

# 人の運動制御式の提案

## Human Motion Control Model

正 黒沢 隆一 (iotec)

Ryuichi Kurosawa

Key Words: *human motion, model, Weber's Law, inverse model,*

The modeling of human/machine interaction involves both the dynamics of human response to achieve task demand and the machine compensation dynamics acquired in advance by hard practice in the machine control. This paper presents the human motion model  $x'' = a - Cx'$  to achieve task demands derived from Weber's Law of stimulus/response and the human motion control model consisting of the human motion model  $x'' = a - Cx'$  and the inverse model of the target machine and it can apply broadly ranging from control of cars, aircrafts, ships and spaceships. As a control example, the model controls an instability vehicle maintaining desired high cornering acceleration under large slip angle run in a fully nonlinear vehicle computer simulation of CarSim with MATLAB/Simulink.

### 1 人の運動制御

#### 1-1 運動は感覚に導かれて上達する

自分ではからっきしダメでも、その道のプロの振る舞いに接したら、一瞬のうちにそれと感じ取る叡智を、私たちは授かっている。一芸に秀でた人が神業と言われるほどの域まで行けるのは、この叡智を使う仕組みが私たちに組み込まれているから。

この仕組みのキーになっているのが感覚。誰でもバラの花は美しい。音楽の才能があるとも思えないのに、巨匠モーツアルト、ベートーベンの音楽が心に響き、アイススケートの荒川静香や高橋大輔選手の滑りに心をうたれる。ゴルフをしない人でも、プロのスイングは分かる。教わっていないのに分かるのは、何億年もかけて大自然の摂理に沿って磨き上げてきた匠の物差し、美の原器を携えて生まれてくるから。

大人のまねをする赤ちゃんは苦勞の末、自ら2本足で立って、そしてよちよち歩いて、やがては走れるようになる。身体のコントロールが可能になると、新たな環境に挑戦し、自動車、飛行機、船など何にでも対応しコントロールしてしまう。

やってみた結果を感覚でチェックして、体内プログラムを修正する。プラン・ドゥー・チェックと言われるが、要のチェック機能が生まれながらに備わる。だから、最初は出鱈目でも繰り返すうちに何とかなる。誰でも、自転車に乗れ、また車にも乗れるようになる。

#### 1-2 結果を先読みした見込み運動

コップ一杯の水を飲むにも、先ず重さ、そして重さに見合った力で掴んで潰れないか、変形しないか等コップの剛性、指をかけたとき滑りやすいか、ぬるぬるしているか等の表面性状など、力加減に必要な全ての条件が、コップを

掴む前、持ち上げる前に身をもって分かっていると、すなわち、予め見込まないと持ち上げようにも、指から腕から、力の入れようがない。

昔、子供の道路への飛び出しを注意して、「車は急には止まれない」と言われていた。速度や位置のコントロールでは積分時間が必要で、これらの量のリアルタイムのコントロールは物理的に不可能。

環境に合わせて速度をコントロールする車の運転では、積分時間に相当する秒単位の時間を遡った、先回りの見込み操作が必須となる。運転に慣れてくると、見込みで必要な処置を事前に済ませているので、平気で脇見が出来る。逆に脇見ができないような運転の方が怖い。脇見運転は我々の行動が先読みの見込みで成り立っている証拠である。

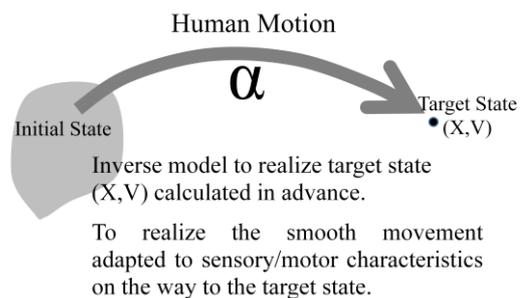


Fig. 1 Conditions of the Human Motion  $\alpha$

見込み行動の一番典型的な例は、今年サッカー女子 WC で優勝したなでしこの PK 戦。蹴られてからでは間に合わない状態に置かれたゴールキーパーは、ボールが蹴られる前に、勝手に結果を見込んで行動を起こす。見込み無しには動けない、無理にでも見込む、これが私たちの運動制御。

結果を先に決めて時間を遡って開始される見込み運動は、

その結果用に既に身につけているパターンで対応する、だから間違いのない滑らかな身のこなしで正確に実現できる。この見込み運動を Human Motion として  $\alpha$  で表す (図1)。

### 1-3 制御対象を取り込んで行う人の運動制御

練習によってコントロール方法を身につけた制御対象に限って安定して巧みにコントロールできる。

前方のカーブを曲がるのに、どうハンドルを切ったらよいかを事前の色々なカーブでの経験を通して身につけていないと、ハンドルは切れない。普通はハンドル操作が先にあつて運動が起こるのだが、逆に運動が先でそのための操作を決めるのが逆モデル、だから制御対象の逆モデルを身につけていないとハンドルは切れない。

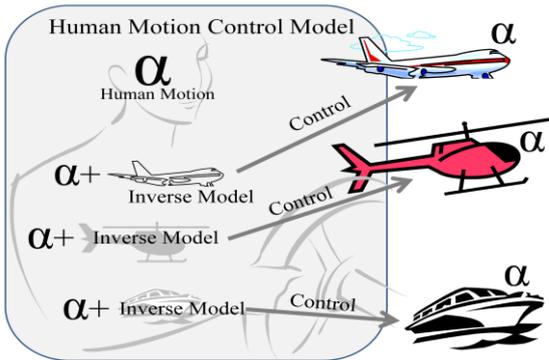


Fig.2 Human motion control model is consists of the human motion  $\alpha$  and an inverse model of the control target. Human motion  $\alpha$  go through the inverse model to the control target then dynamics of the control target is compensated and motion  $\alpha$  is achieved by the control target.

すなわち人の運動制御モデルは、結果を見込んだ運動 Human Motion  $\alpha$  と、この運動  $\alpha$  を制御対象で実現するための操作量を算出する制御対象の逆モデルとから成り立っている (図2)。

人の運動制御モデル = 結果を見込んだ運動  $\alpha$  + 制御対象逆モデル

今回この  $\alpha$  の部分を定式化する。

## 2 感覚が作る運動 $\alpha$ の式

トライする度に運動をチェックし洗練させていくのは感覚、この感覚が運動を作り上げている。

生き物にとって、えさを取ったり敵から逃げたり運動能力は生命維持に最も重要で、運動に関わる実物理世界とこれを感じ取る、視覚、聴覚、運動感覚等の感覚の世界とは完全に一致していなければ生き抜けない。

この大自然が鍛えた感覚の世界には、物理量の世界とつながる基本的な法則がある、19世紀の生理学者 Ernst

Heinrich Weber(1795-1878)が物理量の式で提供してくれている (図3)。

Weber の法則 :

物理量  $S$  の刺激を受けているときに、この物理量を  $S + \Delta S$  に増加したとき、増加したことを知覚できる最小の増加物理量を  $\Delta S$  とすると、

$$\frac{\Delta S}{S} = C \quad \text{一定が成り立つ。} \quad (5)$$

**Weber's Law**

Ernst Heinrich Weber (1795-1878)

$$\frac{\Delta S}{S} = C$$

$S$  : Physical Stimulus  
 $\Delta S$  : Just Noticeable Difference

$$S \rightarrow m x''$$

$$x'' = a - C x'$$

Human Motion

Fig.3 Derive a Human Motion Equation from the Weber's Law

感覚のこの仕掛けにより、現在受けている刺激の大きさを基準にして、現在値からの一定割合の増減を知覚するので、小さい刺激から大きな刺激まで実用的に受け入れる。家計簿から国家予算まで、顕微鏡から天体望遠鏡まで、さらには欲望に限りが無いなどがこれに当たる。

一定割合  $C$  を Weber 比と言ひ、力の場合には 0.05 (現在値からの 5% の変化を感じる) 位の値をとる。

Weber の法則の物理刺激量  $S$  として、運動中の身体が受ける力  $m x''$  を考える。

$\Delta t$  を力の変化  $\Delta S$  を感じる短い時間とすれば

$$\Delta S = \frac{dS}{dt} \Delta t = m x'' \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta S = m x'' \Delta t \quad (7)$$

これを Weber の式 (5) に代入すると、身体が受ける力  $m x''$  の感覚が作り出す微分方程式

$$\frac{m x'' \Delta t}{m x''} = C \quad (8)$$

が得られ、分母を払って積分して 2 次の微分方程式

$$x'' = a - \frac{C}{\Delta t} x' \quad a, C \text{ は定数} \quad (9)$$

を得る

$C/\Delta t \rightarrow C$  と書き換えれば、Weber の法則を満たす、すなわち我々の感覚に沿った運動を行う方程式

$$x'' = a - C x' \quad (10)$$

を得る。

$$x'' = a - \frac{a}{V_T} \left( \frac{L}{X_T - x + L} \right)^P x' \quad (11)$$

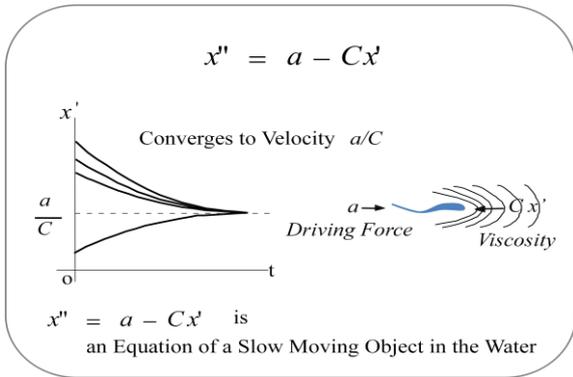


Fig.4 Human Motion  $x'' = a - Cx'$  realize terminal velocity  $a/C$

任意の初期条件を与えたときの運動方程式 (10) の挙動は図4で示される。加速度  $a$  で粘性  $C$  を受けながら進むと、初速度に関わらず最終的に速度  $a/C$  に落ち着く。これは、この方程式が、予め見込んだ運動状態 (速度= $a/c$ ) を実現する運動逆モデルであることを示している。

### 3 得られた $x'' = a - Cx'$ の動作を確認

感覚を支配する Weber の法則から導かれ、しかも人の運動の特徴である見込み運動を行う  $x'' = a - Cx'$  が、人のように交通環境を走り抜け、また、車の逆モデルと組み合わせて、巧みにステアリング操作するかを確認する。

#### Equations and Parameters of three Cars

$$x_1'' - a_1 + a_1 \frac{x_1' + \varepsilon}{SW + \varepsilon} \left( \frac{1}{X_{sig} - x_1} \right)^{\frac{3}{2}} + a_1 \frac{x_1' + \varepsilon}{x_0' + \varepsilon} \left( \frac{T_1 x_1' + L_1}{x_0 - x_1} \right)^2 + a_1 \frac{x_1'}{V_{60}} \left( 1 - \frac{T_1 x_1' + L_1}{x_0 - x_1} \right) = 0$$

$$x_2'' - a_2 + a_2 \frac{x_2' + \varepsilon}{SW + \varepsilon} \left( \frac{1}{X_{sig} - x_2} \right)^{\frac{3}{2}} + a_2 \frac{x_2' + \varepsilon}{x_1' + \varepsilon} \left( \frac{T_2 x_2' + L_2}{x_1 - x_2} \right)^2 + a_2 \frac{x_2'}{V_{60}} \left( 1 - \frac{T_2 x_2' + L_2}{x_1 - x_2} \right) = 0$$

$$x_3'' - a_3 + a_3 \frac{x_3' + \varepsilon}{SW + \varepsilon} \left( \frac{1}{X_{sig} - x_3} \right)^{\frac{3}{2}} + a_3 \frac{x_3' + \varepsilon}{x_2' + \varepsilon} \left( \frac{T_3 x_3' + L_3}{x_2 - x_3} \right)^2 + a_3 \frac{x_3'}{V_{60}} \left( 1 - \frac{T_3 x_3' + L_3}{x_2 - x_3} \right) = 0$$

$a_1=4.5; a_2=3.5; a_3=2.5; T_1=2.5; T_2=1.0; T_3=2.0; L_2=7.0; L_3=8.0;$   
 $\varepsilon=0.05; SW=0 (t < 40) SW=10000. (t > 40);$   
 $X_{sig}=1000.; x_{10}=900.; x_{20}=700.; x_{30}=600.; v_{10}=20.; v_{20}=20.; v_{30}=30.;$

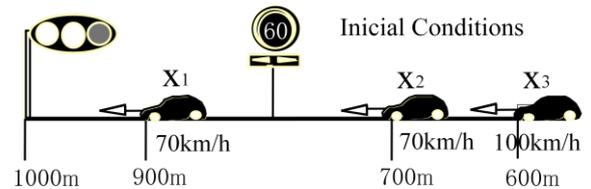


Fig. 5 Human Motion

この方程式は、パラメータ  $C$  によって環境で実現すべき運動状態を決め、これを、式の形で決まる感覚に沿った滑らかな運動で実現する (図5)。

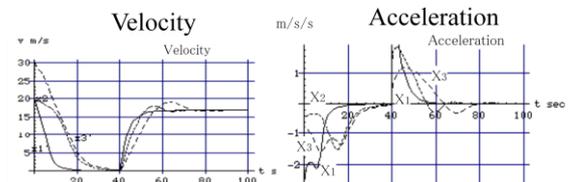


Fig. 7 Simulation of the Human Motion  $x'' = a - Cx'$  driving through traffic environments maintaining a posted speed limit, desired following distance from a lead vehicle and traffic signal.

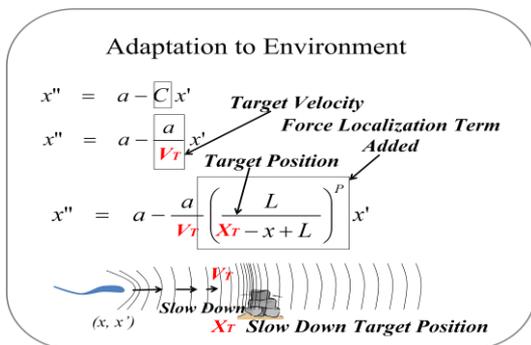


Fig. 6 Realize the target state (XT,VT)

図6で示すように、粘性  $C$  を位置  $X_T$  の付近で局所的に

強くする項、例えば  $\left( \frac{L}{X_T - x + L} \right)^P$  を追加すれば、環境

位置  $X_T$  で速度  $V_T$  を実現する運動方程式の一例として、見込み運動制御式 (11) を得る。

#### 3-1 $x'' = a - Cx'$ は交通環境を走り抜く

交通環境毎の粘性を、信号  $C_s$ 、追従  $C_f$ 、速度制限  $C_v$  とし、この三つの交通環境に対応する車両運動モデルを  $x'' = a - (C_s + C_f + C_v) x'$  と表す。

交通環境  $C_s, C_f, C_v$  の具体的な  $(X_T, V_T)$  の表現例を以下に示す。  $X_T, V_T$  は4角で囲み、 $i=1,2,3$  で車両を表し、 $i-1$  は前を走る車両を表す。

信号環境  $C_s$  : 
$$a_i \frac{1}{SW + \varepsilon} \left( \frac{1}{X_{signal} - x_i} \right)^{\frac{3}{2}}$$

追従環境 Cf: 
$$a_i \frac{1}{x'_{i-1} + \varepsilon} \left( \frac{T_i x_i' + L_i}{x_{i-1} - x_i} \right)^2$$

制限速度環境 Cv: 
$$a_i \frac{1}{V_{60}} \left( 1 - \frac{T_i x_i' + L_i}{x_{i-1} - x_i} \right)$$

(信号赤で SW=0、各定数の値は図7を参照)

3 台の車両運動モデルが追従および制限速度を守りながら交差点での停止および発進を行う走行シミュレーションの具体的なモデル式と初期値を含めたパラメータおよび走行中の加速度と速度の時間変化を図7に示す。

交差点での停止、発進時の各車の加減速度波形、速度波形を見れば、交通環境を人のように滑らかに走り抜けていることが分かる。例えば X3 の発進は前の X2 との車間の関係で速度が上げられず、X2 に引き離されるが最終的に X2 に追いつくため一時的に制限速度を超えて追従していく様子が分かる。加減速度波形では滑らかに停止していること、発進時には上で述べた追従の関係で x1、x2、x3 の順に加速度が高くなっている。計算は図7の式のまま微分方程式が解ける数式処理ソフト Mathematica で行った。

### 3-2 x'' = a - Cx' による制御対象を取り込んだ制御

x'' = a - Cx' が車のステアリングを操作して人のように車の運転が出来るかどうかを確認する。

#### 3-2-1 制御対象逆モデルの作成

今回は車両を制御するので、車に横加速度 α を発生させるタイヤ操舵角 δ を算出する車両逆モデルを作成する。

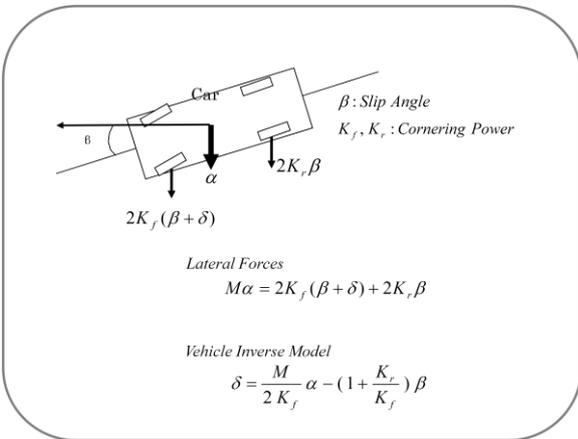


Fig. 8 Vehicle Dynamics: Vehicle Inverse Model

図8に模式的に車の運動状態を示す。前輪の舵角 δ で車体が角度 β で横滑りしながら左方向に進行している。

タイヤの発生する力はタイヤの横滑り角に比例し、比例定数は前後タイヤのコーナリングパワ Kf、Kr。このとき後輪タイヤの横滑り角は β、前輪タイヤの横滑り角は転舵角 δ を加えて β + δ。発生する力はフロントの2本のタイヤで 2Kf (β + δ)、リヤで 2Kr β となる。

この二つの力が車両 (質量 M) に横向き加速度 α を生じ

させる。

$$M\alpha = 2K_f(\beta + \delta) + 2K_r\beta \quad (12)$$

これを変形して、操作量 δ を求める車両逆モデルは

$$\delta = \frac{M}{2K_f} \alpha - \left( 1 + \frac{K_r}{K_f} \right) \beta \quad (13)$$

この線形逆モデルに対して横滑り角 β およびコーナリングパワ Kf、Kr を以下のように走行中の実測値を与えて非線形化する。

α : 運動方程式 (10) で与えられる x'。

β : シミュレーション中の実横滑り角を使用する

Kf、Kr : 走行中の左右タイヤ荷重移動量で修正した値

### 3-2-2 ステア制御シミュレーション

コンピュータ上で動く車両として、世界の自動車メーカー等で広く使用実績のある CarSim (米国 Mechanical Simulation 社 UMTRI の研究成果を実用化) を使用する。

CarSim からの運動状態の実測値を MATLAB/Simulink 上で処理し、ステアリング操舵量を計算し、これを車両 CarSim に与えてシミュレーション計算を実施。図9にカーブに進出し旋回する場合のブロック図等を示す。

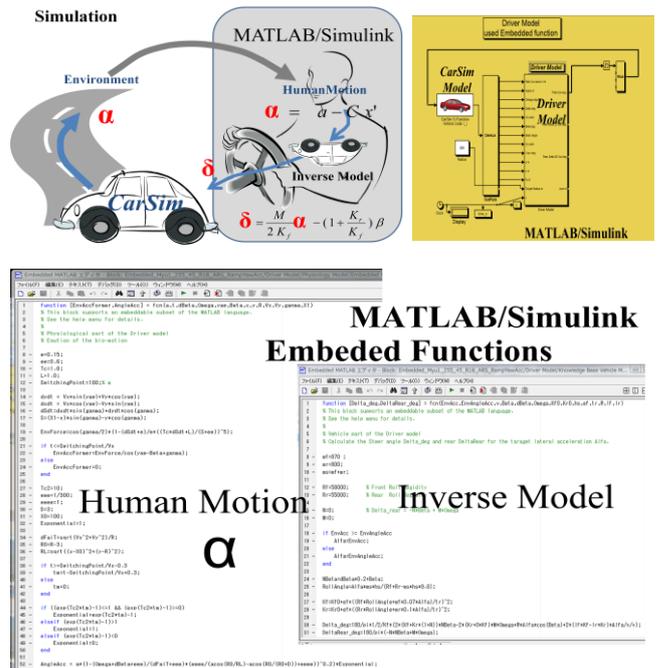


Fig.9 MATLAB/Simulink Human Motion Control Model drives the CarSim vehicle.

#### 3-2-2-1 制御例: レーンチェンジとコーナリング

レーンチェンジは、車に横方向の力を加える制御で x を横変位とし、運動は x'' = a - Cx'、(X=3.5m、V=0) が見込む運動状態 x' を車両逆モデルに与え、得られた操舵角 δ で CarSim を操舵。

コーナリングは平面運動で面倒。最初に進入時の斜め前方から力の加わる進路変更運動、進路変更後に求心力が

加わる曲率半径に沿った円旋回運動に移る二つの運動の組み合わせで行う。

計算は、カーブの入り口付近に進路変更の方向に伸びる直線を引き、車両のこの直線との距離を  $s$  とすれば運動は  $s'' = a - Cs'$ 、( $S=0, S'=0$ ) が見込む運動状態となり、車両に加わる加速度が  $s''$  でこれを車両逆モデルに与えて得られた操舵角  $\delta$  で CarSim を操舵。次に円旋回運動に移り、運動は  $\phi'' = a - C\phi'$ 、見込む運動状態  $\phi' = v/r$ 、車両に加わる加速度は  $\alpha = v\phi'$  となり、この  $\alpha$  を車両逆モデルに与え、得られた操舵角  $\delta$  で CarSim を操舵、 $\phi'$  は旋回角速度、 $v$  は車速、 $r$  は旋回半径。シミュレーション結果を以下に示す。

1  $x'' = a - Cx'$  によるレーンチェンジ

図 10 に、0.3G レーンチェンジの横加速度波形他で、滑らかにして正確なレーン移動を示す。写真は、始めに車の向きが変化する、高速での急激な 0.8G レーンチェンジ。

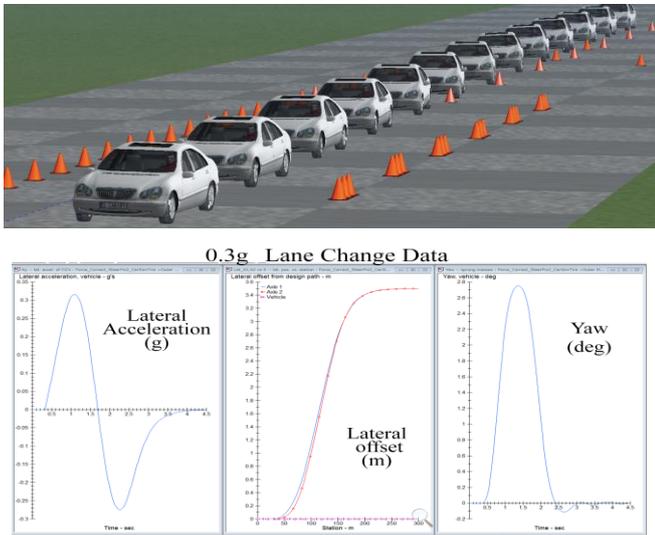


Fig.10 Human Motion  $x'' = a - Cx'$  achieves lane change with smooth acceleration during the control and precise 3.5m lateral offset from the original lane. Upper photo shows 0.8G severe lane change by  $x'' = a - Cx'$ .

2  $x'' = a - Cx'$  による高速コーナリング中のバンプ越え

図 11 では、横っ飛びの空中ジャンプに、大きな横滑り、プロのドライバーでも困難な高速コーナリング中のバンプ超えの過酷な運転環境を確実にこなす。

4 結果の整理

\*感覚生理の法則、Weber の法則から非常に簡単な運動制御方程式  $x'' = a - Cx'$  を得た。

この運動制御式は、予め実現すべき運動状態をパラメータとして設定すれば、時間を遡って開始される制御の全域を Weber の法則を満たした感覚にあった加速度でコントロールし、最終的に設定した運動状態を実現する。

\*  $x'' = a - Cx'$  は、環境駆動の運動逆モデルの形で、人の見込み運動制御を模擬できる特性を備えていることを、この式単体で人のように交通環境を走り抜くシミュレーションで示した。また、プロでも困難なジャンプをしながらの高い横 G での高速コーナリングを、ボディーが横を向くほどの大きな横滑りをしながらこなした。

\*人の運動制御が「 $x'' = a - Cx'$  “+” 制御対象運動逆モデル」であることを、車の運転を例にしてシミュレーションで確認した。人の制御は制御対象の運動特性を身につけて成立する、すなわち、環境駆動の人逆モデルと制御対象逆モデルを直列構成した形を取るとして、車を制御した場合、これにより正確に 3.5m のレーンチェンジを非常に滑らかにこなし、さらに、人でも難しい限界状態での非線形モデルの車両運動制御をコンピュータシミュレーション上ではあるが実現した。



High Speed Cornering under Large Bumps Conditions

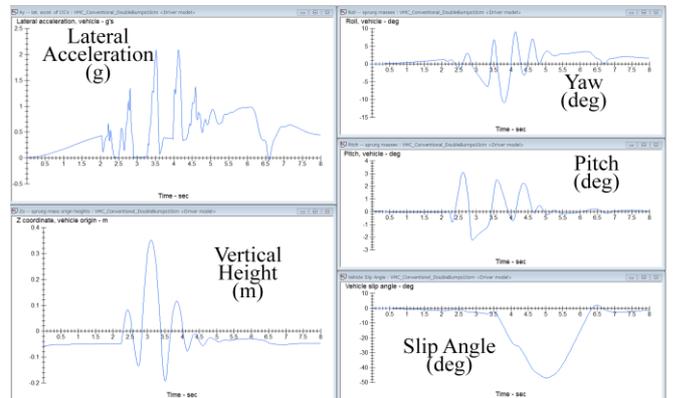


Fig. 11 Human Motion  $x'' = a - Cx'$  controls skillfully a car in high speed cornering with bumps causing car jumps and unsteady bounces, yawing, pitching and large slide.

5 結論

神経生理学では小脳内に運動の逆モデルができていたことが実験で確かめられ、逆モデルで制御が行われているのは確かなようです。

得られた式  $x'' = a - Cx'$  が人のものである保証はありませんが、この式に従った運動に身を任せれば少なくとも感覚には合っているし、環境対応の運動状態から遡って制御する見込運動逆モデルにもなっているので、人のように見込んだ運動を滑らかに実現する。そしてコンピュータシミュレーションで、人のように交通環境を走破し、人

では難しい車の限界域での運転を安定してこなす。人のように何でもコントロールする式として、この制御方程式  $x'' = a - Cx'$  を提案する。

水中運動を表すこの式による制御の特徴は、

- ① 方程式の形：減衰項しかないので絶対的な安定制御。時定数で動作時間が定まる指数関数で動作。
- ② 速度と位置の同時制御：逆モデルになっており、運動状態（速度と位置）を環境係数  $C$  に設定すれば正確にその運動状態が実現される。
- ③ 滑らか：制御の全域で加速度が人の滑らかさでコントロールされる。当然速度も変位も滑らか。

さらに、車の制御例を示したが、この制御方程式

$x'' = a - Cx'$  は制御対象の逆モデルと組み合わせることにより、制御対象を正確に安定してコントロールできる。

## 6 どんなことに使えるのか

$x'' = a - Cx'$  は自然界が造り出した生き物の運動を支配する原始制御と思われる。制御したい運動の力のかかり具合から力の方向が変わる毎に運動を切り分けて、それぞれの運動方程式を設定しなければならないが、これが実は難しいが、自然界で鍛えられた制御なので、人が行えることを含めて、良い運動はシンプルであると期待して、どんな制御も行える可能性がある。

交通環境のように一次元の運動では力の加わる方向は自明、しかしコーナリングのように平面運動の場合はシミュレーション例のように、初め斜め方向の力が加わる進路変更運動、次に求心力が加わる円運動と言うように、加わる力の方向が変わるような、運動が単純で無い場合、運動を分解し運動毎に切り分けて、見込む運動状態の  $C$  を決め、運動方程式を設定する必要がある。

運動の切り分けができれば以下のこと等が可能。

- \*  $x'' = a - Cx'$  は制御装置として、車に限らず何でも安定制御し、目標とする運動状態（速度と位置）を人の滑らかさで安定して実現する。
- \*  $x'' = a - Cx'$  による制御では、位置、速度の制御の課程での身体が受ける慣性力が人に優しい滑らかさを保持しているので、人に関わる各種支援装置、乗り物等の前後、左右、上下の運動制御に使える。
- \*  $x'' = a - Cx'$  は環境対応の逆モデルの形をしているので、環境に対する現在の運動状態の評価が可能。例えば、環境を遡って今必要とされるブレーキ力をリアルタイムで刻々出力出来、もし適切な減速をしなければ必要とされるブレーキ力はどんどん上昇するので、環境に合わない運転の検出に利用すれば、運転支援装置が簡単に作れ、高  $G$  での滑らかな非常停止、自動運転も可能。
- \* どんな環境をも走り抜くこの式  $x'' = a - Cx'$  をドライバモデルとして使えば、CarSm と MATLAB を使って、フィードバック評価も含めて誰でも車の運動の全ての評価、車に組み込んだ制御の運動に関わる評価が可能。例え

ば、車両運動の基本中の基本、人が制御可能なアンダーステアレベルの決定など。

\*人が身につける制御対象逆モデルは物理式なので、人側に置かないで制御対象側に置く方が理にかなっている。そうすれば練習が不要なシステムが作れる。身障者には習得が易しくなり、健常者は練習がほとんど不要に。

## 7 おわりに

この運動制御式は、交通安全に科学的に広い見識で取り組まれていた自在研初代所長で元東大生研教授故平尾収先生のご指導を得て ITARDA(財)交通事故総合分析センタ)で誕生しました。先生は人の動きをする車のことを人動車と言われ、交通事故の原因は見込み違いと言われていましたが、今回の式は、その見込みで動く人動車の運動方程式として作ったものです。当時は前後方向の運動しか試すことができませんでしたが、最近になってコンピュータ上で動く高性能な車両ソフト CarSim に出会い、車の横方向運動においても、この式の高い制御性能を試すことができました。

予め先を見込んで秒単位に時間を遡って操作しなければならない車の運転では、逆に遅れる運動神経では幾ら素早くても何の足しにもなりません。先生は見込み違いの起こりにくい、人の行動心理を反映した交通環境（道路、車、教育など）の実現を強く望まれていましたが、現状行政と対立することが多く未だに理解を得られていないのが実情です。

先読みによる見込みが正確でないと滑らかな運転を続けられません。滑らかさは先読みが正確な証拠、運転の滑らかさが安全運転の指標になります。

先生は自分の身は自分で守るしかないとも言っておられました。

同乗者にも快適な、先を読んだ滑らかな運転で無事故をお祈りします。

## 8 参考文献

森政弘ほか「生物の基本的な運動に関する一般論」バイオメカニクス 3

宮岡徹監訳 G.A.Gesheider 著「心理学 方法・理論・応用」上巻 (Weber 則)

阿部正人「自動車の運動と制御」

牛生扇 平尾収「歩行者 人動車 道一路上の運転と行動の科学」

筆者 HP : <http://bimolab.com>  $x'' = a - Cx'$  による運転制御シミュレーション動画