

微分項を含んだ操舵系の研究

Studies on the Steering System which has Differential Term

平 尾 取*

Osamu HIRAO

自動車の安全性を考える場合に、事故が発生したときの損害をできるだけ小さくしようという立場からの検討と、できるだけ事故が発生しないような性質を自動車に与えるという立場からの検討と二つの態度がある。この第二の観点から自動車の安全を考える場合に運転者は常に事故が起こらないように自動車を操縦する努力を払っているという前提を設けると、自動車の動特性を人間の制御しやすいものにするのが重要であるということになる。すなわち人間—自動車系の動特性の改善ということが一つの重要事項となってくる。安全の問題を論ずるには人間から切りはなした機械としての自動車の研究から人間—機械系としての「自動車」の研究が必要なのである。

自動車は今後ますます高速で用いられるようになっていくであろうが、この場合安全性も確保した上での高速でなければならないことはいうまでもない。現在の高速道路を走る場合の平均常用速度はほぼ 100~120 km/h 程度のものであるが、これをもっと高速にするといくら道路がよくても安全性が低下して事故が多発することが知られている。この場合の問題点はタイヤの信頼性と人間の制御能力の限界の 2 点にしばられるといつてよいのである。タイヤの高速における信頼性の向上の研究は一応タイヤメーカーにまかせるとして、筆者の研究室では人間の制御能力の限界の問題についてすこし検討を始めているので、そのことに関連していわゆる微分ハンドルの紹介をしてみよう。

一般的にいて、人間が自動車を運転する場合に、楽に安全に運転できるかどうかは運転するに当たっての人間の負担が小さいかどうかということできまると考えてよいと思う。この場合の負担としては“情報検出のための負担”、“情報処理のための負担”および“制御操作のための負担”の三つに分かれる。

高速道路というものは立体交差と、なだらかな線型を取り入れることによって情報の検出と処理の負担を極力軽減した道路と考えるとよい。また操作のための負担を少なくするためにはパワステアリングとか、パワブレーキ、イーゼードライブなどが考えられる。しかし現在よりもっと高速にということになると、まっすぐな道走るだけでも安定に走るための制御の負担が大きくなり、安全性がそこなわれることになるために事故多発ということになるのである。

そこでこのような高速においては、運転者がどのようにして自動車を安定に操縦しているかをまず考えてみると、ハンドルを少し切ってはすぐもとにもどすという操舵を右、左にくり返していることは周知のとおりだが、これはなにをしているのかというと、自動車の進む向きを修正していることになる。右に少し切っただけでももとにもどすという操舵をすると、操舵する前に比べて車は少し向き

を右へ変えて直進をつづけることになる。だからそのままにしておくと、自動車は路の左端の方へ寄っていくので、今度は左に切っただけでももとにもどすという操舵をする。こうすれば今度は車の向きは少し左に変わり、路の左方へ寄り始める。まっすぐ走っているようでも、実はこのような操舵をくり返して、わずかに左右に蛇行しながら走行しているわけである。このような制御の仕方を解析的に考えると、運転者は微分操作によって方向の制御を行なっているということになる。そして人間工学の研究によれば、このような微分操作を人間に行なわせるということは、人間の負担をかなり増すことになることが知られている。そこでこのような微分操作を人間から自動車のハンドル機構の方に肩がわりさせよう、と考えたのが微分ハンドルのそもそもの発想の源ということができる。

普通だと車の向きを変えるためにハンドルを一定の角度だけ切ったら、車が向きを変えおわらないうちにまたハンドルをもどす操作が必要である。ところがこの微分ハンドルは、もどすという必要がない。自動車が行きたい方向を向いたときに切るのをやめればそれであとはまっすぐに走ってくれる。

どうか微分という言葉に驚かないでほしい。決して頭の痛くなる数字ばかりが、このハンドルのすべてではない。それどころか、今のハンドルよりもいっそう人間に対する適合性のたかいものとして、というよりそれをめざして考えられたものなのである。

以下に紹介するものは実験の段階であるが、このような考え方は将来新しいハンドル機構として実用化も夢ではないと思う。

微分ハンドルについてくわしく説明する前に、ステアリング操作と、自動車の動きについて説明を加えよう。

いま x の方向に直進している自動車の舵を右に α だけ切ったとする。すると自動車は x の方向から右手の方にそれて走っていくわけだが、このそれていく角度を φ (ファイ: 姿勢角) とすると、この姿勢角 φ は舵角 α と x 方向へ動いた距離 (速度 $v \times$ 時間 t であらわされ

* 東京大学生産技術研究所第 2 部

る)にほぼ比例して変わる。この比例常数はホイールベースの長さ l にほぼ逆比例する。これを式で示せば

$$\varphi \doteq \frac{x}{l} \cdot \alpha$$

x は走った距離であるから速さを v (m/s), 時間 t (s) とすると $x=v \cdot t$, これを代入して

$$\varphi \doteq \frac{v}{l} t \cdot \alpha$$

ということになる。

自動車の重心の横への動きは、この φ にまた進行した距離をかけたものになるので、 y を重心が横方向にうごく距離とすると

$$y \doteq \varphi \cdot x \doteq \frac{v^2}{l} t^2 \cdot \alpha$$

で示される。舵角 α はハンドルをまわした角度 θ をハンドル系の全ギヤ比 c_0 で割ったものであるから $\alpha = \frac{1}{c_0} \theta$ となる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \text{姿勢角 } \varphi &\doteq \frac{v}{c_0 l} \cdot \theta t \\ \text{横方向の動き } y &\doteq \frac{v^2}{c_0 l} \theta t^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

θt …切ったハンドル角度に時間をかけたもの、これは舵角を時間で積分したものとイえる。したがって姿勢角は舵角を時間で積分したものに比例するということができる。ひらたくいうと、ハンドルを θ だけ切ってそのままどんどん走っていくと姿勢角はどんどん時間に比例してふえていく。そしてその時の比例常数は $v/c_0 l$ である。横方向の動き y は時間の 2 乗に比例してふえていくということで姿勢角をまた時間で積分したものに比例するということになるのである。したがって横変位は切った舵角 θ を時間で 2 度積分したものに比例するということになる。そしてこの時の比例常数は $v^2/c_0 l$ となっている。

普通のハンドルとどう違うか

普通のハンドルはハンドルをまわすとギヤによって前輪の舵角がハンドルの角度に比例して変わり、 $\alpha = \theta/c_0$ となることは前に示した。ギヤ比が 15 : 1 であればハンドルを 15° まわすとタイヤは 1° きれるということになる。

微分ハンドルの場合はハンドルをまわすときの速さというものが関係してくる。すなわちある値 θ だけハンドルをまわすのに t 秒かかったとすると、舵角はハンドルの角速度すなわち θ/t に比例して変わるのである。すなわち $\alpha = \theta/c_0 t$ の関係になるようにするのである。このことは操舵する場合ハンドルをまわしはじめてからだんだん速くまわしてゆき、やがて一定の角速度になり、さらにハンドルはおそくなってハンドル操作をおわるのであるが、この場合タイヤの角度はどのようになるかというとはじめは舵角 α はだんだん増していくが、ハンドルが一定角速度に達した時をさかいてして舵はもどりはじ

め、最後にきりおわったときはハンドルの角速度は 0 となるので、タイヤはまっすぐにもどっていることになる。

普通ハンドルでは、ハンドル角を θ だけきってとめていると姿勢角はどんどん時間とともにふえていくが、微分ハンドルでは θ だけ切ってそのままにしていると上述のように舵はまっすぐにもどってしまうから車はある角だけむきをかえて、そのまままっすぐに走っていくことになる。どちらが安定かという、微分ハンドルの方が安定ということがいえる。

自動車を円運動させたいときには普通ハンドルならばハンドルをまわしてそのままとめているわけだが、微分ハンドルではハンドルをまわし続けていないと円運動をしない。しかし方向をかえたい時にはハンドルをまわしさえすれば、まわしただけ車の向きが変わって、ハンドルをまわすのをやめればすぐ直進に入るから、向きをかえるときにはハンドルの切りもどし操作は不要になる。普通ハンドルで θ だけまわすことは上述のように円運動に入る操作になるから自分の行きたい方向に姿勢角が近づいたときこんどは直進させる操作をすることが必要になる。これがハンドルをもどす操作であるが、微分ハンドルでは向きを変えるという場合にはハンドルをもどさなくても、まわすのをやめれば舵角はひとりでに 0 になっているというわけである。

たとえば右折しようとする場合、ハンドルを右に切ることは必要だし、運転を知らない人でも納得のいく操作であるが、曲ってからまた真直に進行させるためにハンドルをもどすという感覚は自動車の運転を知らない人では考えることができないのが普通である。そんな初心者でも微分ハンドル車なら思ったように自動車を動かすことができる。どうしてそうなるのか。

もう一度姿勢角と横変位の式を思い出してみよう。

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{v}{l} \cdot \alpha \cdot t && \varphi (\text{姿勢角}) \quad v (\text{速度}) \\ & && y (\text{横変位}) \quad t (\text{時間}) \\ y &= \frac{v^2}{l} \alpha \cdot t^2 && l (\text{ホイールベース}) \\ & && \alpha (\text{前輪舵角}) \end{aligned}$$

この式に微分ハンドルによって一定角速度でハンドルをまわす場合を考えて普通ハンドルの場合の $\alpha = \theta/c_0$ の代わりに微分ハンドルの関係式 $\alpha = \theta/c_0 t$ を代入すると

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{v}{c_0 l} \theta \\ y &= \frac{v^2}{c_0 l} \cdot \theta t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。姿勢角の式のなかから t (時間) の要素が消え、横変位の式では t^2 が t になったことがわかる。これは普通ハンドルでは姿勢角はハンドル角に対して 1 階の積分性をもっており、また横変位については 2 階の積分性をもっていたものが、微分ハンドルでは、姿勢角ではハンドル角と比例関係の制御ですみ、横変位についても 1 階の積分性を制御すればよくなったということになる。

このようなコントロールすべきもののなかにある積分性（これを制御するためには人間が微分の作業をしなくてはならないもの）はコントロールする人間に大きな負担を要求するものといわれる。

微分ハンドルを使えば、その難しさが相当軽減されることになって、姿勢角についてはコントロールしやすい比例的な操作でまにあうものにかわっているというわけである。これは自動制御理論上からみてあきらかにコントロールの楽な安定に制御しやすいものといえることができる。

初めにものべたように、なんとか自動車の積分性をうち消すシステムをどこかに入れたいというのが微分ハンドルを考えた動機なのである。

初めにものべたように普通の自動車の運転では人間が微分操作をやつているといえるわけである。さきにもふれたがどういふものが微分操作となるかという点でもう少し自動車は右に寄らなければならないのだが、このくらいからもどしていけばもどし終った頃にちょうど求める姿勢角になるということで、先をみこした操作を人間がやる。これは人間が訓練によってはじめて習得できるもので、これが微分操作というものの一つの説明の仕方なのである。この微分操作を要求されることは人間の負担が大きくなり、じきに疲れてくるといわれている。これを機械におきかえてやれば、それだけ人間の負担が少なくなると考えられる。

理論では高速のときほど有効

特に高速時における制御性の問題、安定の問題などから考えると、普通ハンドルの場合(1)式にみるように姿勢角をきめる係数の中に v が入り、あるいは v^2 が入っているということは、速度を大きくすればするほどこの係数が大きくなっていくことを意味する。これはハンドルをちょっと動かしただけで自動車の向きがものすごく変わってしまうことなので、高速ではハンドル操作に細心の注意が必要ということになるのである。そこでできることならば速度を大きくした場合に c （ハンドル系のギヤ比）を小さくして高速でも $\frac{v}{c \cdot l}$ があまり大きくならないようにしてやればもっと高速で安定な自動車になることがわかるのである。

c_0 あるいは c_1 を v なり v^2 に逆比例して小さくする。このことはたとえば微分ハンドルの場合、20 km/h でハンドルを2秒間に30°まわすという操作によって得られる舵角の変化に対して、100 km/h で同じようにまわしたときにはその1/5しか舵がきれないようにするということである。普通のハンドルの場合には高速になるほどハンドルを手で動かす操作を小さくしている。すなわちギヤ比そのものは一定なので人間の方で扱い方を変えてハンドル操作を小さくしているというわけになる。

速度でギヤ比が変わる装置を使えば、高速でも低速でも同じようにハンドルを動かせばちよいとよい運転がいつでもできるというわけである。

低速では c_1 の値が大きくなるとハンドルをたくさんまわしてもなかなか姿勢角が変わらないということになるが、高速では c_1 が小さくなると急激に姿勢角が変わって危険な状態をよぶので、このように速度に逆比例させて c_1 値を変える装置が筆者のところの試験機にもとり入れられた。

いままで話を簡単にするために普通のハンドル（比例型のもの）と微分ハンドルだけを比較していたが、実際に応用する場合にはこの折衷型が良いと考えている。

折衷型の場合とは、舵角が比例項と微分項の和であらわされる場合で、式で示せば次のようになる。

$$\text{普通ハンドル } \alpha = \frac{\theta}{c_0}$$

$$\text{微分ハンドル } \alpha = \frac{1}{c_1} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$\begin{aligned} \text{折衷型ハンドル } \alpha &= \frac{1}{c_0} \cdot \theta + \frac{1}{c_1} \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ &= \frac{1}{c_0} \left(\theta + \frac{c_0}{c_1} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned}$$

θ = ハンドル角 α = 舵角 c_0, c_1 = 係数（ギヤ比）

ここで c_0/c_1 を微分時間とよぶことがある。これは時間の単位をもっており、この値の大小がハンドルの性質をきめる要素になる。微分時間を大きくするといままで述べた微分ハンドルの性質が強くなり、この微分時間が0であれば普通のハンドルということになる。

微分ハンドルの性格を加えたこの折衷型ハンドルを使うことによって初心者でもはやく上達できるし、高速の安定もよくなるものと考えている。

運転経験のまったくない初心者による実験

理くつでは以上のようになるが、実際にはどうか？ということになるわけであるが、自動車を運転した経験の全くないという工学部の学生二人を使って微分ハンドルが人間本来の特性に対してどのような効果をもっているかということをつかむための実験を試みた。

実験用の車は写真(1)に示すようにハンドルが二つあって、アクセルペダル、ブレーキペダル、クラッチペダル等運転に必要なものはすべて二つずつある。右側が試験用のハンドルで、車両後部に積んである写真(2)に示す電気装置のダイヤル K_1, K_2 の調節によって微分ハンドルの性質を与えることもできるし、また普通のハンドルの性質を与えることもできるようになっている。左側のハンドルは普通のハンドルであるが、これを手前にひき出すと作動しなくなり、専ら右側の試験用ハンドルだけが作動するようになる。逆に押し込むと試験用のハンドルは作動しなくなり、このハンドルによって普通

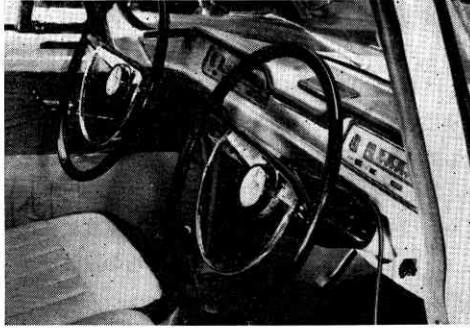


写真 (1)

に操縦ができるような仕かけになっている。そこで被験者をこの車の右側座席に乗せて、筆者が左側にのり、実験

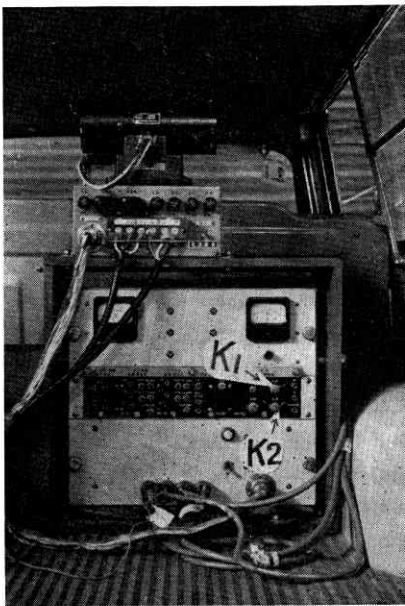


写真 (2)

データをとるときだけ、ハンドルを手前にひきあげて被験者にハンドル操作だけを行なわせて左に直角に折れている道を走って車の軌跡を記録するという方法をとった。図1にその結果を示したが、

時速6 軒という低速であるにもかかわらず二人の初心者はいずれも角を曲ってからハンドルのもどしがおくれ、進路は (a) 図に示すようにヨタヨタしてなかなかおさまらない結果となった。

これに反して微分ハンドルにした場合は (b) 図に示すように始めからスムーズに走っている。普通ハンドルの場合でも少し練習させたところ二人ともじきにスムーズに走れるようになったが、速度を時速 10 軒にあげたところまたヨタヨタになってしまった。微分ハンドルの場合はいきなり 15 軒くらいにしても練習せずにスムーズに走ることができた。

この実験の結果から微分ハンドルの車は人間本来の特性に適合しているものと考えてよさそうだ、と思っている。また普通ハンドルの場合、練習によってスムーズに走れるようになっても速度をあげるとまたヨタヨタすることから考えて、運転免許をもって十分熟達したドライバーでも平生使わないような高速を出したときはヨ

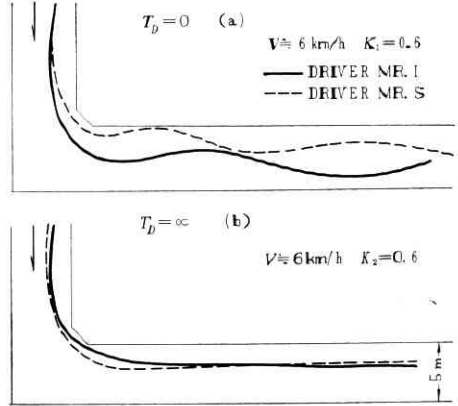


図 1

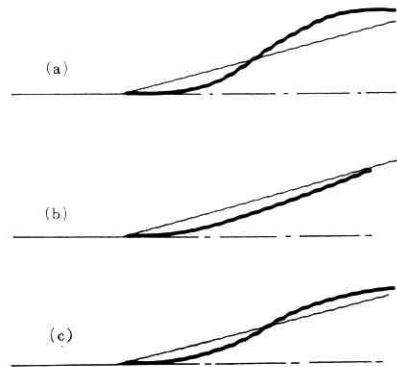


図 2

タヨタがでることが伺えるものと思う。

熟練ドライバーによる進路変更試験

そこで図2に示すようなコースを使用して自動車を平生運転しているドライバーについて微分ハンドルがどのような効果を有するかということを実験してみた。図の (a) は普通ハンドルにしたときの自動車の軌跡で進路を変えた後にかんがりのヨタヨタがでている。(b) は微分ハンドルの場合で、ほとんどヨタつかずに方向を変えた後も軌跡はスムーズである。(c) は折衷型でまず良好といえる結果となっている。

む す び

人間が運転している自動車の特性を解析して検討すると、微分ハンドルを採用することによって運転が楽になり、高速における安定性もよくなることが予想されるので、このような特性をもった操舵系をもつ自動車を試作しているいろいろ実験をしたところ、その予想がほぼ立証されたので次の段階として実用になるような機構の微分ハンドル系を試作して実験を始めるように準備中である。

実験用の微分ハンドル系の電気式のは安川電機KKに、電気油圧式のものとは実験車は東洋工業KK、また実用のためのプロトタイプは三菱重工KKのご協力を得たことを記して謝意を表する次第である。

(1967 年 8 月 29 日受理)