライバに警報を発する支援システムを挙げることができる。運転介入はシステムが操舵や車間距離制御を補助的にを行い、危険回避、ドライバの負担軽減など積極的に支援するものである。

このような運転介入の立場から、Naabら²⁾は車線追従を支援するシステムを提案している。このシステムではリアルタイムに同定されるドライバモデルの出力と実際のドライバの出力を比較し、その差に応じて操舵支援の大きさが決定される。したがって、システムの性能は同定されるドライバモデルの精度に左右される。しかし、非線形性を含むドライバの制御動作をリアルタイムで同定し、かつその同定精度を保证するのは難しい問題である。LeBlancら³⁾は後輪の左右制動トルクの差によって車線逸脱を防止する支援システムを提案している。この支援方法はシステムの介入をドライバにフィードバックしないという点でNaabらのドライバ支援に対する考え方とは異なっている。システムの介入状況を積極的にドライバにフィードバックするという観点から、Yuharaら⁴⁾はアクティブに制御された人工的な操舵トルクを筋肉感覚情報としてドライバに供給する操舵支援システムを提案している。Reicheltら⁵⁾は、緊急時のドライバは操舵角を大きくとりすぎ、これによって車両の運動が不安定に陥ることが多いというシミュレータ実験の結果を踏まえ、不適切なドライバの操舵を補償するような操舵支援システムを提案している。

以上のような従来の研究に対し、本論文では仮想ドライバのコンセプトに基づく車線追従のための操舵支援システムを提案する。このコンセプトは常に理想的な操舵を行うドライバのモデル(仮想ドライバ)を想定し、その出力と実際のドライバの出力との差に応じてハンドルに付加的な操舵トルクを供給し、適切な操舵支援を行うというものである。仮想ドライバは目標コースの未来値を最適に利用するように拡張した一般化予測制御(Generalized Predictive Control:GPC)理論⁶⁾を用いて構成した。さらに提案するシステムの有効性を、ドライバモデルを用いたドライバ-自動車系のシミュレーションと、ドライビングシミュレータを用いた実験によって検討した。

2. ドライバ支援システムの構造

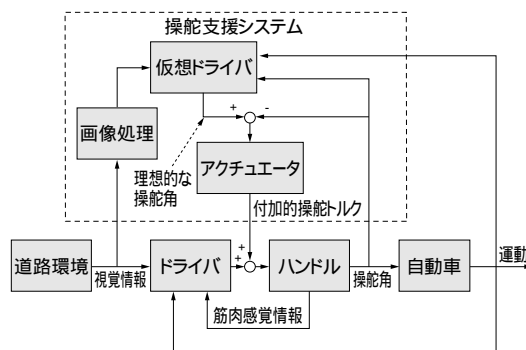


Fig.1 ドライバ支援システムの構造

提案する操舵支援システムの構造をFig.1に示す。仮想ドライバには道路環境、車両の運動状況、ドライバの操舵角が情報として入力される。ここで、道路環境に関する情報は車載カメラによって取得した画像から画像処理によって得られるものと仮定する。これらの情報に基づき、仮想ドライバは車線追従のための理想的な操舵角を計算する。この理想舵角と実舵角との差に応じて操舵トルクをアクティブに制御する。制御された付加的な操舵トルクはドライバの腕から筋肉感覚情報として知覚される。視覚情報はドライバの中枢神経で処理されるのに対し、筋肉感覚情報は脊髄レベルで反射的に処理されるといわれている⁷⁾。したがって、提案するシステムのように筋肉感覚情報を利用した操舵支援システムは、中枢神経における情報処理に伴う負荷を減少させ、精神的な作業負担を軽減する効果が期待できる。

このような支援システムとすることにより、ドライバの操舵と仮想ドライバの理想的な操舵との差が大きくなったときだけ支援システムの介入が行われ、その大きさが筋肉感覚情報としてドライバにフィードバックされる。一方、ドライバが理想に近い操舵を行っているあいだは、操舵支援システムの介入が小さく、通常の走行と同様な感覚をドライバに与えることができる。

以上より、本論文で提案する操舵支援システムの特徴は次の三点にまとめられる。

- (1) ドライバの操舵と理想的な操舵の差に応じて支援の大きさが変化する
- (2) 支援システムの介入状況をドライバにフィードバックする
- (3) フィードバックのため、筋肉感覚情報を利用する

3. 仮想ドライバの設計

3-1 仮想ドライバの操舵アルゴリズム

仮想ドライバの構築においては最適な車線追従が実現できる操舵アルゴリズムが必要となる。また、単に追従誤差を小さくするだけでなく、実際のドライバのようなスムーズな操舵も要求される。

そこで本研究では、筆者ら⁸⁾によって提案されているGPC理論を用いた車線追従制御を仮想ドライバのアルゴリズムとして用いる。この方法は実際のドライバのように将来の目標コースの情報を利用し、計測可能な入出力情報のみを用いて車線追従が実現できる。ここではその概略のみを述べるので、詳しくは文献8)を参照されたい。

3 - 2 車両・目標コースモデル

本論文では高速道路における巡航状態での操舵支援を想定しているため、自動車の運動は線形領域で議論できる。そこで、車速 u を一定と仮定し、車両の運動を次のような線形2自由度モデルで表す。

$$\dot{v} = \frac{a_1}{u} v - \left(\frac{a_2}{u} + b_1 f \right) + b_1 f \quad \dots(1)$$

$$\dot{r} = \frac{a_3}{u} v + \frac{a_4}{u} r + b_2 f \quad \dots(2)$$

ここで、

v : 横速度

r : ヨーレート

f : 前輪舵角

a_i, b_i : 車両パラメータから決まる係数⁹⁾

である。

T_f は一次遅れのアクチュエータダイナミクスを含み、

$$\dot{f} = \frac{1}{T_f} (e - f) \quad \dots(3)$$

のように記述されるものとする。ここで e は舵角コマンド、 T_f はステアリングアクチュエータの時定数である。

Fig.2は車両と目標コースとの幾何学的な関係を示している。この図において ψ_r は車両のヨー角、 ψ は目標コースの接線の方向、 ψ_e は目標コースからのヨー角誤差、 y_e は目標コースからの横変位誤差、 R は目標コースの曲率半径である。この図から、

$$e = \psi - \psi_r \quad \dots(4)$$

$$\dot{r} = u \quad \dots(5)$$

$$v_e = \dot{y}_e \approx v + u \psi_e \quad \dots(6)$$

のような幾何学的な関係が得られる。

3 - 3 離散時間入出力モデル

式4) (5)より次のような関係が得られる。

$$\dot{e} = r - u \quad \dots(7)$$

式1)2)3)6)7)をまとめると、連続時間モデルである連立常微分方程式が得られる。GPC理論は入力と出力の関係を直接的に記述する離散時間モデルに対して適用されるので、この連続時間モデルを次のような離散時間入出力モデルに変換する¹⁰⁾。

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})\xi(k-1) + D(q^{-1})\xi(k-1) \quad \dots(8)$$

ここで、

k : k 番目のサンプル時点

A, B, D : 信号を1サンプル時点遅らせる時間遅れ演算子 q^{-1} によって記述される多項式

この式は操舵角コマンド e と曲率 r を入力とし、横変位誤差 y_e を出力とする2入力1出力の車両・目標コースモデルを表している。

目標コースの情報は車載カメラによって取得可能であると仮定したので、式(8)のモデルにおいて目標コースの曲率 r は、 M ステップ先まで既知であるような確定外乱と見なせる。すなわち r の未来値 $(k+l), l=1, 2, \dots, M$ は k 時点で入手可能な予見情報である。この予見情報を最適に利用する仮想ドライバを拡張されたGPC理論によって設計する。

3 - 4 拡張GPC理論に基づく設計

理想的な車線追従のためには、できるだけスムーズな操舵で目標コースからの誤差を小さくすることが望ましい。そこで、仮想ドライバの操舵角 e は

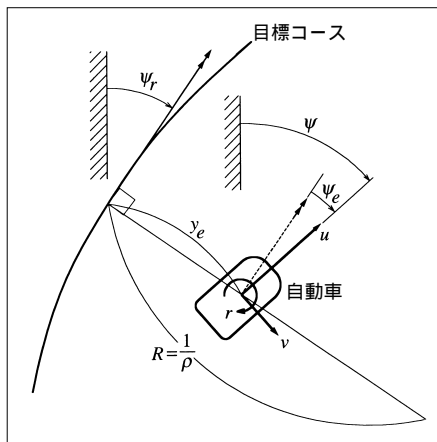


Fig.2 自動車と目標コースの幾何学的関係

M 時点先までの横変位誤差 y_e と操舵角コマンドの差分 e_c の2乗和によって計算される評価関数

$$J = \sum_{j=1}^M \{ y_e(k+j) + e_c(k+j-1) \} \quad \dots(9)$$

を最小にするように設計する。ここで e_c は入力差分に対する重みであり、横変位誤差の減少と操舵角速度の減少のどちらを重視するかを示している。 K_y を大きくすると横変位誤差より操舵角速度の減少を重視し、スムーズな操舵を行う仮想ドライバとなり、逆に K_y を小さくすると操舵角速度より横変位誤差の減少を重視し、速い操舵を許容することになる。

式(9)の評価関数を計算するためには、 k 時点で得られる情報から未来のトラッキング誤差

$$y_e = [y_e(k+1) y_e(k+2) \dots y_e(k+M)]^T \quad \dots(10)$$

を予測することが必要である。 y_e は次のように二つの部分に分けることができる。

$$y_e = H y_c + P \quad \dots(11)$$

上式の右辺第1項は未知信号である未来の入力 $y_c(k+l)$ $l=0, 1, \dots, M$ に依存する部分、第2項 P は既知の信号 $y_c(k-i)$, $y_c(k-i-1)$, $(k-i)$ $i=0, 1, \dots$ と予見情報 $y_c(k+l)$ $l=1, 2, \dots, M$ に依存する部分を表す M ベクトルである。ここで未来の目標コースの曲率 $y_c(k+l)$ $l=1, 2, \dots, M$ を既知信号として取り扱う点が既存のGPC理論の拡張になっている。

評価関数が最小値をとる必要条件 $\partial J / \partial e_c = 0$ より k 時点の最適操舵角コマンド $e_c(k)$ は、

$$e_c(k) = e_c(k-1) + h^T P \quad \dots(12)$$

となる。ここで、 h は式(8)を書き直して得られる係数ベクトルである。

4. 多入力ドライバモデルを用いた操舵支援システムの評価

提案する操舵支援システムの効果を検討するため、ドライバの運転動作モデルを用いて車線追従のシミュレーションを行った。

4-1 ドライバの運転動作モデル

シミュレーションにおけるドライバの運転動作モデルと

して、横変位誤差とヨー角誤差をフィードバックする多入力ドライバモデル¹¹⁾を用いた。このモデルに操舵支援システムからの筋肉感覚情報のフィードバックループを考慮し、Fig.3のようなドライバモデルとした。この図において、ドライバは目標コースからの横変位誤差 y_e 、ヨー角誤差 ψ_e 、操舵支援システムによってアクティブに制御されたトルク T_f を入力とし、操舵トルク T_d を出力する3入力1出力システムとしてモデル化されている。 K_y, K はそれぞれ横変位誤差とヨー角誤差に対する比例動作を表すパラメータ、 T_L は微分動作を表すパラメータである。 e^{-sT_L} は中枢神経における入力信号の認知と情報処理に要するむだ時間、 Y_n は神経筋肉系のダイナミクスを表す。

比例動作を表す K_y, K と微分動作を表す T_L は自動車の動特性が変化したときでも、ドライバ-自動車系全体が望ましい一定の特性に保たれるようにドライバ自身によって調整される。この中で K_y と K は大幅に変化させることが可能である。これに対して T_L の値にはかなりの制限があり、この値が大きくなるほどドライバの精神的作業負担は増加することがわかっている¹²⁾。したがって、 T_L の値はドライバの精神的作業負担を表す一つの指標として利用できる。

これらの調整可能なパラメータに対して、 T_L と Y_n は人間の神経生理学的な条件から決まり、ほぼ一定と見なされるものである。ここでは T_L を0.1sec、 Y_n を固有振動数9rad/sec、減衰比0.6の2次系と仮定した。

K は操舵支援システムからの人工的操舵トルク T_f に対するドライバの応答を表す。視覚情報 y_e, ψ_e は中枢神経で処理されるのに対し、 T_f は筋肉中の自己受容器で筋肉感覚情報として知覚され、脊髄レベル

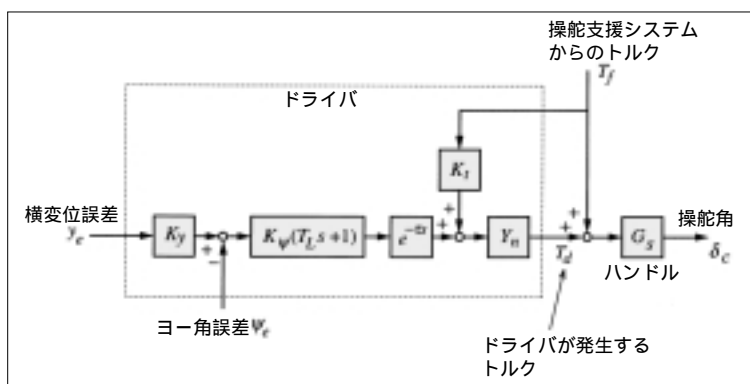


Fig.3 筋肉感覚情報を考慮した多入力ドライバモデル

で反射的に処理される。したがって、この情報に対しては複雑な処理は行われないと考えられるので、むだ時間のない比例動作のみとした。

4 - 2 ドライバモデルのパラメータ決定

ドライバモデルを用いたシミュレーションを行う際に問題となるのは、モデルパラメータの決定である。前述のように、ドライバのパラメータは自動車の特性に応じて変化するため、ある特定の自動車に対して決定されたパラメータには一般性がなく、特性が異なる他の自動車には適用できない。

そこで本研究では、ドライバが横変位誤差の2乗積分値によって計算されるタスクの達成度（制御成績）

$$TP = \int_0^T y^2 dt \quad \dots(13)$$

を最小にするように自らのパラメータ K_y, K, T_L を変化させるものと仮定する。これは、ドライバに課されたタスクができるだけ目標コースに追従するように自動車を走行させることを考慮したものであり、 TP が小さいほど目標コースへの追従が良いことを示す。このように考えると、ドライバのパラメータ決定問題は式(13)を評価関数とする最適化問題に変換される。すなわち、式(13)の評価関数は自動車、操舵支援システム、ドライバの動特性によって決まる閉ループ系の運動方程式を数値積分することにより、最適化すべき変数 K_y, K, T_L, K_f の関数として表現される。したがって、式(13)を最小とする最適パラメータは非線形最適化の数値解法によって求めることができる。

4 - 3 シミュレーションの条件

自動車は通常的小型乗用車を想定し、3秒ごとに直線路と半径300mおよび400mの曲線路が繰り返される目標コースを一定速度80km/hで走行する。また、横風による外乱がはたらく状況を想定し、ラン

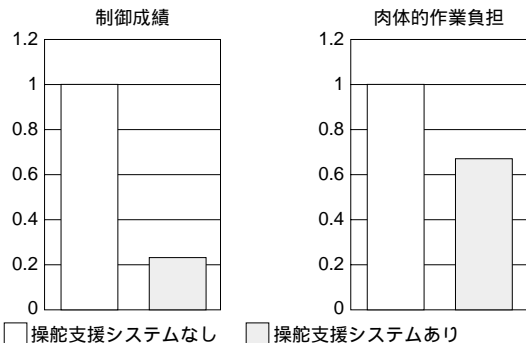


Fig.4 操舵支援システムの効果

ダムな横力が自動車に作用するものとした。離散時間で駆動される操舵支援システムのサンプリング時間は0.02秒、式(9)の最大予見ステップ M は50(予見時間1秒)、重み α は200である。 M と α の値は次の5章で述べるシミュレータ実験において、ドライバの主観的評価が高いものを選定した。

4 - 4 シミュレーションによる評価結果

Fig.4は正規化された制御成績 TP とドライバの肉体的作業負担 PW を用いて操舵支援システムの効果を比較したものである。ここで、 PW はドライバモデルが発生する操舵トルクの2乗積分値

$$PW = \int_0^T T_d^2 dt \quad \dots(14)$$

として評価した。この値が小さいほどドライバの運転動作における肉体的な負担が少ないことを意味する。この図は、操舵支援システムによって制御成績が向上するとともに、肉体的作業負担が減少することを示している。

ドライバの最適パラメータをFig.5に示す。ドライバ-自動車系の安定性を維持するためには、車速の増加につれて横変位誤差に対する比例ゲイン K_y を小さくしなければならない。この観点からFig.5を見ると、操舵支援のある場合には K_y が大きくなっていることから、この支援システムによってドライバはあたかも速度が遅い自動車を運転するような動作で、高速の自動車を運転できると考えられる。

また、Fig.5から操舵支援システムによってドライバの進み時定数 T_L が小さくなっていることがわかる。4 - 1 で述べたように進み時定数 T_L はドライバの微分動作の大きさを表し、この値が大きいかほど精神的作業負担が大きいことを意味する。したがって、この結果は操舵支援システムによってドライバの精神的作業負担が軽減されることを示している。

以上のシミュレーション結果から、提案する操舵支援システムにより制御成績が向上するとともに、

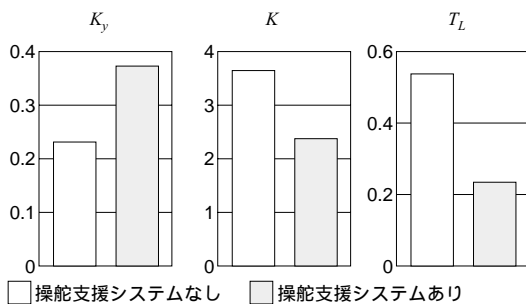


Fig.5 ドライバモデルのパラメータ

ドライバの肉体的、精神的作業負担が軽減される可能性が示唆された。

5. ドライビングシミュレータを用いた操舵支援システムの評価

前節のシミュレーションによる評価を確認するため、固定ベースドライビングシミュレータによる実験を行った。

5-1 実験条件

シミュレータのハンドル軸にはトルクモータが取り付けられ、コンピュータからのコマンド信号により任意の操舵トルクを発生させることができる。前章のシミュレーションと同様な目標コースを用い、横風による外乱がはたらく状況を想定してランダムな横力が自動車に作用するものとした。ドライバには「時速80km一定で走行する自動車为目标コースにできるだけ追従させるように150秒間運転する」ように指示した。

操舵支援システムのパラメータである式(9)の最大予見ステップと重み、および操舵支援システムが発生するトルクのゲインは、予備実験におけるドライバの主観によって適当な値を選定した。このとき、重みを小さくして横変位誤差の減少を重視するような仮想ドライバとした場合や、トルクのゲインを大きくした場合には操舵支援システムが発生するトルクが過大となることにより、ドライバが違和感を感じる事が経験された。

実験は次の三種類について行った。

実験Ⅰ：横力外乱が小さい場合

実験Ⅱ：横力外乱が大きい場合

実験Ⅲ：横力外乱は実験Ⅰと同じとし、走行中にサブタスクを課す場合

実験Ⅲのサブタスクとは主タスクである車線追従とは独立に与えられるタスクである。ここではセンターコンソール位置にあるラジオのチャンネルを調節するというタスクとし、これを150秒のシミュレーション実験中に指示されたタイミングで2回実行することとした。サブタスクを課すことにより、強制的にドライバの視線をセンターコンソール位置に移動させることになるので、車線追従に関する視覚情報が一時的に得られなくなる。このような状況は実際の走行でも起こり得るものであり、安全性の面から大きな問題となる。

被験者は運転免許をもつ健康な成人男子3名である。被験者は実験の手順について説明を受け、続い

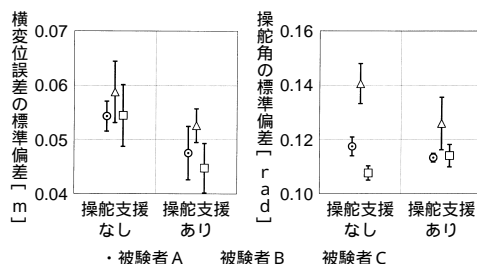


Fig.6 実験Ⅰの結果

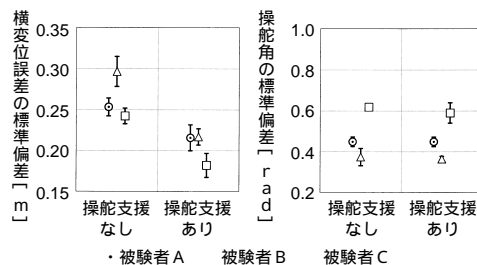


Fig.7 実験Ⅱの結果

て3種類の実験に十分習熟するまで練習走行を行った。その後、各条件において5回の実験を行った。

5-2 実験結果

横変位誤差の標準偏差によって定義される制御成績を車線追従タスクの達成度として用いた。また、実験においてはドライバが出力する操舵トルクのみをハンドルに加わるトルクから分離して計測することが困難なため、肉体的作業負担の指標として操舵角の標準偏差を用いた。

Fig.6は実験Ⅰの結果を示したものである。この図から操舵支援システムによって横変位誤差の標準偏差が減少し、車線追従性能が向上していることがわかる。しかし、この条件では操舵角の標準偏差には大きな差は見られなかった。

Fig.7は実験Ⅱの結果を示している。実験Ⅱと同様に操舵支援システムによって追従性能が向上していることがわかる。その向上の程度は外乱が小さい実験Ⅰの場合より顕著である。このことは外乱が大きく車線追従タスクが困難であるような場合に操舵支援システムの効果が大きいことを示している。また、実験Ⅱと同様に操舵角の標準偏差には有意差が見られなかった。しかし、操舵角はドライバの発生するトルクと操舵支援システムが発生するトルクの和によって決まることを考慮すると、操舵支援ありの場合、ドライバの発生する操舵トルクは減少しているものと考えられる。

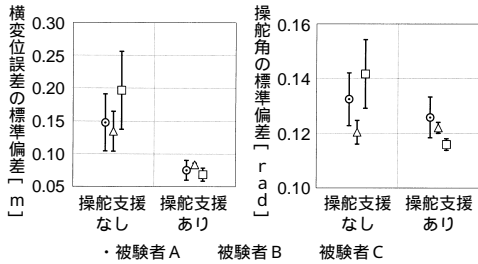


Fig.8 実験の結果

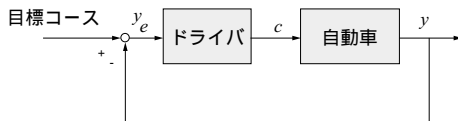


Fig.9 同定の際に仮定したドライバ-自動車系モデル

実験に見られる以上のような傾向は、ドライバモデルを用いたシミュレーションと同様である。このことはシミュレーションによる評価の妥当性を示すものと考えられる。

Fig.8はサブタスクのある場合の結果である。Fig.6と比較すると明らかなように、操舵支援なしでサブタスクを課した場合、制御成績は被験者全体の平均で2.87倍悪化している。これに対して操舵支援ありの場合、追従性能の悪化は平均1.57倍であり、そのばらつきも小さくなっている。すなわち、視覚情報の取得が断続的になるような状況でも、ハンドルから得られる筋肉感覚情報により制御成績の悪化を減少させることができる。このことは、車線追従からドライバの注意が移動したことによって生じる車線逸脱を、提案する操舵支援システムにより防止できる可能性を示している。また、被験者Cについては支援システムがある場合、操舵角の標準偏差にも有意差が認められた。

5-3 ドライバ動特性の同定

操舵支援システムがドライバの動特性に与える影響を調べるため、実験データからドライバの周波数応答を同定した。このとき、ドライバは横変位誤差を入力とし、操舵角を出力とするFig.9のような単純な1入力1出力系と仮定した。操舵角を出力とみなすことにより、同定されるドライバの周波数応答には操舵支援システムの影響が含まれることになる。同定には多次元自己回帰モデルの当てはめによる方法を用いた。

Fig.10は同定された結果の一例である。これからわかるように、操舵支援システムによってゲインの

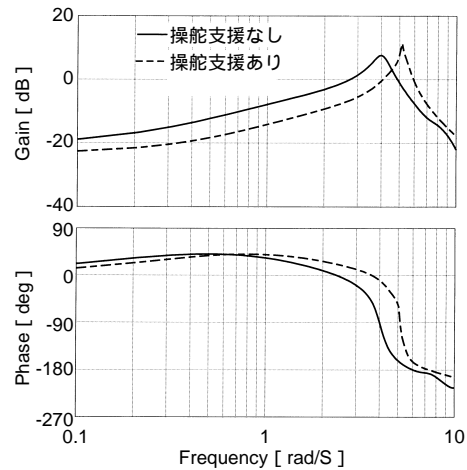


Fig.10 同定されたドライバの動特性（ドライバA）

ピークが高周波に移り、位相遅れが小さくなっている。これは操舵支援システムを含むドライバの固有振動数が高くなり、速応性が増加したことを示している。このことから、操舵支援システムによって制御成績が改善される理由は、ドライバの速応性の向上によるものと考えられる。

6. 結論

本論文では仮想ドライバのコンセプトに基づく車線追従のための操舵支援システムを提案し、ドライバモデルを用いたシミュレーションとドライビングシミュレータによる実験によりその効果を評価した。

ドライバモデルを用いたシミュレーションの結果は、提案する操舵支援システムによって車線追従の制御成績が向上し、ドライバのワークロードが軽減される可能性のあることを示した。この結果はドライビングシミュレータによる実験でも確認された。特に、外乱が大きく車線追従タスクが困難である場合や車線追従から注意が移動したような場合に操舵支援システムの効果が大きいことがわかった。さらに、ドライバの周波数応答を同定し、操舵支援システムによって制御成績が改善される理由は、ドライバの速応性の向上によって説明できることを示した。

本論文では車線追従タスクの支援のみを考えたが、このような支援は車線変更や障害物回避などのタスクに対しては干渉を生じる可能性がある。ドライバの意思やタスクに応じて適切な支援を行う、よりインテリジェントなシステムの研究が今後の課題である。

参考文献

- 1) Matthews, N. D. et al.: A Neurofuzzy Approach to Future Intelligent Driver Support Systems, Proc. IMechE, Vol. 212, Part D, pp. 43-58, 1998
- 2) Naab, K. and Reichart, G.: Driver Assistance Systems for Lateral and Longitudinal Guidance - Heading Control and Active Cruise Support -, Proc. AVEC '94, Tsukuba, JAPAN, pp. 449-454, 1994
- 3) LeBlanc, D. J. et al.: A Warning and Intervention System to Prevent Road-Departure Accidents, Proc. of 14th IAVSD Symposium, Ann Arbor, MI, pp. 383-396, 1995
- 4) Yuhara, N. et al.: Experimental Evaluation and Analytical Validation of Driver Assistance System for Lane-Following, The 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, Berlin, Germany., October, 1997
- 5) Reichelt, W. and Frank, P.: Driver Assistance Systems to Improve Active Safety in the Closed-loop System Driver-Vehicle-Surroundings, International Journal of Vehicle Design, Vol. 18, No. 6, pp. 639-651, 1997
- 6) Clarke, D. W. et al.: Generalized Predictive Control-Part1. The Basic Algorithm, Automatica, Vol. 23, No. 2, pp. 137-148, 1987
- 7) 真島英信、松村幹郎 『生理学 第5版』 金芳堂、1996年
- 8) Horiuchi, S. et al.: An Automotive Lateral Controller Based on Generalized Predictive Control Theory, JSAE Review, Vol. 21, pp. 53-59, 2000
- 9) 安部正人 『自動車の運動と制御』 山海堂、1992年
- 10) Goodwin, G. C. and Sin, K. S.: Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice-Hall, 1984
- 11) McRuer, D. T. et al.: Measurement of Driver-Vehicle Multiloop Response Properties with a Single Disturbance Input, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-5, pp. 490-497, 1975
- 12) McRuer, D. T. et al. and Krendel, E. S.: Mathematical Model of Human Pilot Behavior, AGARD-AG-88, 1974