

自動操縦の問題点

Some Problems on Automatic Automobile Steering

菊池 英 一*

Ei-ichi KIKUCHI

自動操縦の実験の基礎になる人・自動車系の舵取り運動の理論面的問題と将来研究を進めるべき部門について述べる。

1. まえがき

機械試験所の自動車の自動操縦の実験は、茨城県筑波郡谷田部町の自動車高速試験場の周囲 5.5 キロの走路に埋設された誘導ケーブルに沿って、舵取りは誘導ケーブルによって自動的に行なわせ、走行速度は無線によるテレコントロールで遠隔的に変え、データはテレメータで送って試験場内の管制塔の 3 階に置いた記録器に収めるという方式で直線コース、曲線コースも含めてテストコースの全周を時速 100 キロで無人操縦で走行しうる段階に到達している。

一方、追突防止装置は、個々の自動車に高価な設備を強要しない方針で、地面側に設備を負担する考え方をとり、機械試験所の東村山分室のテストコースの直線路の 350 メートル区間に埋めたインダクタンスループ 54 個と同数のパラメトロンユニットを組合わせて、前車がループ上に止まっていれば、後続車が有人なら路傍の警告灯を点灯して前車に接近していることを運転者に教え、後続車が自動操縦車であれば自動的にブレーキを作動させて減速させ、前車が動き始めれば後続の自動操縦車も自動的に動き出す方式のものが開発された。

ただ現在の追突防止方式の弱点は岩石、生物などの非金属物体の検出ができないことである。インダクタンスループによりテストコース上の車両位置の遠隔表示も可能になった。インダクタンスループとパラメトロンの組合わせは、すでに都内外の各所で変形された形で感應式の交通信号機の制御に実用されている。現在、追突防止装置に関してはハイウェーで実用するとき問題となる機器の経年変化と気象が装置の安定性に及ぼす影響を長期観測で確認しようとしている。

2. 自動操縦の用途

自動操縦の用途は現在四つ考えられる。誘導ケーブルの敷設を前提とすれば、

(1) オートメ道路：自動操縦される自動車は必ずしも無人とは限らない。有人であって人の操縦操作の労苦を軽減する目的のものである。自動操縦は交通管制システムの一環として考えれば、速度制御には追突防止のほか

に自動車側の anti-skid、道路側の路面状態の自動検知・警報まで考えなければ本格的といえないであろう。大規模な電子計算機と組合わせてオートメ道路上の各自動車の行く先に応じて誘導ケーブルの分岐点を制御することも可能であろうが、何といたっても本当に自動操縦の実用化を考えるならば大がかりな開発研究が必要であろう。

(2) 工場内運搬車、万国博用無人操縦車など：低速なので、それほどむずかしい問題はなさそうである。

(3) 安全工学などのための実験手段として：たとえば転覆、衝突、急ブレーキ、急ハンドル、事故再現などの危険が予想される実験を無人で行なうために、無線によるテレメータ、テレコントロールを必要とするもの。

(4) 人・自動車系の運動の研究：自動操縦機構はロボットの一つであって、未知の制御要素としての人の操縦機能のシミュレータであるといえる。自動車の安全の問題の根本は、運転者としての人の機能をきわめることであるので、将来は自動車の操縦操作の自動化を基盤にしてロボットの研究にも発展しうる学問的に最も興味のある分野である。

現在の自動操縦の方式とは異なった、誘導ケーブルに頼らないで車上のロボットが自ら情報処理をして、最適のコースを探索し、障害物を発見し避けるという意味の自動操縦がそろそろ計画されてもよくないだろうか。

3. 自動車系の問題点

自動車の自動操縦の実現には本来は人・自動車系の研究が基礎になるべきものである。現実には人の機能の研究と、人・自動車系の研究が遅れている上に、自動操縦の研究の遂行上、(1)制御対象としての自動車の真の運動特性は走行中でないと測定できない、(2)自動車とはいっても人または人の代用としての自動操縦装置が組合わさらないと自動車というアクティブな系にならないという矛盾がある。

現状では自動操縦機構を使って逆に人が自動車を操縦するときの機能をシミュレートする結果になっている。さらに自動車の操縦性の概念そのものの内容がはなはだ不明確であるが、人・自動車系のコース追従運動の安定性をどうして確保するかという問題を考えて行く過程で、自然と解明されそうな気がする。冒頭に述べたよう

* 工業技術院機械試験所

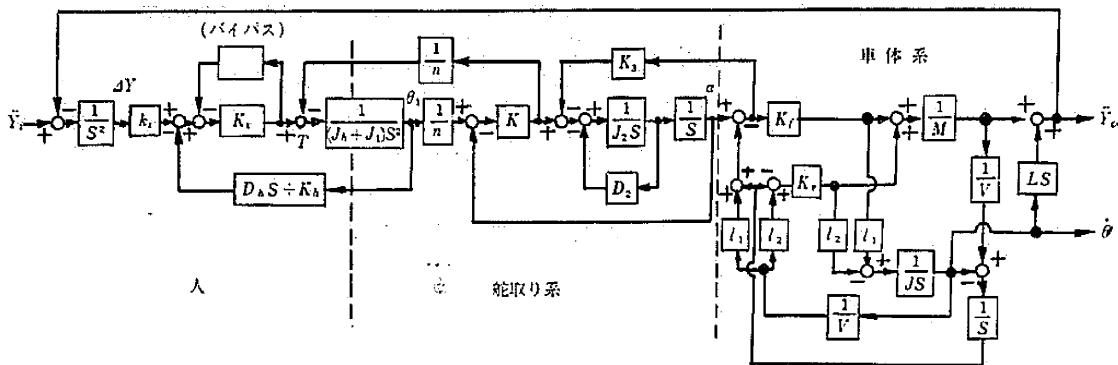


図 1 人・自動車系のコース追従運動のブロック線図

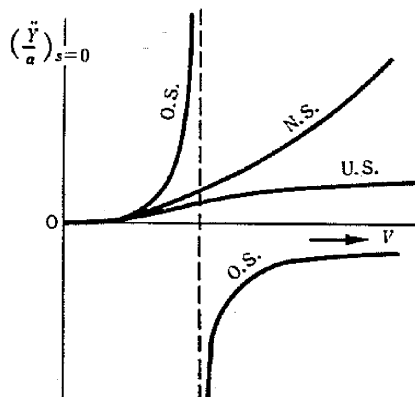
に自動操縦の実験そのものはかなりのところまで進んでいるが、自動車の自動操縦、特に舵取り運動の自動制御に関する理論的根拠がないために、実験と並行して理論的解析に努力が注がれ、考え方の体系作りも試みられた。

舵取り系は運転者と自動車とをつなぐマニピュレータであって、ハンドル角の縮小、ハンドルトルクの拡大という表向きの役目の他に図 1 のブロック線図からわかるように、構造的に負フィードバック径路が構成されている。パイラテラリティとは舵取り系の場合、人が加えるトルクから自動車の実舵角まで、逆に自動車側のセルフライニングトルクからハンドル角までループをたどって行くことができることであり、右からたどっても左からたどっても、入力トルクまたは力が負荷に伝達されて位置が変わることだといえよう。人と自動車をうまくインターフェイスさせて、人・自動車系の運動特性を走行速度 V に無関係に一定な特性に変えることにある。特性を一定化するために負フィードバックを利用するのは衆知の事からである。しかし、この負フィードバック径路があるために系が非常に複雑な結合になるので解析上はきわめて厄介であるが、これを無視して人・自動車系を人・舵取り系・車体系の直列接続と考えると真の運動はわからなくなる。フィードバック径路があれば説明のつく不安定現象が説明できなくなったり、起こりもしないゲイン増大の幻影に悩まされたりする。

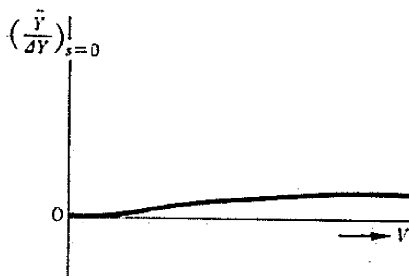
実舵角入力と自動車の横加速度との比を「舵の利き」のゲインと定義すると図 2 に示すように V に対して変化する。自動車の重心が積載または乗車のために位置が変わると、自動車の運動の性質はオーバースティアからニュートラルスティアを通りアンダースティアまで幅広く変化することはよく知られている。コースと自動車の相対変位、コースずれに比例して舵を取る方式（比例定数一定として）の場合のコース追従では、高速ではゲインが大きくなって発振が避けられない場合があるのは明白であろう。安定を保つには全体のゲインを一定に保つために、人または自動操縦機構の側で車体系のゲインの

変化する分だけ、つまり車体系のゲインの逆数に比例させてゲイン調整をしなければならないことになる。もしも本当に自動車の操縦がこのようなゲイン調整を必要とするものであるならば、乗り物として、はなはだ扱いにくく、危険であるといえる。実際は自動車には必ず舵取り系がついていて、実舵角が直接、車体系への入力信号となることは試験としてしかありえないので、きわめて幸いなことである。

舵取り系がつくと図 1 に示したように負フィードバック径路ができ上がる。さらに人が自動車を操縦する場合には、人の腕の筋肉運動知覚系を通して脳に達する負フィードバック径路ができる。この径路は舵取り制御上、無視することができないものである。これらの負フィー



(a) 実舵角入力するとき



(b) コースずれ入力するとき

図 2 「舵の利き」のゲイン

ドバック径路がわかった人・自動車系のコース追従運動の一巡伝達関数のゲイン、これもやはり「舵の利き」のゲインと呼んでよいが、低速では V^2 に比例して変化するが高速では飽和して一定値になる性質をもつ。静的なゲインが高速で一定化するばかりでなく、動特性も実舵角入力の場合と違ってきて走行速度にかかわらず一定化する傾向を持つ。

コース追従の閉回路の運動では従来は自動車の舵取り運動の出力信号は横変位であると考えていたが、むしろ横加速度とする方が座標軸との関連で矛盾が少ない。一体座標系を選ぶのは、運動の取扱いを最も簡単にし、現象を無理なく説明できるようにするためである。人ないし自動操縦機構が舵取りのための偏差信号として検出できる量は横変位であり、横変位は横加速度を二度積分したものである。この重積分があるから人・自動車系のコース追従の閉回路の伝達関数が 2 型になる。

自動車を操縦する人が舵取りのために検出できる量はコースと自動車の相対変位だけである。運転者は地球に固定された座標系からの自動車の変位を検出しているわけではない。この点が飛行機、船といちじるしく異なる点である。自動車の出力信号を横加速度としたから、コースの方も加速度で与えなければならない。コースの曲率半径 R と自動車の走行速度 V がわかれば V^2/R で設定できる。自動車の舵取りのための設定横加速度は運転者自らが走行速度の変更によって変えられることがおもしろい。

今までの自動車の出力信号を横変位とする考え方は設定加速度=0 として直線からの変位を考えていることになる。設定コースの各点の曲率半径は地球固定座標に関して定義できる。コースに接して自動車の走行速度と同一の速度で動く直角座標系を考えれば、コースの法線軸方向に作用する加速度がコースの設定横加速度になる。

従来の自動車の運動に関する研究では主として自動車の重心の運動軌跡を論じていたので、地球固定座標と自動車に固定された座標の間で論じられた。コース追従運動の場合には、地球固定座標を中介してコースに接しながらすべる座標と自動車固定座標の相対運動を論ずることになるので三つの座標系が現われる。コース追従運動で使用する座標系を明確に考えないことから、人・自動車系の入力信号、出力信号、誤差信号、人に検出できる信号の形態、二重積分が伝達関数に入りこむ理由がはっきりしなかったといえる。

4. 自動操縦の実験

自動車の運動が走行速度の関数であるという事実の認識不足、人・自動車系の基礎研究の貧弱であったこと、特に人が自動車を操縦するときの機能がはっきりしないから、数学モデルが確立せず、自動操縦の走行実験では

コース追従の安定性を確保するための一巡ゲインの調整に苦心した。米国の研究によるとコントローラのゲインは $1/V^2$ で減らすべきだということになっていた。結局、後からわかったことであるが、従来の研究では人と自動車の結びつき方がよい加減であったために、人・自動車系全体としてどのような運動特性をもつものか誰も確信をもっていなかったようである。

制御的に見るならば、コース追従運動を安定に保つために、人が適応制御をする必要がなく、あらゆる走行速度で一巡ゲインも一定、動特性も一定であつたら理想的であろう。これらの要求は舵取り系がマニピュレータとしてパイラテリティの条件を満たし、人の中の負フィードバック径路があればほぼ成り立つ。図 1 は実にこの条件を満たしているのである。

舵取り制御系も走行速度制御系も制御機器の組合せはきわめて常識的であつて、特に走行速度の制御はトルクコンバータつきの自動車を使用したのが容易であつた。マイナループのアクセル系では気化器の絞り弁の角度を制御し、ブレーキ系ではブレーキ圧力の制御をするように注意すればよい。変速歯車つきの自動車では変速レバ、アクセルペダル、ブレーキペダル、クラッチペダルを動かす手足の協調制御が問題になる。実験の場合でも人力操縦と自動操縦の切換えが可能になるように考慮しなければならない。

5. 制御成績の問題点

東村山分室のテストコースの周回路の自動走行実験では誘導ケーブルを埋めた周回路のコンクリート路盤の中央の縦目地が折線に近いために、カーブでは折線のつき目毎に自動車が過渡現象を起こしてハンドルが激しく振動し、横加速度の変動がひどくて乗心地が悪く、横変位が大きく変動するのでコースから飛出すのではないかと気になる。人が操縦するのを記録してみると周回路の直線部分で幅 20 センチ位の蛇行をするが、ハンドル角の変動はきわめて小さく、人と自動操縦の制御モードが違ふように思われる。

現在の負フィードバックの制御原理ではコースの細かいノイズにまでばか正直に応答しすぎるという欠点がある。カーブでコースずれを少なくするためにコースずれの検出ゲイン k_1 を高めるとコースずれは減るが、速度を高めると直線コースで蛇行動を起こす。 k_1 を下げると直線コースでは安定でもカーブでコースずれが大きくなる。いろいろと一巡ゲインの調整に苦心したあげくに考え出されたのはコースずれの検出ゲイン k_1 は一定として、サーボ弁とアクチュエータのパイプの間にバイパスとしてニードル弁を入れてその開度を変えてサーボ系のトルクゲイン K_v を幾分下げることであつた。

このようにして東村山分室でのカーブ通過のときの乗

心地を改善し、谷田郡の自動車高速試験場のテストコースの全周を時速 100 キロで安定に無人で高速走行する問題が解決された。後から体系化した理論で検討すると、人・自動車系あるいは自動操縦車において「舵の利き」ゲインを高速で飽和させて運動特性をアンダースティエ化して一定値にするためにはトルクゲイン K_r を小さくする方が良いことが裏付けられる。人の腕の神経系による負フィードバック経路は等価的にばねとみなしうるが、このばね係数が無限大になることはハンドル固定に相当し、ばね係数が 0 であることはハンドル自由の運動に相当するので人の操縦でも自動操縦でもばね係数は 0 と無限大の中間の有限値である。したがって自動車の舵取りに使うサーボ弁はトルクゲインの大きい流量制御弁ではいけないことになる。

人が操縦してコースを追従する場合には、同時に速度制御のための監視もしなければならないので、人の眼の果す役割が多く眼を舵取りのための横変位の検出に専用できない。したがってコースずれの検出はサンプリング的ないし時分割的な検出になる。連続的にコースずれが見えているとしても精々周辺視で見えていることになるので、検出精度が悪くて自動車がコースからある程度ずれるまで人は気がつかない。こうして検出に閾値ができて、人はコースずれが一定値になるまで舵を切らないから、舵の操作は間歇的になり動きが少なくなる。その代わり蛇行というコースずれの精度の犠牲において制御エネルギーの節約を計っているといえる。

人が乗り物を操縦するときには必ず前方を見ている。自動車の場合には速度制御のために障害物の出現を監視し、コース追従のためにコースと自動車の相対変位も検出するが、検出は点でなくて面である。コースの一点ではなくてコースの有限の長さの部分の曲率がパターンとして認識される。たとえばレーンマークの引き方が悪くてノイズとしてデコボコが含まれていても、人は平均としての曲率を検出するのでここで入力ノイズがフィルタされる。

さらに前方を見てコースをパターンとして認識することは、特定の地点に到達して自動車がある特定の運動をしなればならぬことを人に予期させる。記憶装置があってそのための動作プログラムが予め貯えられていれば、そのプログラムを早目にスタートすることが位相進みと同一の効果を発揮することになる。前方に障害物がある場合、横加速度が過大にならないように最適のコースと走行速度を選択することも記憶の中にそれに関する知識・経験が貯えられていて始めて可能である。現在の自動操縦機構はアナログ的であり記憶装置をもたないので、精々負フィードバックによる比較の機能しかない。

6. これからの問題

今まで人・自動車系と呼んでいたのは舵取りの場に限ってのことであったが、実際は舵取り制御系と走行速度制御系の二つの系の信号が人を中介にして交錯しているわけである。人の動作には一般性、融通性が要求されるから関節を含めて操作部としての筋肉の神経支配が複雑になっているのであって、自動車の操縦のように目的とする動作が限られていれば人と同様の関節や筋肉の構成を考える必要はなくなる。

誘導ケーブルに拘束される自動操縦は高速でバンク角のついたカーブの斜面を通過するとき、速度に適したバンク角を選べないという不便さがある。将来は誘導ケーブルのない自動操縦が夢として考えられる。その場合の自動車のコントローラは先にも述べたようにロボットとして、もっと人に似た情報処理機能を備えたものでなければならない。記憶と組合わさった適応機能の研究も大切であり、現在の文字読み取りのパターン認識よりももっとむずかしい 3 次元、4 次元のパターン認識を解決する必要がある。自動車はロボットの研究のためのかっこの試験台であるといえる。

日常見なれた自動車の操縦というわれわれが無意識にやっていることが、学問的に意外とおもしろい問題を含んでいる。

(1967 年 11 月 22 日受理)

