

二輪車のライディングシミュレータに関する研究

ーロールフリーとした4自由度の模擬運動についてー

Research on Motorcycle Riding Simulator

– on Simulated Movements of Four Degrees of Freedom under Roll-free Conditions –

引 地 東一郎* 櫛 田 和 光*

Toichiro Hikichi Kazumitsu Kushida

要 旨

二輪車のシミュレータは、混合交通に対する初心者ライダーの交通安全教育に寄与し、模擬的乗車体験が効果的にできると考えられる。

シミュレータの開発にあたって、模擬車体のロール方向の動きを実際の二輪車と同様にフリーとし、模擬運動の再現手法と操縦性について主に研究した。

直進路におけるレーンチェンジやスラロームのような比較的動きの小さな範囲では、実際の二輪車の運動を台上でほぼ実現できた。ライダーは、実際の二輪車と同様な操作感覚でシミュレータを操縦できた。

模擬車体の倒立に対するバランス感覚は、実際の二輪車らしさを現わす操縦感覚には直接結び付かず、むしろロールとヨーの連成した動きを作り出している操縦動作に、二輪車らしい感覚があった。

従って、模擬的旋回走行が可能となるように、ロールの動きを最適に制御し、加減速の動きが体感できるように、ピッチングの模擬的動きを加えることで、二輪車のライディングシミュレータを実用化できることがわかった。また視野情報の距離感およびヨー方向の正確な表現は、操縦感覚を良くするための必要条件であった。

ABSTRACT

The motorcycle simulator will contribute to more effective education of beginner riders on safety in mixed traffic and enable efficient gain of experience through simulated riding.

Studies were made mostly on the simulation method that will reproduce the movements of a motorcycle and its maneuverability by freeing movements of the simulator in the roll direction.

The actual movements of motorcycle could be successfully reproduced on the simulator as long as the movements were restricted to a narrow range like the lane change or slalom on a straight road. The sense of riding a motorcycle is obtained not so much by the sense of balance as by its motion which represents the combined movements of roll and yaw of a motorcycle. Also the visual information such as the expression of the sense of distance at close quarters and of the accurate amount of change in the yaw direction were required to improve the maneuvering feeling.

The riding simulator could be put to practical use through the optimal control of roll movement to represent simulated turning and the addition of simulated pitch movement to enable the movements for acceleration and deceleration to be felt.

1. まえがき

最近のコンピュータの発達に伴って、車両運動のシミュレーション技術や制御システムの設計技術などの進歩はめざましく、これまで自動車や航空機などの運動性能の向上を目的として実機に搭載するための各種制御装置が開発されてきた^{1)~4)}。そしてシミュレータは、これ

ら自動車や航空機をはじめ、さまざまな交通機関の操縦訓練用および研究用として開発されてきた^{5) 6)}。しかし、二輪車のシミュレータの研究開発例はほとんどなかった。近年、シミュレーション技術の向上にともない、二輪車の開発においても、その運動特性や性能を図面段階で予測できるようになりつつあり、このシミュレーショ

* 朝霞研究所

ン技術により仮想的な実験などが可能となってきた^{7)~10)}。このため実車の模擬の乗車体験を、効率的にできるシミュレータの開発が、二輪車に対しても望まれるようになった¹¹⁾。

二輪車の運動は、ロール方向の大きな動きをとまなう場合が多く、三次元的であり、シミュレータを開発するためには複雑な運動モデルをイメージさせる。しかも他の交通機関に比較し操縦動作に対する応答速度が速いため、模擬運動に対する機械的な応答性やその制御システムの構築に難しさがあると思われた。しかしその研究開発は、車両運動に対する新技術の事前評価や、ライダーの操縦特性とライダー・二輪車系の最適な整合など¹²⁾、とりわけ混合交通における危険予知予測の模擬体験が可能なシミュレータによる交通教育は、予防安全に有効な手段であると筆者らは考える。

二輪車の運動のシミュレート手法として、ライダーの操縦動作の検知信号により模擬車体のロール、ヨー、横(左右)およびハンドルステアなどそれぞれの方向の動きをアクチュエータを用い、運動力学的な法則に従って制御する方法が考えられる。

二輪車の操縦動作の特徴は自動車などと相違し、ライダーのバランス感覚による体重移動で、ハンドル操作とともに、車体の運動を制御している点である。ライダーは、二輪車本来の自己操舵機能により車体の直立安定をほぼ無意識に保って走り続けられる。操縦動作とは、この無意識に働いているバランスを、意識的に車体のバランスを崩す方向に働かせ、同時にタイヤの接地点の横方向の力による車体の移動量を感じつつ、ライダーの意図する方向の走行ラインに車体を合わせることである。これは、体重移動などによって自己操舵機能に意識的に働きかけ、車体のバランスを崩して走行ラインを変更することともいえる。

この現象を物理的な二輪車モデルを用いて表現するには、倒立振子的なロールフリー状態の二輪車モデルの安定性と運動特性を定量的にとらえ、さらにライダーの制御を含めた閉ループ系的な制御システムにする必要がある。

本報ではロールフリー状態で模擬の二輪車を運動させるときの制御システムを取り上げ、実際の二輪車との操縦感覚や運動特性について比較検討し、さらに視覚情報が操縦性に与える影響についても述べる。

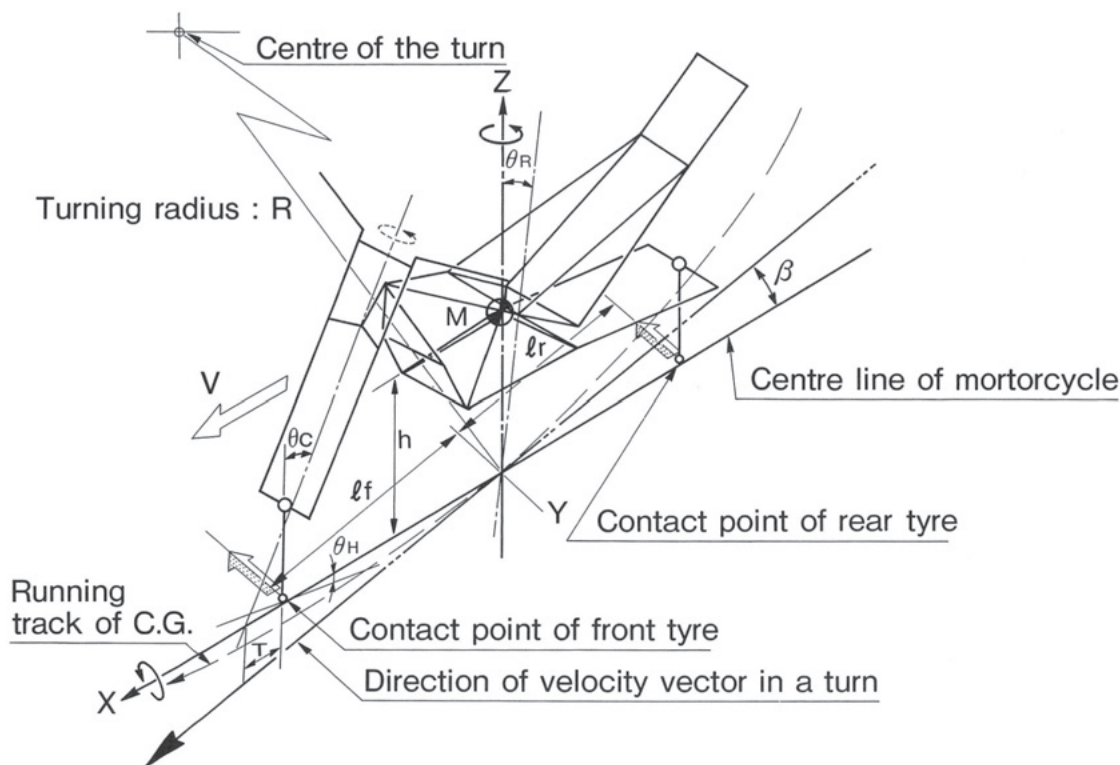


Fig. 1 Dynamic Model of Motorcycle

2. 二輪車の運動とシミュレータの制御システム

2.1. 運動方程式とシミュレーションフロー

実際の二輪車のように模擬車体をロールフリーにすれば、ライダーのバランス感覚は、その模擬車体の操縦に対して機能するだけでなく、そのロール方向の安定性を保つためにも必要となる。二輪車の模擬運動に対して、倒立振子のシミュレート手法を取り上げた基本的な狙いは、

(1) 模擬車体のロール方向の安定性を保つためのバランス感覚は、二輪車の操縦感覚として重要な要素であるのか、

(2) 二輪車の操縦感覚を、シミュレータとして演出可能なシステムが機械的にできるのか、

を明確にすることである。この研究は、シミュレータのシステムにどのような条件を設定すべきかを知り、実用化する上で必要である。

二輪車の運動特性に対して、Fig. 1 に示すような二輪車のシミュレーションモデルを作り、システムの簡略化のため、車速が0~60km/h 程度の比較的低速領域を主にシミュレートした。車輪の回転によるジャイロ効果を見直し、横(左右)、ヨー、ロールおよびハンドルステアのそれぞれの方向に対する式(1)~(6)の運動方程式を基礎とし、二輪車の運動をシミュレーションする解析フローと併せて、シミュレータの制御システムを検討した¹³⁾。

横(左右)方向

$$MV \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \right) - Mh \frac{d^2\theta_R}{dt^2} = C_f + C_r - (k_{cf} + k_{cr}) \theta_r \quad (1)$$

$$C_f = k_f (\theta_H - \beta - \frac{l_f}{V} \frac{d\phi}{dt}) \quad (2)$$

$$C_r = k_r (-\beta + \frac{l_r}{V} \frac{d\phi}{dt}) \quad (3)$$

ヨー方向

$$I_x \frac{d^2\phi}{dt^2} - I_{xz} \frac{d^2\theta_R}{dt^2} = C_f l_f - C_r l_r - (k_{cf} l_f - k_{cr} l_r) \theta_R \quad (4)$$

ロール方向

$$I_x \frac{d^2\theta_R}{dt^2} - I_{xz} \frac{d^2\phi}{dt^2} = (Mgh - K_R) \theta_R - C_r \frac{d\theta_R}{dt} - MhV \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (5)$$

ハンドルステア方向

$$I_s \frac{d^2\theta_H}{dt^2} = T_{\theta H} + k_s \theta_R + C_f T \cos(\theta_c) \cos(\theta_R) \quad (6)$$

使用記号

M:二輪車質量

V:車速

C_f, C_r :前、後輪コーナリングフォース

k_f, k_r :前、後輪コーナリングパワー

k_{cf}, k_{cr} :前、後輪キャンバースラスト係数

l_f, l_r :前、後輪軸と車両重心間距離

h:重心高

g:重力加速度

C_R :ロール角速度抗力係数

K_R :ロール角抗力係数

x:ロール軸

y:ピッチ軸

z:ヨー軸

I_X :ロール慣性モーメント

I_Z :ヨー慣性モーメント

I_{XZ} :X-Z軸間慣性乗積

θ_H :ハンドルステア角

θ_R :ロール角

ϕ :ヨー角

β :重心スベリ角

I_s :ステア軸回り慣性モーメント

$T_{\theta H}$:ステアトルク

k_s :自己操縦係数

T:トレール

θ_c :キャスト角

二輪車の運動を規制するタイヤ-路面間でタイヤに発生する主な力は、ハンドルステア角 θ_H も含めたタイヤの重心スベリ角 β によるコーナリングフォースと、ロール角 θ_R によるキャンバースラストフォースの合力である。

この力は、挙動変化を体感しながら、無意識的なバランス感覚で操縦するライダーによって、間接的に制御される。ハンドルスティア角 θ_H は、式(6)に示したように、主にライダーの操縦によるハンドルのステアトルク T_{θ_H} とロール角 θ_R による自己操舵トルクの合力によって求められる。しかし、ここでは二輪車の挙動変化に対して、ライダーのハンドル操作を直接的なハンドルスティア角 θ_H による変位制御にした。ライダーの体重移動によるロール方向の操作もロール角 θ_R による変位制御にした。この方が、シミュレータの制御システムにおいては、ライダーが操縦動作を感覚的に理解しやすく、より簡単に操作に馴れるものとテストにて判断したためである。

そこで前述の運動方程式を、ライダーの操縦動作によるハンドルスティア角 θ_H およびロール角 θ_R を主な入力信号として、Fig. 2 に示すようなシミュレーションフローに書き表し、その操縦動作に対する車体の挙動変化を解析できるようにした。詳細は APPENDIX に示す。倒立振子的なシミュレータの模擬二輪車に対するライダーの操縦動作は、これらの方程式から算出され、モータの出力指令値として横方向のコントローラに伝えられる。そしてこれらの動きが、ロールフリーの模擬車体のバランスを確保する。さらに挙動変化が実際の二輪車感覚と一致するように、制御パラメータとしてのタイヤの各種係数や遅れ時間などのデータマップを、実機の計測値を基に調整した。

2.2. 試験用シミュレータシステム

試験用シミュレータの基本システムは、Fig. 3 に示すように、二輪車の形状を模擬した車体部、シミュレータの前後に設置された横(左右)方向の動きを表現するための 0.75kW の AC サーボモータを備えた可動部、模擬視界表示部(映像装置)および模擬音響・走行風発生部などより構成されている。音響装置には専用コンピュータとシンセサイザが含まれ、各模擬部の機能制御や数値演算など全体の制御システムは、コンピュータ (Alliant FX40 & NEC PC9801RA) によって処理されている。

模擬車体部には実際の二輪車の機能部品が、ライダーに実操作感を与えるようにセッティングされ、取り付けられている。また走行状態に合わせて、エンジン音、変速シフト音、タイヤスリップ音等の発生音や走行風の演出装置も備えており、それらは模擬運動や模擬視界と互いに連携して、臨場感を高めるように制御されている。

視界情報を得るための模擬視界表示部は、100 インチ相当の背面透過型プロジェクションディスプレイを、視野角約 70° でライダーの視点位置より約 2m 前方に設置した。模擬車体の動きにともなってリアルタイムに移り変わる道路情報は、三次元的なコンピュータグラフィックスによる良質な画像で、現実感を演出するため CGI (Computer Generated Image) 方式で表現されている。

運動の自由度は、横(左右)、ヨー、ロールおよび、ハンドルスティアの動きの 4 つである。ステア方向の動きはバ

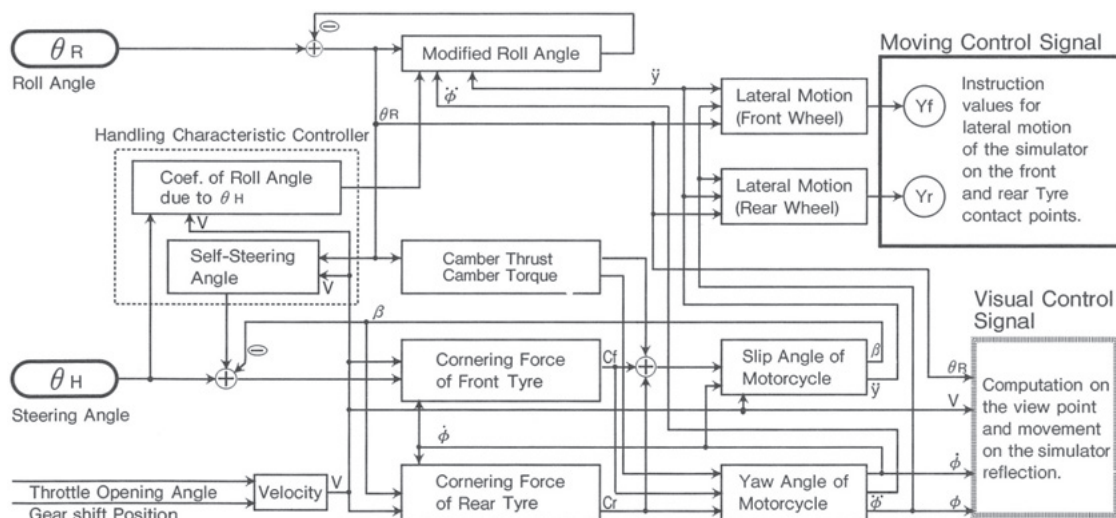


Fig. 2 Block Diagram of Simulation Analysis

ネとダンパで、拘束されているのみで、特にモータなどの動力をもって制御されるものではなく、ライダーの制御意志にまかされている。

このロールフリーなシミュレート手法では、操舵反力を制御しながら定常的なバンク角をとまう大きな旋回走行は原理的に不可能である。ライダーはロールフリーの模擬車体のバランスを保ち、限られた可動範囲でその車体を操縦する。模擬運動の範囲は物理的に制限されており、操舵反力を制御しながらこの模擬車体を操縦することは、ほとんどできないと考えられるため、ロール方向の動きによる自己操舵機能を見捨てても二輪車感覚で操縦できると判断した。

一方、Fig. 2 に示すシミュレーションフローにおいては、ライダーの操縦動作に対応する操縦モデルとするため、自己操舵による車体制御とライダーがハンドルを操作する意志と考えられる経験的な操縦特性の簡単な閉ループ系の制御(点線枠内)を、その解析フローに導入した。

シミュレータの制御フローには、当然ながらこの操縦モデルを導入していない。この試験用シミュレータの運

Table 1 Range of Movements for 4 Degrees of Freedom of the Simulator

Direction	Displacement	Velocity	Acceleration
Steering	± 30 (deg)	free	free
Rolling	± 20 (deg)	free	free
Yawing	± 19 (deg)	± 60 (deg/s)	± 80 (deg/s ²)
Lateral	± 0.315 (m)	± 0.68 (m/s)	± 2.25 (m/s ²)

動諸元を Table 1 に示す。倒立振子的な車体のバランス取りは、その限られた可動範囲で可能であり、実際の二輪車と同様に、シミュレータの可動部を横(左右)に ± 315 mm の範囲で動かし、車体の運動をシミュレートしている。このため、スラロームやレーンチェンジなどの動きに対する二輪車感覚の評価や、メカニズムに対する必要条件などを十分検討できる。

模擬運動の位置制御ループの周波数特性は、装置としての動きのスムーズさとともに、模擬運動のリアル感に密接に関係する。ロールフリーな車体のバランスを取る横(左右)方向の運動の周波数特性は、約 2Hz まで感覚的な遅れはなく、二輪車の通常の運動では全く問題ない。

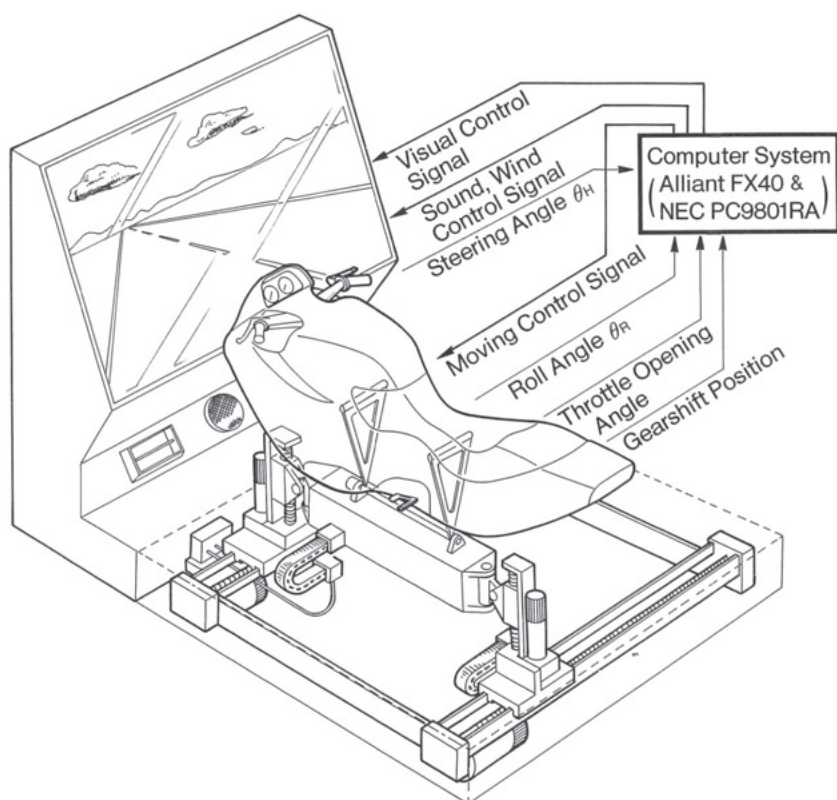


Fig. 3 Schematic Structure of the Prototype Motorcycle Riding Simulator

約 3.5Hz では動きの指令信号に対するシミュレータの実動の位相が -180° 程度となるため、接地点の動きが車体の動きに追従せず運転が困難となる。

3. 模擬運動の比較検討結果

3.1. 直進走行

シミュレータの模擬運動を実際の二輪車の運動と比較するため、テストに用いた実車の諸元を Table 2 に示す。この二輪車のタイヤの動特性や車体諸元は、本研究に用いた試験用シミュレータの基本モデルであり、同時にこれらは、Fig. 2 に示した運動のシミュレーションモデルに使用されている。

倒立振子的な模擬車体のバランスを取り、直立安定性を保って直進走行した場合のハンドルステア角の変位の標準偏差 σ_{θ_H} と車速 V の関係を、実際の二輪車のテスト結果とともに Fig. 4 に示した。これらの σ_{θ_H} は、走行テストの約 1 分間の 0.01 秒ごとにおける統計的な時間頻度分布による値である¹⁴⁾。シミュレータの σ_{θ_H} が実際の二輪車のそれよりも顕著に大きくなっているが、これは、車輪のジャイロ効果やロール方向のバランス取りによる自己操舵を、シミュレータの制御システムにおいて無視したことが、大きく影響したものと考えられる。このシミュレータ操縦感覚は、ライダー A, B, C に個人差があるものの二輪車的であり、バランス取りも不安定なもので

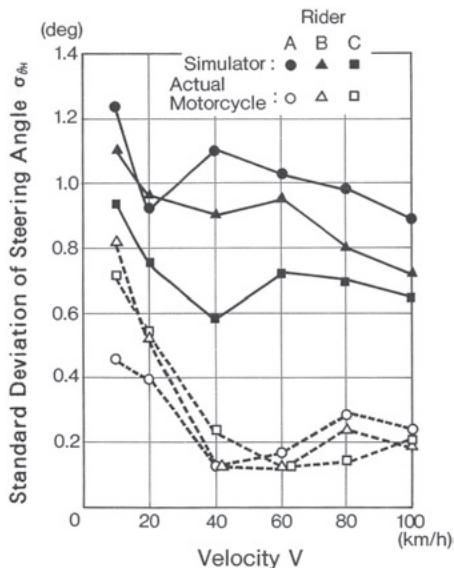


Fig. 4 Standard Deviation of Steering Angle against Motorcycle Velocity while Riding Straight Ahead

Table 2 Specifications of Test Motorcycle

Wheel Base	(mm)	1376
Displacement	(cm ³)	399
Caster Angle	(deg)	27
Trail Length	(mm)	100
Curb Weight	(kg)	185
Moments of Inertia Roll/Yaw/Pitch	(kgm ²)	57.4/31.8/39.3
Hight of C. G.	(mm)	504
Tyre Size	Front	100/90-16
	Rear	130/70-18

はなく、安定的に直進走行が可能であった。

車速 $V=40\text{km/h}$ におけるライダー C のハンドルステア角の変位の頻度分布 $f(\Delta\theta_H)$ を Fig. 5 に示す。シミュレータの場合、最大 2° 程度のステア操作をしており、実際の二輪車の値に比較して約 2 倍の操作範囲となった。これは直進走行において、ライダーが自分のわずかに動く体重移動に対して、模擬車体ではロール方向の動きによる自己操舵がないので、ロール方向のバランスを保つために、比較的大きなステア操作をするためである。しかし、ハンドル操作による車体の直立バランス取りは、違和感なくスムーズにでき、しかも直進コースのライン取りは気遣いなくできるため、ハンドル操作の範囲がこの程度に大きくなっても、実際の二輪車の場合に比較して、大きな違和感とはならなかった。

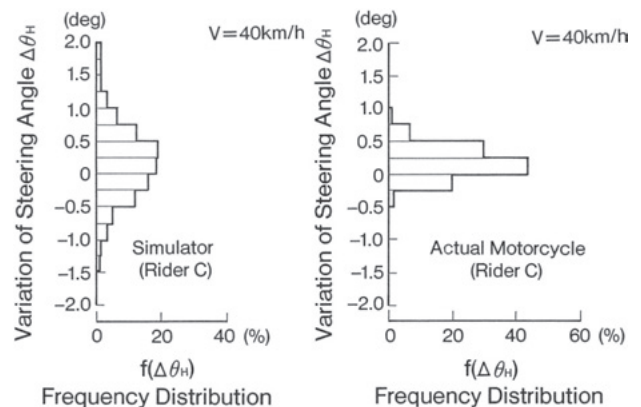


Fig. 5 Frequency Distribution for Steering Angle while Riding Straight Ahead

シミュレータの直進走行におけるロール角変位の標準偏差 σ_{θ_R} を、実際の二輪の計測値と対比して Fig. 6 に示した。これらの値もハンドルステア角の変位と同様に、統計的に処理された時間頻度分布による値である。車速 20km/h 以上のシミュレータの σ_{θ_R} の大きさと傾向は、実際の二輪車の場合とほぼ一致した。そして、ライダーの体重移動に対する模擬車体の動きは、二輪車の乗車感覚であり、直立近傍の制御が十分満足できるレベルであることがわかった。

ハンドルステア角の変位の標準偏差 σ_{θ_H} が大きくても、ライダーの重心にはほぼ近いシート部の変位が、実際の二輪車の操縦感覚に近ければ、大きな違和感にならないものと思われる。車速の低下にともなって、操縦動作によるロールの単位操作角 (単位キャンバ角) および操舵の単位ステア角に対するタイヤの接地点の横移動は力学的に小さくなり、車体の直立バランスがとりにくくなる。このため約 10km/h では、シミュレータの直立バランス取りのためのロール操作とハンドル操作がともに大きくなり、操縦動作が感覚的に不安定であった。そして初めてこのシミュレータを体験した被験者 15 名の約 30% は、この車速でバランスをうまく取れず、走り出す前に車体が大きく傾き転倒状態となり、操縦できなかった。

$V=40\text{km/h}$ におけるライダー C のロール角の変位の頻度分布 $f(\Delta\theta_R)$ を Fig. 7 に示す。シミュレータの場合、最大 2.5° 程度の変位があり、実際の二輪車の場合に比較して約 2 倍の範囲の動きを示した。これはライディング

の特徴がハンドル操作でバランス取りする乗り方ではなく、体重移動による乗り方が主であったためである。

シミュレータの直立安定を保って直進走行することは、少し慣れることが必要であるものの容易であった。そして、シミュレータの直立近傍での二輪車としての制御システムは、機械的なメカニズムも含めて、模擬感覚の実現に問題ないことがわかった。ただし、二輪車の操縦方法はライダーによって個人差があり、シミュレータの研究開発においては、多数のライダーの操縦特性を総合的に検討し、さまざまな操縦方法を違和感なく受け入れてくれる制御システムを構築しなければならないことも明確となった。

3.2. レーンチェンジ

この試験用シミュレータが横 (左右) 方向へ動ける範囲は $\pm 315\text{mm}$ であるため、約 500mm 幅のレーンチェンジを 2 秒程度を目安として実施した。このときのロールとヨーの角度と角速度およびハンドルのステア角について、シミュレータの計測値、実際の二輪車の計測値および運動方程式の解析による理論計算値をそれぞれ求め Fig. 8 に示す。また、ハンドルステア角 θ_H に対するロール角 θ_R とヨー角 ϕ の関係を Fig. 9 に示す。

実際の二輪車の計測値と理論計算値は、動きの変位もその位相関係もほぼ一致した。しかし、シミュレータの動きは、ロール方向の変化が小さかったにもかかわらず θ_H と ϕ が比較的大きくなった。これは、ロールフリー

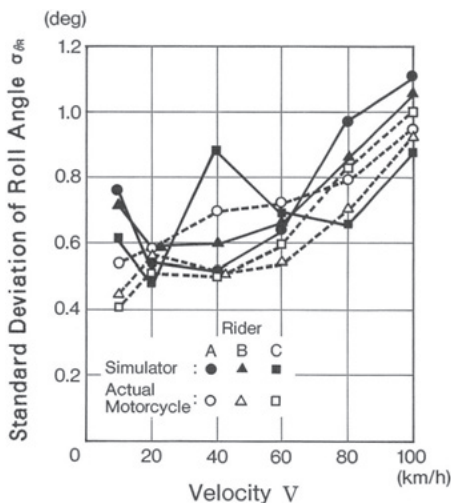


Fig. 6 Standard Deviation in Roll Angles against Motorcycle Velocity while Riding Straight Ahead

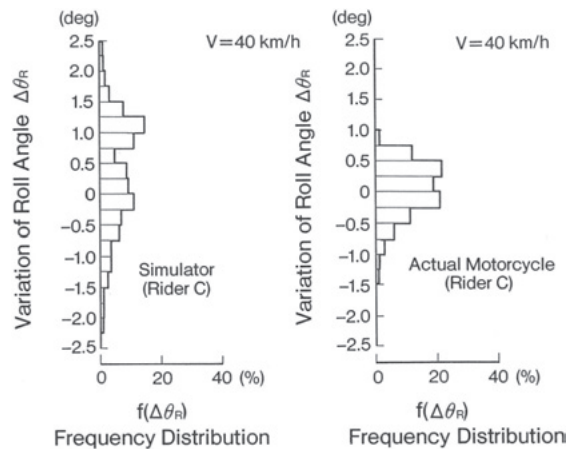


Fig. 7 Frequency Distribution for Roll Angles while Riding Straight Ahead

な模擬車体のレーンチェンジにおいて、ロール方向の傾きを直立に修正するための操作が、主にステア操作によって行われたためである。シミュレータ上のライダーは、車体がロールするときのステアの自己操舵が働かないので、比較的大きなステア操作を行い、車体のロールとヨーの動きを補正し、安定性を確保しているのがわかった。結果として、台上で車体をバランスさせるためのライダーの操縦動作が、実際の二輪車の場合とデータの相違とを考えられる。しかしながら、この程度の相違では、シミュレータに少し慣れるとライダーは実際の二輪車と同様な感覚で違和感なく操縦できることもわかった。

したがって、シミュレータの実用化に対しては、機械的に限定された可動部の動きを最大限生かし、感覚的に満足できる動きを実現すると同時に、より簡単な制御システムを作り出すことが必要である。

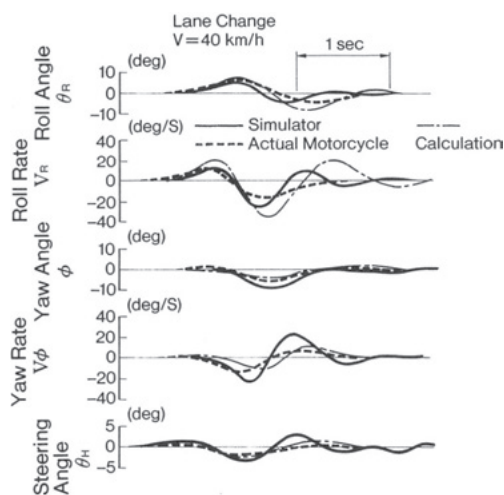


Fig. 8 Comparison of Motorcycle Behavior during Lane Change

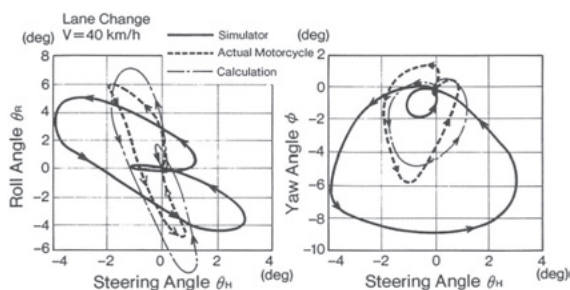


Fig. 9 Responses of Roll Angle and Yaw Angle against Steering Angle during Lane Change

3.3. スラローム

レーンチェンジと同様に、約 500mm 幅の直線コースにおいて、約 1~1.5 秒の周期でスラロームを実施した結果を Fig. 10 に示す。また、スラロームの運動が定常的に安定した状態のハンドルステア角 θ_H に対し、ロール角 θ_R とヨー角 ϕ の関係を Fig. 11 に示す。

シミュレータのスラロームの繰り返し走行においては、レーンチェンジのように車体の動きを止めるための過渡的なバランス取りに気を遣わなくてすむため、実際の二輪車と同様に操縦し易く走行も安定していた。このため、シミュレータの運動の計測値は、ハンドルステア角 θ_H がわずかに大きくなったが、実際の二輪車の計測値および理論計算値と比較的良好く一致した。

二輪車のシミュレータとして、倒立振子的にロールフリーにした模擬車体の運動制御は、ほぼ可能であること

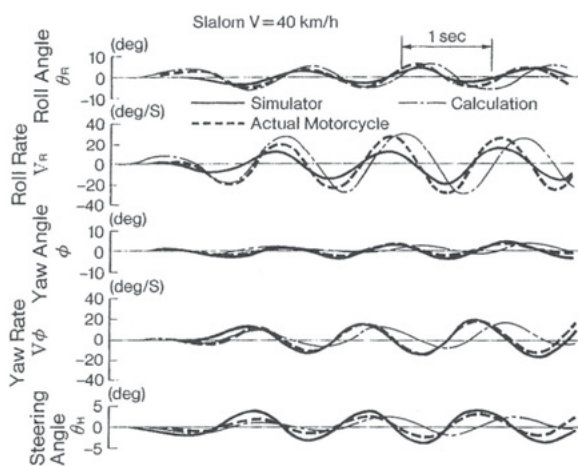


Fig. 10 Comparison of Motorcycle Behavior during Slalom

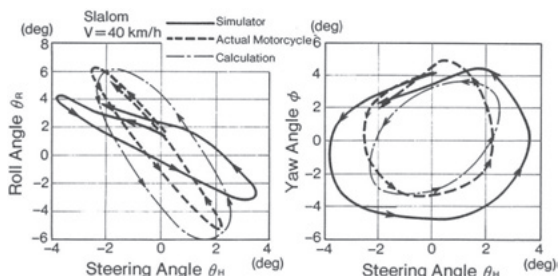


Fig. 11 Responses of Roll Angle and Yaw Angle against Steering Angle during Slalom

が判った。安定的なバランス取りとコースのライン取りが同時にできる制御システムの検証もできた。限られた動きの範囲ではあるが、スラローム時のロールとヨーの連成運動は、実際の二輪車らしさをライダーに体感させる操縦感覚であった。直立を確保するためのバランス感覚だけが、二輪車の実体験に近い感覚を与えるものではない。

したがって、ロール方向の動きは、ライダーの操縦動作によって制御されるとしても、ロール方向の動きがフリーである必要性はないと判断される。また、ロール方向の動きの制御システムを、このシミュレータに新に付加することで、大きな旋回走行も含めた二輪車の模擬運動の実現が可能になるものと考えられる。

4. 視覚情報が操縦性に与える影響

シミュレータは、視覚情報によってどう操縦性に影響を受けるのか、実走テストにより検討した。テスト手法として、**Fig. 12**に示すように二輪車の前方に CCD カメラと LCD モニタを搭載し、モニタ映像を見ながら実走し、操縦性を官能評価した。

LCD モニタと同位置に設けたスリット (75mm × 100mm) にて限定視野を設定し、裸眼 (両眼) による走行を別途行い、評価基準とした。

二輪車を操縦するために必要な視覚情報要素を、Fig. 13のように大別すると、情報の「質」と「量」に分けられる。前者は肉眼で見る立体現実視覚を、立体感が無い視覚情報に置き換えることで、人間の操縦動作判断に与える影響要因を示し、後者は視野角の違いによるロール角、

Table 3 Visual Information Influence for Handling

Evaluation Item		Comparative Studies	Virtual Visibility		Real Visibility
			CCD Camera LCD Monitor (3in.)		Naked Eyes through a Slit 500mm Ahead
			Standard Focus f=7.5mm	Wide Focus f=15mm	Size 75mm x 100mm
Visual Information	Yaw Angle Accuracy		B	C	A
	Roll Angle Accuracy		A	A	A
	Ease of Perception of Distance		C	D	A
	Ease of Perception of Velocity		B	C	B
Stability	Easy to Start		B	B	A
	Up to 15km/h		C	D	A
	Up to 50km/h		B	C	B
	Narrow Road Width 500 mm at 15km/h		B	D	A
	Straight Course Trace Accuracy		B	B	A

A: Fair B: Acceptable C: Inferior or Difficult D: Uncontrollable

コー角の検知、近距離対象物の認知が操縦動作に与える影響要因を示す。主な項目のテスト結果を Table 3 に示す。

現実視野において、単眼時は一般的に両眼時よりも立体感がつかみづらくなると思われるが、実際には違和感を覚えるものの、ほとんどの場面で操縦困難になることはなかった。これは、両眼で立体感を感じる距離は10m程度までで、それ以上は物の見え方の法則、物体の重なり、自転車および対象物の動きによる「近影は速く、遠影は遅く」移動する経験的概念などから得ていると考えられる。単眼だけでも、水晶体のピント調整作用から距離感が得られ、これは完全な二次元像としてではなく、擬似立体像が視覚中枢で再構成されているためと思われる。

カメラを通した LCD モニタの映像においては、眼と映像間距離は常に一定のため、眼の調整機能は立体感、距

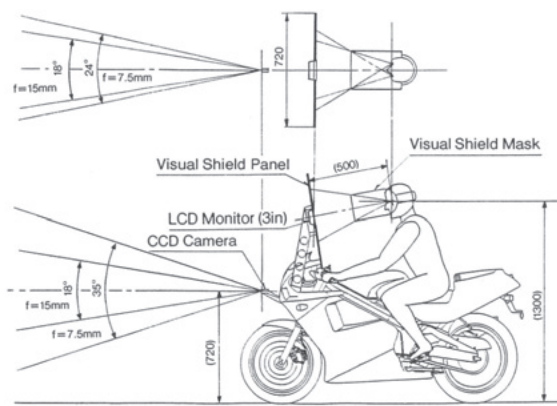


Fig. 12 Visual Influence Test for Actual Riding

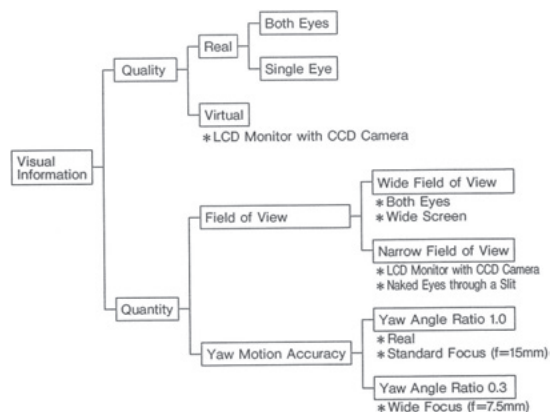


Fig. 13 Visual Information Factor

離感を得る作用を行わず、物の見え方の法則のみで認知処理が行われている。標準レンズを用いたテストでは、近距離の距離推測が難しく、また視野角も狭まるものの幅 500mm のコース設定での走行は操縦可能であった。これはヨー角の変化量がほぼ現実と同等のためである。

広角レンズを用いて視覚上のヨー角変化量を少なくした場合、近距離目標は視野に入るが、車体挙動変化との不一致が増長されるため、15km/h では操縦不可能になる。ライダーの積極的なステア操舵と体重移動により、安定性を保つことが必要なこの速度域では、ヨー角の変化量は大きく影響することがわかった。

直進を保つコーストレース性は、広角レンズを用いた場合では、ヨー角の変位量が不一致であるにもかかわらず良好であった。これは予想される自車の走行軌跡と目標コースとの偏差が認知できれば、ヨー角の変位量が多少不正確でもライダーが修正できることを示している。

ライダーが状況に応じて必要な視覚情報を選択していることがわかった。特にライダーが積極的に車体の安定性を確保しなければならない低速域では、視覚から得るロール方向、ヨー方向の変化量を最小とするように頭部位置を保持することで、身体との相対変位量を捉えて車体挙動の修正を行っている。これらより重要な視覚情報は、近距離における距離感、正確なヨー角の変化量といえる。

以上より、本シミュレータの映像の動かし方は、レーンチェンジ時などの横方向に移動する時は、自車のヨー回転の中心位置からスクリーンに直交する線上に無限遠点を設け最適化した。直進時は常に自車の前方に無限遠点が来るようになる。しかしながら、近距離の距離感が二次元映像ではつかみづらく、目標コースをトレースするためには慣れが必要である。

5. 結 論

実際の二輪車と同様に、倒立振子的にロールフリーとし、タイヤの接地点の横(左右)移動で車体のバランスを取るシミュレート手法および視野情報が操縦性に与える影響について検討し、次のことがわかった。

- (1) ロールフリーとした模擬二輪車の運動制御は可能であり、限られた可動範囲ではあるが、その車体をほぼ実際の二輪車の操縦感覚で操縦できる。
- (2) シミュレータとして、車体の模擬運動は4自由度で充分表現可能である。

(3) 直立を確保するためのバランス感覚だけが、二輪車の実体験に近い感覚を与えるものではなく、むしろロールとヨーの連成運動するような大きな動きのなかに二輪車らしい操縦感覚がある。

(4) シミュレータの模擬運動に対し、実際の動きを忠実に台上へ再現させる必要はなく、あくまでライダーの体感として実感覚と思わせるシミュレート手法を構築すればよい。

(5) シミュレータの実用化は、この研究用シミュレータにロール方向の運動を制御するシステムを、新たに導入することでも十分可能であると判断され、今後実用化に向けてさらに研究を進める。

(6) 視野情報として、近距離における距離感およびヨー方向の正確な変化量の表現は、操縦感覚を格段に良くするための必要条件である。

APPENDIX

本文の運動方程式(1)~(6)を基礎として、制御系解析プログラム MATRIX_xTMを用いて¹⁵⁾、模擬運動をシミュレーション検討したときのシステムフローを Fig. 14 に示す。

この制御システムは、ライダーの操縦動作によるロール角 θ_R 、ハンドルステア角 θ_H 、スロットル開度およびギヤシフト位置を入力信号として用い、模擬車体の運動を制御するため、前後車輪の接地点を横移動させるモータに指令信号を与えている。また、画像の動きを制御するため画像演算アルゴリズムにも信号を出力しており、画像の動きは、ライダーの操縦動作に従って前後・左右の位置と速度およびヨー方向の角度が変化し、実際の走行視野を模擬している。

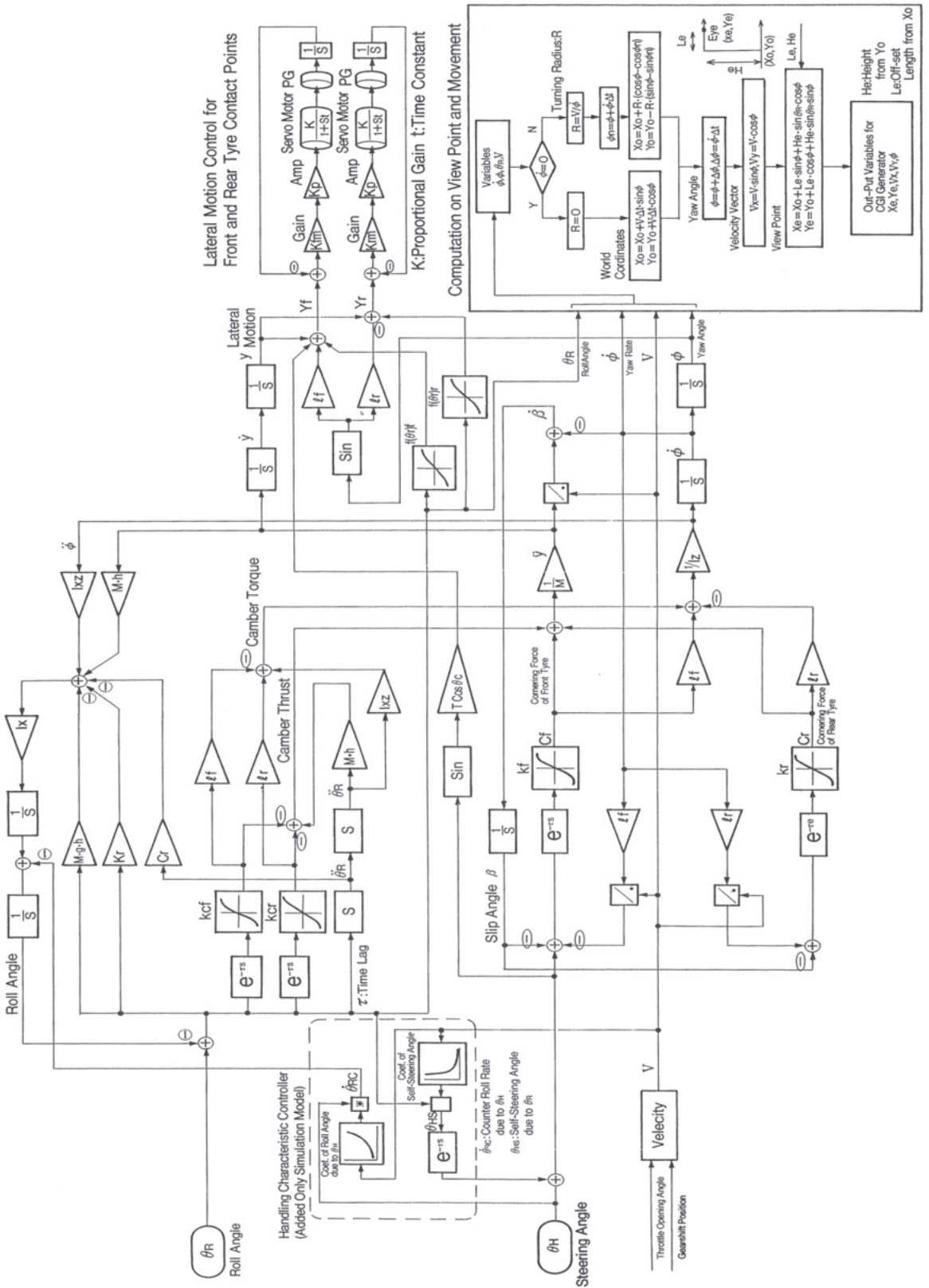


Fig. 14 Block Diagram of Simulation Analysis for the Dynamical Model

参考文献

- (1)森、他：車両運動制御シミュレーションシステムの開発、自技会前刷集, No.902, 1990, 2.261-2.264
- (2)小野、他： H^∞ 制御による操舵・懸架系の統合制御、自動車技術, Vol.46, No.3, 1992, 27-31
- (3)笹倉、他：車両性能解析の現状と将来、日産技報、Vol.23, 1987, 21-42
- (4)金井：航空機の最近の制御方式、自技会シンポジウム（4WS：アクティブ制御技術の最前線）、1987, 1-6
- (5)三木：ドライビングシミュレータ技術、豊田中央研究所 R & D レビュー, Vol.26, No.1, 1991, 1-22
- (6)川嶋：シミュレータ開発技術の新傾向、パワーデザイン, Vol.30, No.1, 1992, 14-21
- (7)de Molina, C.: Modeling task in the analysis of the driving behavior of single-track vehicles, Int. J. of Vehicle Design, Vol.8, No.2, 1987, 205-220
- (8)長谷川：二輪車の操安性の予測技術と CAE、自動車技術、Vol.40, No.3, 1986, 324-330
- (9)Hikichi, T., et al.: Analysis of Dynamic Stress on a Running Motorcycle and Application of CAE, SAE 891363, IPC-5, Vol.3, 1989, 363.1-363.9
- (10)広瀬：二輪車開発のための CAE、自動車技術, Vol.46, No.11, 1992, 50-55
- (11)落合：二輪車の安全運転教育効果、自動車技術, Vol.46, No.9, 1992, 73-78
- (12)西田：ヒューマン・インターフェースから見た教育・訓練システムの現状と今後の展望、計測と制御, Vol.31, No.12, 1992, 1221-1217
- (13)安倍：車両の運動と制御、共立出版、1979
- (14)横森、他：オートバイのハンドルの振れと安定性のフィードバック評価、日本機械学会論文集（C 編）、Vol.52, No.477, 1986, 1532-1537
- (15)MATRIX_x, User's Guide: Integrated System Inc., Santa Clara, CA., February 1990

■ 著 者 ■



引地 東一郎



櫛田 和光