

連続運転時における操舵機能低下の評価法

福井勝彦

The Method of Assessment of Drivers' Steering Ability during Continuous Driving

Katsuhiko Fukui

要 旨

連続運転によるドライバの操舵機能の低下状態を判定する手法について検討を行った。まず、操舵機能の指標として操舵動作から操舵遅れ時間と横変位量を推定する手法を検討した。ここでの検討では操舵機能変化を検出するための修正操舵の抽出法ならびに運転環境によって生ずる操舵機能変化の補正法について明らかにした。つぎに、これらの指標の変化状態からドライバの機能状態を定量化し、機能低下を判定した。定量化はドライバの特性に応じた基準値を実時間で設定し、それにもとづきファジィ推論を用いる手法について検討した。ドライバの機能低下を判定した結果は疲労に関する自覚申告や生体情報（脳波中の α 波出現率や選択反応時間）との対応により、その妥当性について検証を行った。判定値と他の測定値との間には相関関係を見ることができ、操舵機能の評価法としての妥当性を確認した。また、修正操舵操作モデル化による検討により、操舵遅れ時間は操舵系のむだ時間（認知、判断時間）、横変位量は操舵ステップ（認識閾値、操舵分解能）、むだ時間、操舵ゲインなどの変化による影響を受けていることを推測した。

Abstract

The methods of evaluating drivers' steering ability from their steering maneuver during driving are presented. The characteristic values in these methods are time lag in steering and lateral displacement of cars, which are estimated by changes of drivers' steering maneuver. Noticing the fluctuations of the values under various conditions, the degree of drivers' steering ability is also estimated at real time by Fuzzy-algorithmic approach, with the criterion made by the drivers' steering behavior. Low levels of concentration of drivers are evaluated by the degree of their steering ability. The evaluated values are found to coincide with the reduction in drivers' fatigue and physical data, and these methods prove effective in evaluating drivers' conditions.

キーワード 操舵機能評価, 連続運転, 予防安全性, 操舵特性

1. はじめに

自動車の安全性向上を背景として、予防安全技術の発展が期待されている。また、意識低下や疲労、さらにこれらによって引き起こされる居眠り運転の防止技術などに関する分野の研究としては、数々の指標に応じた研究が進められている。たとえば、運転動作変化についての研究¹⁻⁴⁾や、車両挙動変化についての研究⁵⁾、

生体情報による研究⁶⁻⁹⁾などが行われ、その成果が報告されている。このような検討によりドライバの運転状態の検出を行い、その状態に応じた適切な運転環境の提供などが可能になっていくと考えられる。

当所においても操舵機能の観点から車両の予防安全の評価解析に関する検討を行っており¹⁰⁾、本稿では連続運転時における機能低下の評価法の可能性について検討した結果を報告する。

2. 操舵機能の指標化

ドライバの操舵特性はFig. 1に示すような人間 - 自動車系からなる閉ループ制御系と考えられ、ドライバは現在の車両情報から将来の車両位置を予測し、道路形状との偏差（前方偏差）に応じて操舵を行っている¹¹⁾。ドライバの操舵機能が高い場合にはこれらの前方偏差の予測、認知ならびに操舵動作は適切に行われ安定した運転状態を保っている。しかし、運転が長時間にわたるような場合や、その時間帯によっては外部環境や内部要因による機能低下によって、これらの処理系に変化が生じてくると考えられる。

高速道路のような外乱が少なく、車線内を維持していくような走行条件での操舵モデルは概念的にFig. 2に示すようなむだ時間を含む閉ループ系として考えることができる。

ドライバは前方偏差に対して認知判断などの処理に要するむだ時間 τ の遅れをもって操舵ゲイン K で操舵する。車両情報として操舵角の積分された情報、例えばヨー角や横変位量などが主にフィードバックされている。このような閉ループ系での安定状態は図に示されるように K 、 τ の値に依存している。図中には振動が持続するような K 、 τ の関係を実線で示している。 K 、 τ の値がそれより上側になると発散傾向となり、逆に下側になると収束傾向となる。

ドライバは上記のむだ時間、操舵ゲインなどを適切な値に適応させることにより安定した運転を維持しているが、これらの値が発散傾向（振動の増加）を示すような場合にはドライバに機能低下が生じていること

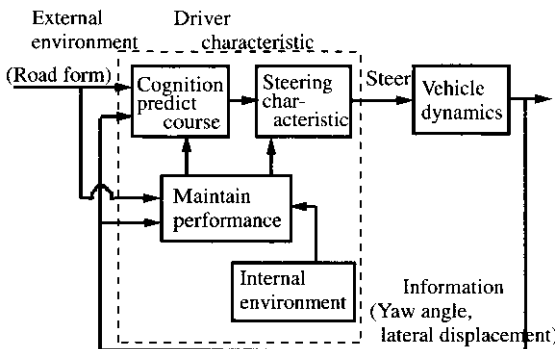


Fig. 1 Block diagram of driver-vehicle system.

が考えられる。

そこで、操舵機能の指標として以下の値を操舵動作から推定し、これらの値の変化から操舵機能の低下を評価する。1)ドライバの制御能力の指標として前方偏差に対して行う操舵動作の遅れ時間、2)制御成績として目標コースからの偏差に相当する横変位量、これらを操舵機能の指標とした。

2.1 操舵遅れ時間の推定

Fig. 3(A)は直進時の前方偏差と操舵角の時間波形を示したもので、直進状態を維持するために常に微小な修正操舵を繰り返している。図のように、ドライバは前方偏差に対して遅れをもって操舵しているようすがわかる。また、これらの時間波形の相互相関関数からドライバの前方偏差に対する遅れ時間を算出した結果を同図(B)に示した。

Table 1は一般路におけるドライバの操舵角に対する前方偏差（1次予測における前方注視距離は相関係数が最大となる値を設定）、ヨー角、横変位の相関係数を算出した例である。前方偏差、ヨー角の相関係数の平均値は約0.7で、横変位では0.56となり前方偏差、ヨー角との相関が高いことがわかる。

そこで、本評価ではドライバの操舵の遅れ時間をヨー角に対する操舵角の遅れから推定する。Fig. 3(C)に示すように、一般に直進を維持するようなゆっくりとした操舵状況では、操舵に対するヨーレートの位相遅れは少なく、ほぼ操舵に比例すると仮定できる。この

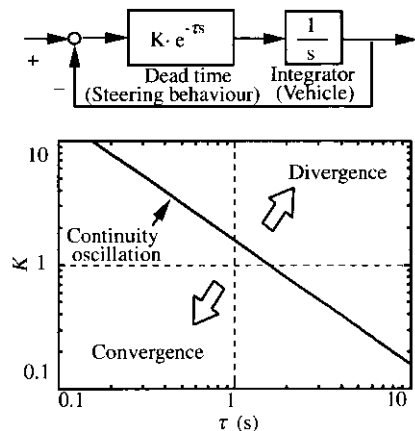


Fig. 2 Stability of closed loop controller include dead time.

ことから、ヨー角は操舵角の $\pi/2$ の位相遅れ(1階積分)になり、ヨー角に対する操舵の遅れ時間は操舵周期(閉ループ系の固有周期)の1/4に相当すると考えられる。

2.2 車両横変位置の推定

制御成績となる横変位置 Y_{rms} (rms値相当)は操舵量 δ_{rms} と操舵周波数 $f\delta$ 、車速 U 、操舵ギヤ比 n 、ホイールベース l 、スタビリティファクタ A などから式(1)にもとづき算出した。(式(1)右边第1項は2階積分,第2項は操舵に対する横向き加速度の定常ゲインに相当)

$$Y_{rms} = \frac{1}{(2\pi \cdot f\delta)^2} \cdot \frac{U^2}{n \cdot l(1 + A \cdot U^2)} \cdot \delta_{rms} \quad (1)$$

2.3 修正操舵の抽出

これまで直線路での走行にもとづき検討を行ってきた。しかし、実際の道路形状はFig. 4の操舵波形に示されるように直線路と曲線路との連続複合路になっている。曲線路での操舵は道路形状による操舵と修正操舵とからなっていると考えられる^{1,2)}。このうち道路形状による操舵は道路の曲率などにより定まりドライバの特性に依存しない。そこで、本評価ではドライバの操舵特性が現れる修正操舵成分を抽出し、この修正操舵からドライバの操舵機能を評価した。修正操舵の抽出は道路形状を二次曲線路と仮定した操舵角の0点の補正により行った。Fig. 4には曲線路での操舵動作を含む測定操舵角と、それから道路形状を二次曲線として除去した修正操舵角を示している。

3. 操舵機能指標の補正法

ドライバは外部環境の変化に応じて運転の状態をつねに適応させている。そこで以上のように推定した操舵機能指標が走行条件などによりどのような影響を受け、これらの指標の変化が操舵機能の評価に影響を及ぼす場合の補正方法について次に検討する。

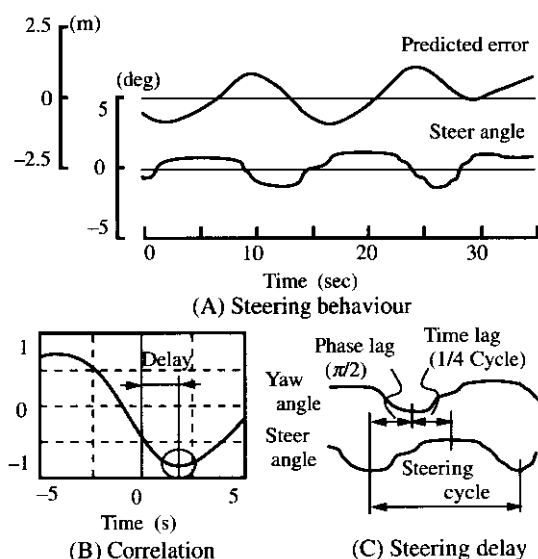


Fig. 3 Steering angle in straight-running.

Table 1 Correlation of steer angle to predicted error.

Subject	Predicted error	Yaw angle	Lateral displac.
A	-0.77	-0.75	-0.56
B	-0.69	-0.70	-0.55
C	-0.77	-0.75	-0.64
D	-0.62	-0.60	-0.47
Average	-0.71	-0.70	-0.56

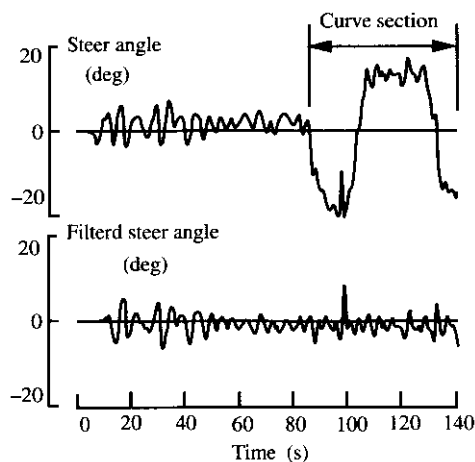


Fig. 4 Filtered steer angle.

3.1 車両応答による補正

走行条件などにより運転車速は変化する。このとき、操舵に対する車両の応答特性は異なってくる。さらに、ドライバは車両の応答特性の変化に応じて操舵特性を適応させている。Fig. 5は車両の横向き加速度の変化に対しドライバがどのように操舵特性を適応させるかを測定した結果である。各々の値は基準車速(100km/h)における値で正規化している。図中の横向き加速度の定常ゲイン比が高いほど車速の高い状況の特性を示しており、ドライバは高速時に操舵遅れ時間を減少させる傾向が見られる。この原因として次のことが考えられる。横変位置、操舵遅れ時間(操舵周期の1/4に相当)、横向き加速度の定常ゲイン、操舵量には式(1)に示されるような関係がある。同式に表されるように、横向き加速度の定常ゲインの変化に対して操舵遅れ時間を反比例させることによって横変位置は一定になることがわかる。図中の実線はこのような特性の操舵遅れ時間を示しており、測定結果もほぼ対応している。このように、ドライバは車速が高速になり車両が高応答になれば操舵遅れ時間を少なくし、逆に低速で低応答になれば操舵遅れ時間を大きくすることにより横変位置を一定な値に保っていると考えられる。

このようなドライバの特性により、操舵機能を評価するための操舵遅れ時間は式(2)に示すように推定した操舵遅れ時間 T_d を基準車速相当の操舵遅れ時間 T_0 に正規化し、車速変化の影響を除去している。

$$T_0 = T_d \cdot \sqrt{G/G_0} \quad (2)$$

ここで G : 走行車速ゲイン, G_0 : 基準車速ゲインである。

Fig. 6は操舵遅れ時間を基準車速相当に補正した効果を示している。この被験者の場合、補正を行わない場合、運転開始後の45分までの操舵遅れ時間が全体に高い値を示している。しかし、このときドライバの自覚申告は正常な状態を申告しており、機能低下以外の要因による増加と考えられる。これに対し、この区間の補正した操舵遅れ時間は、ほぼ平均的な値になっており、操舵遅れ時間の増加は他の区間に比べ車速が低いことが原因であり、上記の補正によってその影響を除去できることがわかる。

3.2 道路形状による補正

横変位置に関する補正としては道路形状による補正を行っている。Fig. 7は曲線路を多く含む道路を走行したときの操舵機能指標の変化を示している。曲線路の部分での横変位置の増加傾向が見られる、これは曲線路では操舵の目標となる前方偏差の予測が、直線路での予測に比べむずかしく、修正操舵の操舵誤差が増加し、これに伴い横変位置が増加していると考えられる。そこで、このような道路形状による横変位置の増加を補正する。補正は操舵角の道路形状による成分から道路曲率を推定し、その曲率の変化に応じた補正係数により横変位置を補正し、道路形状の影響を除去し

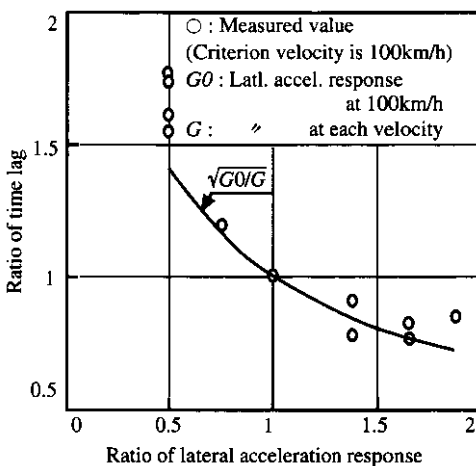


Fig. 5 Drivers' steering maneuver on each velocity.

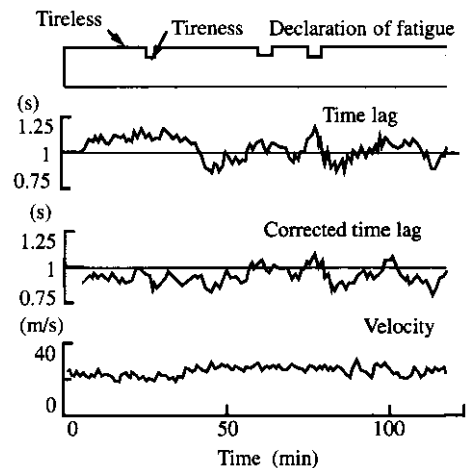


Fig. 6 Effect of corrected time lag due to velocity.

ている。同図中には道路形状に応じた補正結果もあわせて示している。補正により曲線路部分での横変位量の増加分が取り除かれており、操舵機能の変化によると考えられる変動が観察できる。

4. 操舵機能の評価

以上のように推定した操舵遅れ時間、横変位量から操舵機能を評価し、機能低下の指標としての妥当性について検討する。まず、これらの指標とドライバの生体情報、疲労や眠気に関する自覚申告との関係について検討し、つぎにドライバの操舵モデルにより各々の指標と操舵要素との関係について検討する。

4.1 操舵機能評価値

操舵遅れ時間、横変位量はドライバや走行状態などに応じた基準状態があり、それを基準に変動している。そこで本評価では走行データの履歴を用いて実時間で個々のドライバの特性に応じた変動幅などの評価基準を作成し、その基準により操舵遅れ時間ならびに横変位量の正規化を行っている。正規化することにより個人差による評価のばらつきを少なくしている。また、これらの2状態量を総合した操舵能力の指標を得るため、Fig. 8に示すようなファジィ推論を用いて操舵機能評価値を算出している。これは、評価が特定の指標に依存することの防止や、新たな指標の追加、組み合わせの自由度が高いことなどによる。評価値は+1～

-1に正規化されており、+の値が高いほど操舵機能の低下が大きいことを示している。

4.2 評価結果

4.2.1 生体情報測定結果との対応

本項では運転中の生体情報を測定し、これと操舵機能との対応について検討する。生体情報としては認知判断機能に関連すると考えられる選択反応時間と、覚醒度の指標として脳波を測定した。選択反応時間は点灯する電球の色(3色)に応じてステアリング上のスイッチ(左右握り部分に各1個取り付け2色に各々対応、1色は無操作)を選択して押し分け、その反応時間を測定した。脳波は覚醒度の低下時に増加するとされている α 波(8～13Hz)の時間出現率との比較を行った。

Fig. 9は運転中における測定結果の時間波形を示している。運転開始後30分くらいで疲労状態の自覚申告があり、それに対応して選択反応時間、 α 波出現率の増加が見られる。一方、操舵遅れ時間、横変位量、操舵機能評価値にもそれにほぼ対応した増加傾向が見られている。

Fig. 10, 11は選択反応時間とその他の指標との相関を示している。相関係数は0.69～0.81の値が得られており、いずれの指標の間にも相関関係を見ることができる。図に示した試験では α 波出現率の増加傾向が見られることから覚醒度の低下が機能低下の主要因となっており、それによって認知判断の指標である選

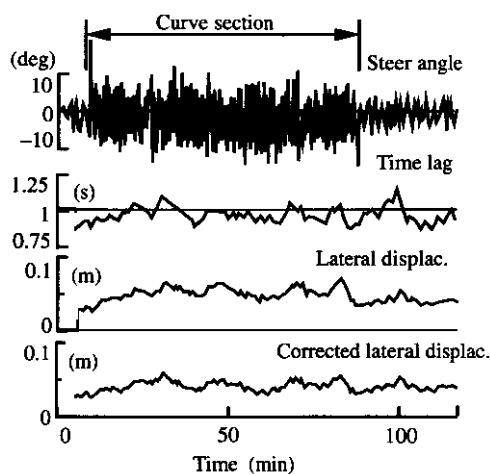


Fig. 7 Drivers' steering maneuver in curve section.

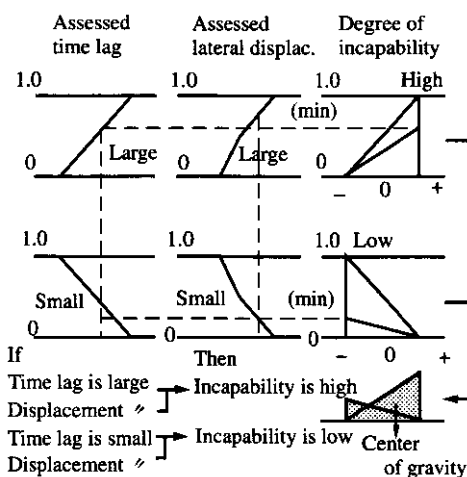


Fig. 8 Degree of fatigue by fuzzy algorithm.

反応時間の増加や操舵機能の指標である操舵遅れ時間や横変位量の増加が生じていると考えられる。これらの指標の相互関係は運転条件などによって変動要因、影響の大きさなどが異なっており、特定の指標間でのみ相関が見られる場合も考えられるが、覚醒度、認知判断機能、操舵機能などが相互に関連していることが確認できる。このように操舵機能評価値は生体機能の変化を運転機能に置き換えて評価していることができる。

4.2.2 操舵機能低下判定

提案した指標は生体情報などとの対応も見られ、操舵機能指標や操舵機能評価値により操舵機能の低下の

判定が可能であると考えられる。

操舵機能評価値は過去数分の測定データを用いることにより、ドライバのゆっくりとした特性変化のトレンド、すなわち連続走行での意識状態などによって変化する操舵機能のレベルを判定できると考える。また、操舵機能レベルが低下傾向の状態にある時の、サンプリングデータごとの横変位量などの増加により短期的な機能低下を判定できると考える。本項では操舵機能評価値が規定値（0.65）を超えた場合を機能低下と判定した結果について、ドライバの疲労や眠気に関する申告との対応により判定結果の妥当性を検討する。

Fig. 12は上記の判定基準にもとづく操舵機能低下を

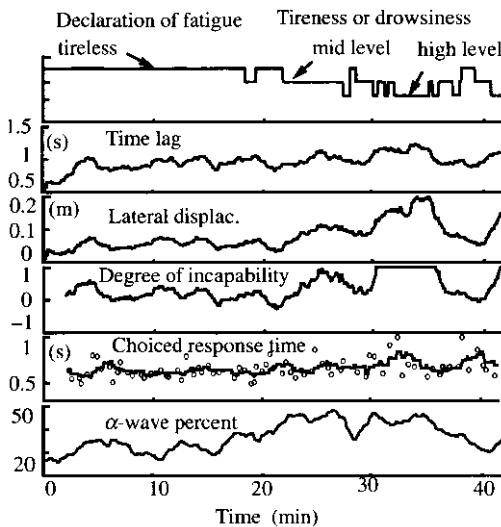


Fig. 9 Fluctuation of physical information.

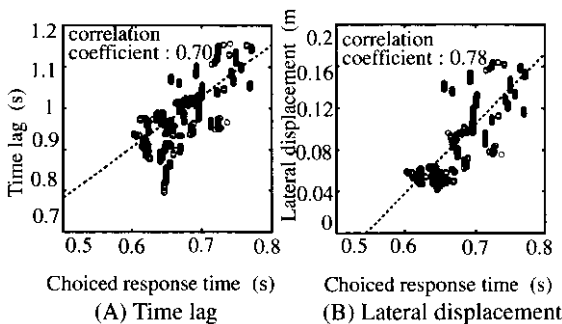


Fig. 10 Correlation to choiced response time -1.

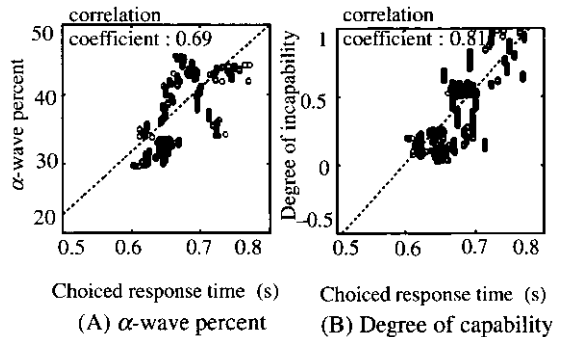


Fig. 11 Correlation to choiced response time -2.

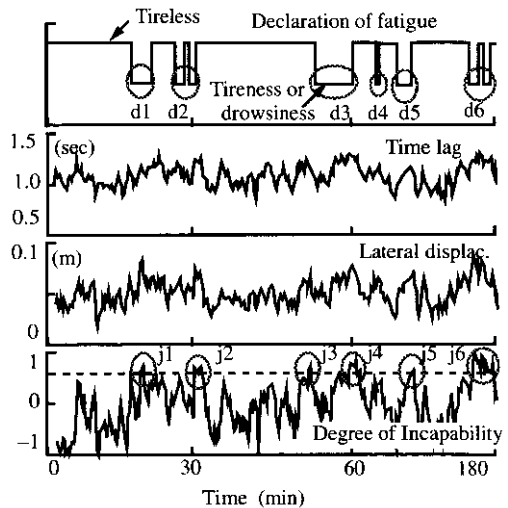


Fig. 12 Fatigue assessment by steering maneuver.

判定した結果を示している。3時間の走行で大きく分けて6回の疲労状態が申告されている（図中d1～6）。一方、操舵機能評価値により6回の判定が行われている（図中j1～6）。これらの申告と判定との一致度を見ると、d4をのぞく申告についてはほぼ対応した判定が行われている。また、j3を除く判定については申告にほぼ対応している。

Table 2に東名、名神、中央道の高速道路を走行したときの疲労や眠気の申告回数とその申告に対応する判定が操舵機能評価値により行われた回数ならびに操舵機能低下の判定回数とそれがドライバの申告に対応した回数について示した。自覚申告と操舵機能低下の判定とは比較的よい対応が得られていることから、操舵機能指標の補正や評価基準の設定などが適切に行わ

Table 2 Coincidence of assessed values and declaration of fatigue.

Subject	Stated frequency			Assessed frequency		
	Declaration	Agreement	Percent of true	Decision	Agreement	Percent of true
E	2	2	100%	3	2	67%
"	8	4	50	6	4	67
"	4	3	75	6	4	67
F	4	2	50	4	2	50
"	5	3	60	8	5	63
"	4	2	50	8	4	50
"	3	3	100	6	4	67
"	2	2	100	5	3	60
G	5	3	60	11	7	64
H	3	2	67	3	2	67
I	4	2	50	5	4	80
J	6	4	67	11	4	36
"	3	3	100	7	5	71
K	3	3	100	6	3	50
"	7	5	71	8	5	63
L	7	3	43	6	3	50
M	6	5	83	6	5	83
Average	4.5	3.1	73	6.5	4.0	63

These values were declaration of fatigue and assessed on highway running of 80 to 120 minutes.

れていると考えられ、操舵機能の評価法としての妥当性を確認した。

4.2.3 操舵モデル評価

以上のように操舵遅れ時間、横変位量などにより操舵機能の評価が可能であることを確認した。これらの指標は測定や推定が直接的にできることが特徴であり、ドライバの状態を判定するためには有効である。本項ではそれらの指標の変動要因を操舵モデルにより検討する。評価に用いる操舵モデルは車線内の走行を維持するような状況においての修正操舵を対象とし、操舵が比較的ゆっくり行われているような微小操舵の領域を模擬する。そこで操舵要素としてはFig. 13に示すように以下の要素に限定している。

1) 操舵ステップ：1回の修正操舵量、フィードバック偏差量として認知できる認識閾や操舵を行う上で調節できる操舵量などに対応。

2) むだ時間：修正操舵を行う上で情報伝達や判断などの時間に対応。

3) 一次遅れ：操舵を行うための筋力系の遅れに対応（操舵ゲイン（操舵量/偏差量）もこの要素に含める）。

上記の操舵要素と操舵機能指標との関係についての検討結果をFig. 14, 15に示した。

Fig. 14は操舵遅れ時間にしめる各操舵要素の時間割合を示している。図に示すように操舵遅れ時間の増加にはむだ時間による影響が大きくなっており、操舵ステップ、一次遅れなどの要素変化による影響は通常の修正操舵の領域では少なくなっていることがわかる。

Fig. 15は横変位量の発生量と各操舵要素との関係について示している。横変位量はすべての操舵要素の影響を受けやすく、操舵ステップ、むだ時間、操舵ゲインの値に応じて横変位量が増加することがわかる。

上記のように操舵遅れ時間は情報伝達系の遅れや判

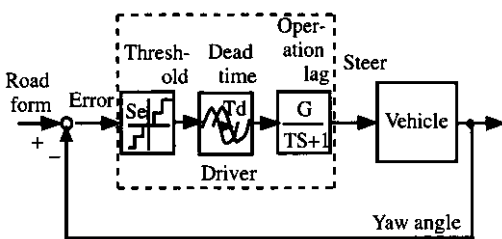


Fig. 13 Block diagram of driver model.

断時間の増加などにより大きくなり、横変位量は認識閾や修正操舵の操舵ステップの増加や、判断時間の増加などに応じて大きくなることが考えられる。このような操舵要素の変化が連続運転による機能低下などにより引き起こされ、その結果として操舵機能指標の変動として測定されていると考えられる。

5. まとめ

連続運転時における修正操舵から推定した操舵遅れ時間、横変位量から連続運転時の操舵機能の評価の可能性についての検討を行い、以下のような知見を得た。

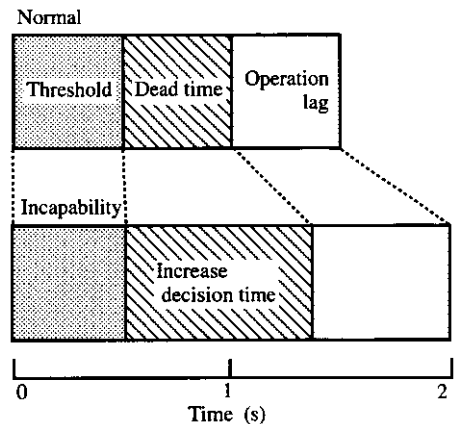


Fig. 14 Factor of time lag.

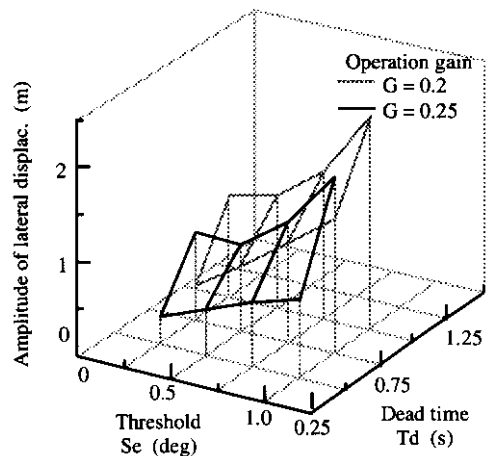


Fig. 15 Factor of lateral displacement.

1)操舵遅れ時間，横変位量などの操舵機能に関する指標と生体情報（覚醒度，認知判断機能）との間には相互に関連があることを確認した。

2)個人差などを考慮した評価基準により，操舵機能の低下を判定した結果，疲労や眠気に関する自覚申告とよい対応を示し，機能指標の補正や評価基準の設定などの本評価法の妥当性を確認した。

3)操舵ステップ，むだ時間，一次遅れなどの操舵要素からなる操舵モデルの検討では操舵遅れ時間はむだ時間（認知，判断などの時間）の影響を受け，横変位量はすべての要素の影響を受けていた。

参 考 文 献

- 1) 麻生："ドライバーの生理反応と運転パフォーマンスの変化"، 日本人間工学会第20回大会論文集, (1979), 66
- 2) 世古："ドライバの居眠り状態を検出する技術の現状", 自動車技術, 38-5(1984), 547
- 3) Tarriere, C., et. al., : "Reserch to Prevent the Driver from Falling Asleep Behind the Wheel", 18th Int. Symp. Automot. Technol. Automot. 1988, Vol.1, (1988), 88055, 1
- 4) 福田, ほか："修正操舵認識による意識低下推定法の検討", 自動車技術会春季学術講演会前刷集, 941(1994), 33

- 5) 山本, ほか："車両の蛇行と覚醒度の相関について", 自動車技術会春季学術講演会前刷集, 941(1994), 25
- 6) 児玉, ほか："皮膚電位を用いた覚醒度検出装置の開発", 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 912(1991), 213
- 7) 金田, ほか："居眠り検出技術に関する研究", 自動車技術会春季学術講演会前刷集, 941(1994), 29
- 8) 川上, ほか："運転者の覚醒度低下", 自動車技術, 46-9(1992), 29
- 9) 岸, ほか："ドライバの覚醒度評価手法について", 自動車技術, 46-9(1992), 17
- 10) 福井, ほか："ドライバ操舵特性を用いた疲労度判定に関する一考察", 自動車技術会論文集, 24-1(1993), 135
- 11) 近藤："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), 40
- 12) 大野："曲線路における操舵", 自動車技術, 20-5(1966), 413

著 者 紹 介



福井勝彦 Katsuhiko Fukui

生年：1955年。

所属：人間機械系研究室。

分野：操舵動作解析による人間-自動車系の研究。

学会等：自動車技術会会員。