二輪車用ライディングシミュレータの操縦感覚向上に関する研究 日大生産工(院)○渡辺 淳士 日大生産工 栗谷川 幸代 日大生産工 景山 一郎

1 まえがき

二輪車はライダが与える制御入力の影響を受 けやすく, 二輪車の運動を扱っていく際には人 間-二輪車系として取り扱う必要がある.車両特 性評価を行う場合,実車実験では①ライダの危 険性が高く, ②計測器等の積載スペースが限ら れる,③同一条件下での繰り返し実験が困難で あるという問題があるため、実車を模擬体験さ せるようなライディングシミュレータの使用が 有効であると考えられる.しかし、ライディン グシミュレータを用いてライダの制御動作解析 等を行うためには、実車に近い操縦感覚を再現 していなければならない. これは,ライディング シミュレータを操縦するライダに実車と同等の 操縦動作を行わせる必要があるからである. こ の実車感覚を向上させるためには、視覚情報・ 聴覚情報向上のためのオーディオビジュアルシ ステムの構築と、各種入力に対する運動表現を 実現するムービングベースの構築が重要とな る. そこで、ライディングシミュレータの臨場 感向上を目的として立体視のビジュアルシステ ム構築を行ってきたが,実車感覚が未だ不十分 であると考えられる. その理由の1つとして、ム ービングベース制御で使用している運動方程式 の表現能力の問題があげられる. そこで、本研 究では著者らによって過去構築された比較的実 車に発生する現象を模擬している運動方程式¹⁾ 2)を基本方程式として横方向運動モデルの構築 を行う. さらに、シミュレーションにより構築 したモデルの有効性を検討する.

2 シミュレータシステムの制御フロー 二輪車を操縦する人間は,視覚・聴覚・皮膚感 覚・操縦感覚などの情報から車両状態及び,外 部環境を認識している.実車感覚に近づけるた めには,ライダへの情報量の増加及び情報の質 の向上が有効である.本シミュレータの基本構 成を図1に示す.基本構成としては,ライダの操 縦動作をセンサーにより運動計算装置内に入力

し、内部車両モデルをもとに車両状態を計算 する.この計算結果より運動模擬装置,視覚 模擬装置,音響模擬装置,走行風装置等を用 いそれぞれの感覚を模擬する. 基本構成図 より分かるように,運動方程式は全体の模擬 装置への運動情報計算を行うことから、大 変重要な役割を担っていることがわかる. しかし、従来用いられてきた運動方程式で は,実車に発生する振動の表現が不十分で あると考えられる.また、同時に実車に発 生する高周波な振動を、視覚模擬システム や運動模擬システムにそのまま出力して も、高い臨場感が得られる訳では無い。例 えば視覚模擬システムに高い周波数の応答 を再現した場合、ちらついてライダには認 識できなくなる可能性がある. そこで、シ ミュレータの種々の出力に適正な応答を出 力する必要がある. そこで、本研究では横 方向モデル構築において, 二輪車の車両運 動に影響を及ぼす振動モードのみを考慮す ることで、計算量の削減並びに、各振動現 象模擬のチューニングを容易とし、乗車感 覚向上を試みる. 本シミュレータのシステ ムを図2に示す. 前方視野画像は, コンピュ ータより計算され、スクリーン4面に投影し ている.水平視野角207°×垂直視野角87°を 実現し、特に垂直方向の視野角を多く確保 する事で, ライダ特有の路面方向の視野角 に対応し速度感向上を測っている.また, 必要に応じて立体視を導入することで、距 離間向上を測ることもできる. また, 音響 は実車よりサンプリングしたものを速度条 件に応じて提供する. 走行風に関しては、 送風機を用いて速度条件に応じて風速制御 を行う.これらの情報を基にライダは操縦 動作を行う.本シミュレータでは、人間の 制御入力としてステアリングトルク、シー ト反力,アクセル開度,ブレーキ踏力とし ている.

A study on steering feeling Improvement of Riding Simulator for Two-wheeled vehicles

Atsushi WATANABE, Yukiyo KURIYAGAWA and Ichiro KAGEYAMA

3 横方向モデル

3.1 4自由度モデル

二輪車の基礎運動方程式はR.S.Sharp³の4自 由度モデルが一般的に使用され,二輪車の運 動を支配する3つの振動モードがある事が示 された.それは,低速域で問題となる非振動 的なロール運動であるキャプサイズモード, ヨーとロールが連成し,その固有振動数が車 速の上昇に対し上昇し1~4[Hz]であるウィ ーブモード,主にステアリング系に発生する 振動数が6~10[Hz]で車速の上昇に対してあま り変化しないウォッブルモードである.これ らの運動方程式は,比較的実車の特性を表現 しているが完全に一致しているとは言えな い.特に,ウォッブルモード(シミー現象)に関 しては,今までの理論解析結果においては, 実車に生じる挙動と大きく異なっている.

3.2 タイヤモデルの適用

過去ハンドル系に発生するシミーに関する 研究として、タイヤが構造的に持つバネ・ダ ンパをモデル化し、シミーを定性的に表現でき ることが示された¹⁾. さらに、相川らによって、 このモデルを拡張し、二輪車の4自由度モデル に組み込んでおり²⁾、実車との整合性が確認さ れた. このモデルはタイヤのホイルセンタと 設置中心の間にばね及びダンパを考慮するモ デルであり、このばね系を前後に配置すること により同時に横剛性とねじり剛性を考慮する ことができる.

3.3 固有值解析

参考文献²⁾⁴⁾を基に固有値解析を行った.解 析の際の車両諸元には(社)日本自動車工業会 二輪車部会の二輪車の操縦安定性に関する研 究試験法に関するテクニカルレポート⁵⁾で示 された車両諸元Hを採用し,タイヤ諸元には過 去実験にて計測した値を採用した.タイヤ諸 元を表1に示す.これらの諸元を用いて,極-および零を求めたものを図3に示す.なお,極 を'o',零点を'×'で記載した.図3に示した固 有値の中でもウォッブルモードに着目する と,特に80[km/h]前後で発生するシミーの振動 とほぼ同様な特性を持つ事が分かる.今回は, この運動方程式の固有値を基礎運動方程式と して用いる事とする.

4 シミュレータ用横方向運動モデル構築 図3に示した固有値より、タイヤの横剛性を 考慮する事でハンドルに発生する振動を上手 く表現できていると考えられる.図4の上段に 伝達関数の極の実部を速度に対して取り出し たものを、下段に伝達関数の極の虚部を速度 に対して取り出したものを示す.なお,固 有値より,二輪車の運動を支配する運動モ ードである,ウィーブモード・ウォッブル モード・キャプサイズモードのみを示し た.図4を見て分かるように,キャプサイ ズモードの安定性が速度の増加に伴い低 下していく事が分かる。この運動方程式は



Fig. 2 Simulator System

Table1 Characteristics of the			
Specification	Value	Specification	Value
$N_1[N]$	1176	K _{s1} [N/rad]	-1094
			8
$N_2[N]$	1494	K _{s2} [N/rad]	18311
$C_{s1}[1/rad]$	8.43	K _{c1} [N/rad]	-982
C _{s10} [N/rad]	1034	K _{c2} [N/rad]	1315
$C_{s2}[kgm^2]$	9.179	$K_{v}[N/m]$	-6933
		5	3
Cs20[N/rad]	4598	K _{sat} [Nm/rad]	0.664
$C_{c1}[1/rad]$	1.008	K _t [Nm/rad]	-799
Cc10[N/rad]	-204.6	C _v [Ns/m]	-60
C _{c2} [1/rad]	1.066	C _t [Nms/rad]	-5
C _{c20} [N/rad]	-278.8	$T_{v}[m]$	0.41
C _s [Nms/rad]	6	$T_r[m]$	0.5



非常に上手く実車の特性を表現しているが, 完全に一致しているとは言えない.そこで, 本研究では,運動方程式の特性根に着目し, 根配置を修正する事で二輪車の特性を表現 し,かつ,二輪車のライダが操縦可能なシミ ュレータの横方向運動モデルの構築を行う. 4.1 横方向運動モデル構築の手法

前述した通り、この運動方程式ではキャプ サイズモードが二輪車の運動を支配するモー ドとは大きく異なっているため、根配置の修 正が必要となる.図5に示すように運動方程式 の固有値より,無減衰固有振動数(wn),減衰比 (ζ), 時定数(T), ゲイン(K)を求められる. 図6 は速度に対するWn/C/Tの変化を確認したも のであり, 青点は計算結果を赤線は適当な関 数で近似した結果を示す. 近似の際, ζで負に なるものは安定となるように修正した.特に, Tについては、キャプサイズモードで使用する ため、低速時のみ多少不安定(+0.4[Hz]程度)と する事で、低速時の倒れ込みを表現した.こ のようにして求めた各係数を用いて構築した 横方向モデルに対する安定性を図7に示す. 基 本的な3つの振動モードの関数化が行われた ものと考えられる.次に、決定した係数を用 いて、シミュレータの模擬に必要な出力であ るハンドル角・ロール角・ヨーレート・横方 向速度について人間からの主入力として考え られているハンドルトルクに対する伝達関数 をそれぞれ決定した.その際,各出力に影響 が大きいと考えられる振動モードのみを考慮 した. (ハンドル角-ウォッブル, ロール角-ウ ィーブ・キャプサイズ,ヨーレート-ウィーブ, 横方向速度-キャプサイズ) 伝達関数の決定 においては, wobble · weaveに関しては運動方 程式の出力をビジュアルシステムに与えても ライダは認識できなくなる可能性があるた め、二次系の伝達関数としローパスフィルタ で高周波数帯をカットすることにした. また, 倒れ込みを表現するキャプサイズモードは一 次系の伝達関数とすることで不安定系を安定 系に変更した. 決定した伝達関数とゲイン (K), 近似関数を以下に示す.

5 シミュレーション

構築した横方向運動モデルの安定性及び実 車挙動の再現性を確認するために以下の条件 を設定し、シミュレーションを行った.

<シミュレーション条件> ・速度20・40・80・180[km/h]で一定速度

・制御入力としてハンドルトルク30[Nm],

0.1[s]のインパルス入力とする.

結果として,速度条件20・40・80・180[km/h] の条件をそれぞれ図8,図9,図10に示す. 図8-10共に,上段の図で出力としての操舵 角を,中段でロール角を,下段でヨーレー トを示しており,ロール角に関してはウィ ーブモードとキャプサイズモードについ てもそれぞれ求めた.操舵角の結果に着目 すると,速度の増加に共い,振幅が徐々に





100

š

$$\begin{split} [wobble] : \frac{\delta}{T_h} &= \frac{K_{\delta}}{s^2 + 2\zeta_{1}\omega_{n1} + \omega_{n1}^2} \\ [weave] : \frac{\phi_w}{T_h} &= \frac{K_{\delta}}{s^2 + 2\zeta_{2}\omega_{n2} + \omega_{n2}^2} , \frac{\omega}{T_h} = \frac{K_{\omega}}{s^2 + 2\zeta_{2}\omega_{n2} + \omega_{n2}^2} \\ [capsize] : \frac{\phi_c}{T_h} &= \frac{K_{\delta c}}{T_1 s + 1} , \frac{V_y}{T_h} = \frac{K_{V_y}}{T_1 s + 1} \\ \omega_{n1} &= 3.264 + 10^{-8} * V^4 - 1.619 + 10^{-5} * V^3 \\ &+ 0.0026 * V^2 - 0.0683 * V + 92.65 \\ \omega_{n2} &= -9.848 * 10^{-15} * V^8 + 8.138 * 10^{-12} * V^7 \\ &- 2.729 * 10^{-9} * V^6 + 4.733 * 10^{-7} * V^5 \\ &- 4.450 * 10^{-5} * V^4 + 0.0021 * V^3 \\ &- 0.0432 * V^2 + 0.4630 * V - 0.9282 \\ \zeta_1 &= -4.067 * 10^{-8} * V^3 + 1.872 \cdot ^{-5} * V^2 - 0.0026 * V + 0.1156 \\ \zeta_2 &= -1.511 * 10^{-9} * V^4 + 4.065 * 10^{-7} * V^3 \\ &- 5.652 * 10^{-5} * V^2 - 0.0044 * V + 0.9268 \\ T_1 &= -6.169 * 10^{-9} * V^4 + 3.550 * 10^{-6} * V^3 \\ &- 7.353 * 10^{-4} * V^2 - 0.0394 * V - 2.289 \\ K_{\delta} &= 71.31 , K_{\phi,w} = -0.2816 , K_{\phi,c} = -0.2816 \\ &= K_w = 2.333 , K_{V_y} = 2.599 \\ T_h : Steering Torque [Nm] \\ V : Velocity [km/h] \\ \dot{\Xi} J\pi U J \overline{x} \overline{\xi} 80 [km/h] \dot{\Pi} \dot{\Pi} \overline{U} \overline{x} \overline{\zeta} \overline{k} \, \overline{k} \, \overline{k} \, \overline{k} \, \overline{k} \, \overline{k} \, \overline{\xi} \, \zeta \end{split}$$

増加し速度の0.km/11内近で最も振幅が入さく なり、それ以降の速度で振幅が減少していく ことが表現されている.これは、前述で示し たウォッブルモードの挙動と一致している. また、ロール角に着目すると極低速時では発 散してしまうが、速度の上昇に共い一定の値 に収束し、振幅も減少していくことが分かる. これは、極低速時に発生する倒れ込みである キャプサイズモードの挙動と一致している. これらの結果より、モデルの有効性を示し事 ができた。

6 結言

本研究では、操縦感覚を実車に近づけるために、実車に発生する現象を模擬している運動方程式を基本方程式として横方向運動モデルの構築を行い、次の結論を得た.

(1)タイヤの横剛性を考慮した二輪車モデル を基に、根軌跡の修正を行った結果、キャプ サイズモードの倒れ込みを表現しつつ、全て の速度領域においてほぼ安定な根軌跡を持っ た横方向運動モデルの構築を行う事ができ た.

(2)構築した横方向運動モデルを用いて、シミ ュレーションを行った結果、操舵角、ヨーレ ート及びロール角共に実車の挙動を表現しう るものである事を確認した.

今後、本研究で構築したモデルを基に画像 模擬システムと、運動模擬システムとに分け て、車両運動を考え、横方向運動を模擬した 時のライダの主観評価より、スケールファク タ等の決定を行う必要がある.



Fig. 10 Result of Simulation(180[km/h])

「参考文献」

 江本浩二ら:二輪車のハンドル系に発生 するシミーに関する研究.日本機械学会論 文集(C編).61巻,582号,(1995)

 相川雄也ら:タイヤ自由度を考慮した二 輪車の動特性に関する研究.日本機械学 会,交通・物流部門大会講演論文集,19 号,(2010)

3) R.S.Sharp: The Stability and control of motorcycle, Journal of Mechanical Engineering Science. Vol.13, No.5, (1971)

4)(社)日本自動車工業会:二輪車の操縦安 定性に関する研究試験法に関するテクニ カルレポート(1990)