

二輪車を操縦するライダロボットに関する研究

－ 人間-二輪車系の定常円旋回特性 －

日大生産工(院) ○鈴木亮雅 日大生産工 景山一郎

1 まえがき

二輪車は操縦する楽しさをもつ乗り物である。これはマシンと人間の重量比がとても近く、人間の動きや操縦意思が車両運動へ大きく影響するためである。それ故に、二輪車の運動特性はライダーに大きく依存する。現在の二輪車の研究開発においてその運動特性は経験を積んだテストライダーによって評価されている。しかしながら、熟練度の高いライダーのよる評価でも各個人で運動特性にばらつきがあることが報告されている。この要因として身体特性や運転趣向などの個人差が含まれること、無意識に車両へ多入力を与えていることが考えられる。以上のことから二輪車の運動特性を定量的に評価する手法が求められている。

そこで提案するのがロボットを用いた評価手法である。ロボットを用いることで個人差を排除し、車両への入力を明確に制御できる。よって、再現性の高い実験結果を取得し、制御入力と車両運動の関係を明確化することで運動特性を定量的に特定する可能性をもつ。以上より、人間の運転行動を表現したライダロボットの構築および運動特性の定量評価の実現を目的とし、その第一ステップとして、ライダーの制御動作及び車両運動を測定する計測車両を構築し、ロボットのベース車両の定常円旋回特性を把握する。また、ロボットに組み込むライダーの制御系設計に関して理論解析を行うには車両モデルが必要であるため、その車両モデルにMBD(Multi Body dynamics)を用いた。本稿では、ライダロボットの制御系構想について説明し、ライダーの制御動作及び車両運動を計測手法について説明し、実車実験により二輪車の定常円旋回特性を求め、MBDを用いたシミュレーション結果と比較検討を行い、二輪車モデルの有用性及び課題を明らかにし、ライダーの制御モデル構築の展開について報告する。

2 ライダロボットの概要

ライダロボットを構築し運動特性の定量評価を実現するためにロボット内のアルゴリズムとして人間の運転行動を表現した制御系が必要になる。ここではライダーの制御モデルと二輪車モデルの概要について述べる。

2.1 ライダの制御モデル

ライダーは自由な軌跡を描き走行させるためロール角を制御し、タイヤ力を発生させ旋回を行う。ライダーモデルは2つの制御部と1つの制御対象の要素から構成され、図1のように考えられる。1つは目標コースを走行するための方向制御であり、図2のように考えられる。これは現在のヨーレートからT秒後の自車位置を予測し目標コースとの横位置偏差を算出し目標ロール角を決定する。2つはロール角を制御するための直立安定制御であり、現在のロール角をフィードバックし偏差を求め、ライダーは車両へ操舵トルク及びリーン角を入力する。

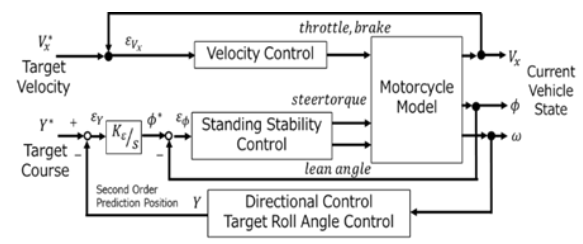


Fig.1 Rider model

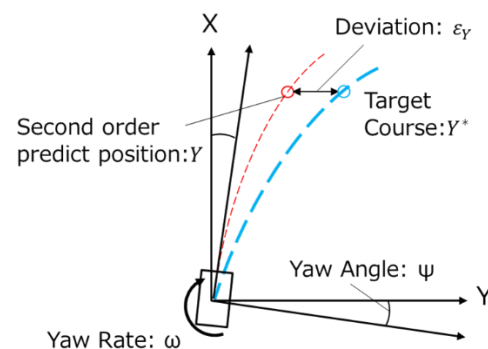


Fig.2 Directional control model

Study on Rider Robot to Steer the Motorcycle － Steady Cornering Characteristic of Rider and Motorcycle －

Ryoga SUZUKI and Ichiro KAGEYAMA

2.2 二輪車モデル

制御系設計を行うため二輪車モデルとして MBD である IPG Motorcycle Maker を用いた。モデル概要を図 2 に示す。ばね上操舵系、前後タイヤ、エンジンを含む後部ボディ、リアサスペンション及びスイングアーム、ライダーの 6 要素から成り立つ。外力として重力、空気抵抗と揚力、前後輪荷重とした。入力値として各要素の重心点座標及び慣性モーメント、サスペンションのバネとダンパ特性、タイヤ特性を与えた。

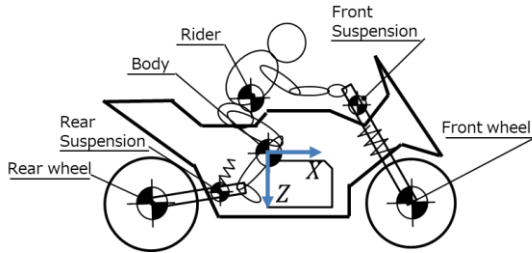


Fig. 3 Vehicle model using MBD

3 二輪車の定常円旋回特性

二輪車の運動特性を把握するため、第一段階とし定常特性に着目し、次に動的特性の解析を行う。ここでは二輪車の定常円旋回特性を把握するため運動状態を仮定し、ステア特性及び横すべり特性を導出する。二輪車の運動を表現する座標系は右旋回時にロール角及びヨーレイト、横力が正となるように SAE 座標系を用いる。図 4 に座標系及び各力・応答を示す。図 3 において路面と X-Y 平面が平行となるように慣性座標系を 0-X, Y, Z とし設定し、原点を重心点に固定した動座標系を o-x, y, z とする。次に方程式を立てる上での仮定を示す。

- ・各角度は比較的小さくタイヤ力は線形化が可能。
- ・ライダーの乗車姿勢はリーンウィズ
- ・旋回中における前後方向速度は一定

定常円旋回時の力及びモーメントの釣り合いを求める。

$$\begin{aligned} m\omega v_x &= F_1 \cos \delta + F_2 \\ l_1 F_1 \cos \delta - l_2 F_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

m : 質量, v_x : 車体前後速度, δ : 実舵角, ω : ヨーレイト, l_1 : 前輪・重心間距離, l_2 : 後輪・重心間距離とする。(1) 式において各タイヤで発生する力は(2)式で示される。

$$\begin{aligned} F_1 &= K_{c1}\phi - K_{s1}\alpha_1 \\ F_2 &= K_{c2}\phi - K_{s2}\alpha_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, K_{ci} : キャンバスティフネス, K_{si} : コーナリングスティフネス, α_i : タイヤ横すべり角, ϕ_i : タイヤキャンバ角であり, $i = 1$ を前輪, $i = 2$ を後輪とする。

次に前後輪の横すべり角 $\alpha_{1,2}$ は重心点横すべり角 β を用いて (3)式で示される。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \beta + l_1 \omega / v_x - \delta \\ \alpha_2 &= \beta - l_2 \omega / v_x \end{aligned} \quad (3)$$

次にリーンウィズ走行におけるロール角 ϕ は遠心力と重力の関係から(4)式で示される。

$$\phi = \tan^{-1}(m\omega v_x / mg) \cong \omega v_x / g \quad (4)$$

以上(2)(3)(4)式を(1)式へ代入し整理する。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} K_{s1} & -(K_{s1} + K_{s2}) \\ K_{s1}l_1 & K_{s2}l_2 - K_{s1}l_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \beta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \left(m - \frac{K_{c1} + K_{c2}}{g}\right)v + \frac{K_{s1}l_1 - K_{s2}l_2}{v_x} \\ \frac{K_{c2}l_2 - K_{c1}l_1}{g}v + \frac{K_{s1}l_1^2 + K_{s2}l_2^2}{v_x} \end{bmatrix} \omega \end{aligned} \quad (5)$$

この(5)式は定常円旋回を行う二輪車のつり合い式である。ここでステア係数 K_δ 及び横すべり係数 K_β を式(6)として定義する。

$$\begin{aligned} K_\delta &= \frac{mg(K_{s2}l_2 - K_{s1}l_1) + (K_{c2}K_{s1} - K_{c1}K_{s2})l}{gK_{s1}K_{s2}l^2} \\ K_\beta &= \frac{K_{c2}l - l_1mg}{gK_{s2}l_2l} \end{aligned} \quad (6)$$

ステア特性及び横すべり特性は二輪車の操縦性・安定性を議論する上最も重要な特性である。

これらの式から実舵角 δ を求めると(7)式で示される。

$$\delta = \frac{l}{R}(1 + K_\delta v_x^2) \quad (7)$$

ここで、幾何学的な実舵角 δ_0 は式(8)式で与えられる。

$$\delta_0 = \tan^{-1} \frac{l}{R} \cong \frac{l}{R} \quad (8)$$

以上より、幾何学的操舵角に対する速度ごとの操舵角の比は(9)式で与えられる。

$$\frac{\delta}{\delta_0} = 1 + K_\delta v_x^2 \quad (9)$$

同様に、横すべり特性について示す。(5)(6)式から横すべり角 β を求めると(10)式が与えられる。

$$\beta = \frac{l_2}{R}(1 + K_\beta v^2) \quad (10)$$

ここで幾何学的な横すべり角 β_0 は(11)式で与えられる。

$$\beta_0 = \tan^{-1} \frac{l_2}{R} \cong \frac{l_2}{R} \quad (11)$$

以上より、幾何学的横すべり角に対する速度ごとの横すべり角の比は(12)式で与えられる。

$$\frac{\beta}{\beta_0} = 1 + K_\beta v_x^2 \quad (12)$$

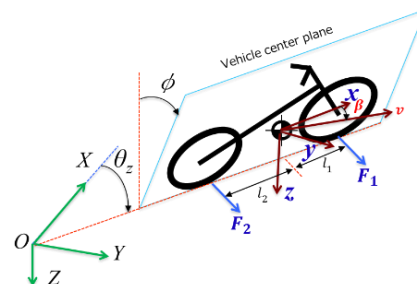


Fig. 4 Motorcycle model

4. 定常円旋回試験

車両の定常円旋回特性を把握するため、定常円旋回試験を行った。以下に計測車両、実験結果を示す。

4.1 計測車両と計測方法

定常円旋回時のライダー入力及び車両応答を計測するため計測車両を構築した。計測車両の概略図を図5に示す。計測項目はライダーの入力として操舵角、操舵トルク、シートz軸方向反力及びx, y軸周りモーメント、リーン角を計測した。車両応答として前後・横方向加速度、ヨー・ロール・ピッチ角度及び角速度、走行軌跡を計測した。

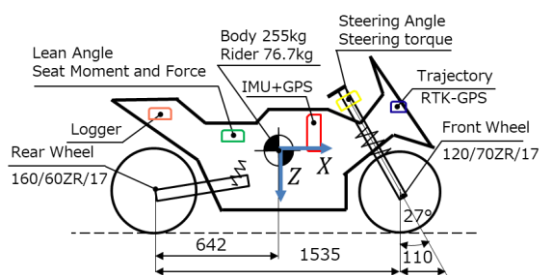


Fig. 5 Instrumental vehicle

4.2 実験内容

実験は半径 80m の部分定常円旋回、速度一定 (40～60km/h)、乗車姿勢はリーンウィズの右旋回で行った。

4.3 解析手順

図6に45km/h時の走行データ(前後・横速度、操舵角、ヨーレート)を示す。運動状態はSAE座標を用いた。IMU及びGPSセンサ(以下、慣性GPSセンサ)はIMUによる加速度及び角速度データをGPSによる位置データを用いて前後・横速度を求めている。横速度は重心点へ座標変換を行い重心点における横すべり角は前後・横速度から算出した。定常区間にはGPSによる走行軌跡から円旋回の頂点付近2秒間を使用し、エンジンや路面からの振動ノイズをカットするため5Hzのローパスフィルタ処理を施した。ここで示した前後・横速度、操舵角、ヨーレートは定常区間で一定となっていることがわかる。また、二輪車は旋回中、大きなロール角をもつため車体センタを路面に垂直な軸に変換するためピッチレイトを用いてヨーレイトの座標変換を行った。定常区間で各データの平均値をとり、ヨーレートと前後速度の関係から定常区間における旋回半径を求め、旋回半径が一定となる走行のみを解析に用いた。

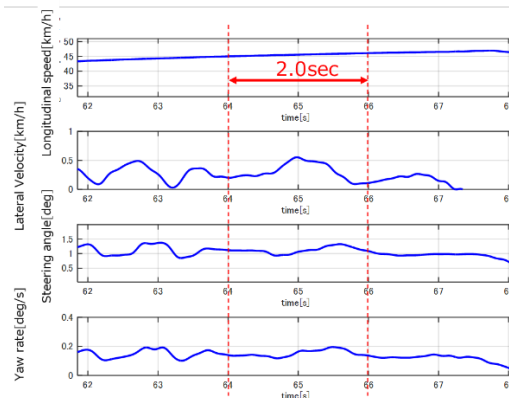


Fig. 6 Experimental data in steady

4.4 MBDを用いたシミュレーション

2.2で説明した二輪車モデルの定常状態における再現性を把握するためシミュレーション上で実車実験と同様に定常円旋回試験を行い定常円旋回特性を求める。

4.5 実験結果

二輪車モデルの定常特性を把握するため、実車実験とシミュレーションの解析結果を比較する。定常区間におけるライダー入力及び車両状態を次に示す。図7に操舵角と前後速度、図8に横すべり角と前後速度、図9に操舵トルクと前後速度を示す。

操舵角に関しては実験値とシミュレーションとでばらつきが小さく、共に旋回速度が増加すると舵角が減少する傾向にあることが図からわかる。重心点横すべり角に関しては速度増加と共に増加する傾向が見られるが実験値とシミュレーションとで傾きが異なる。

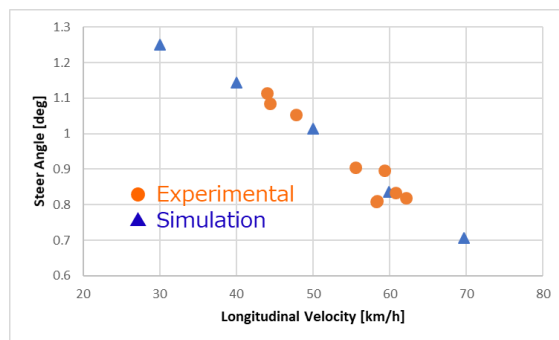


Fig. 7 Experimental and simulation steering angle

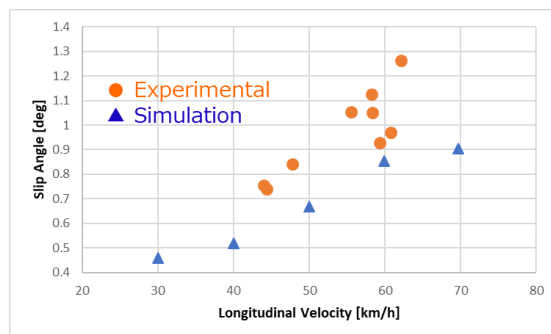


Fig. 8 Experimental and simulation slip angle

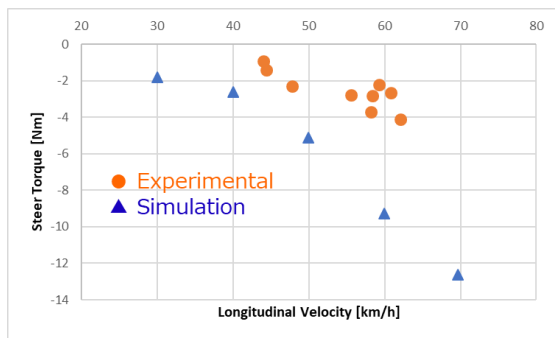


Fig.9 Experimental and simulation steer torque

6. 運動特性の比較検討

実車実験とシミュレーションによるデータから二輪車の定常円旋回特性であるステア特性及び横すべり特性、補舵トルク特性を求め、比較検討を行う。

6.1 ステア特性及び横すべり特性

定常円旋回時の操縦性の指標であるステア特性を求める。(9)式よりステア特性は横軸に速度の二乗 v_x^2 、縦軸に速度ごとの実舵角を幾何学的な実舵角で除した値 δ/δ_0 をとったグラフの傾きになる。図10に横軸に速度の二乗 v_x^2 と縦軸に速度ごとの実舵角を幾何学的な実舵角で除した値 δ/δ_0 の関係を示す。近似線は最小二乗法により求めた。同様に横滑り特性を求める。(12)式より横すべり特性は横軸に速度の二乗 v_x^2 、縦軸に速度ごとの横すべり角を幾何学的な横すべり角で除した値 β/β_0 をとったグラフの傾きになる。図11に v_x^2 と β/β_0 の関係を示す。表1に実験値とシミュレーションの K_δ, K_β を示す。

図10及び表1よりステア特性は共にオーバーステアの傾向にある。これより、車両は速度増加と共に旋回内側へ切り込む特性をもつ。一方、図11及び表1より横すべり特性は共に負の傾きをもつが、速度増加と共にばらつきが生じることがわかる。

6.3 補舵トルク特性

図12より操舵トルクに関しては速度増加と共に増加する傾向が見られる。これは旋回特性としてオーバーステアをもつ車両の舵角を保つようにライダは抑えるため補舵トルクを与えていると考えられる。しかし、実験値の補舵トルクは小さく60km/h時で-4Nmを示し、シミュレーション値は-9Nmを示し、大きな差が見られる。これら特性の差異は、二輪車モデルを構築する際にタイヤ特性を正確に表現できていないこと、サスペンションの剛性を考慮していないこと、またテストライダとシミュレーション内ライダの制御動作の違いが起因していると考えられる。

7. 結 語

本研究ではライダロボットのベースとなる車両の旋回特性を走行実験及びMBDを用いたシミュレーションより求め比較検討を行い、以下の結論を得た。

- ・ステア特性は共にオーバーステアを示し、二輪車モデルの有用性が示唆された。
- ・横すべり特性及び補舵トルクに関しては速度増加と共に顕著なばらつきが見られたため、MBD内に含まれるパラメータを計測する必要がある。
- ・今後はライダ入力と車両応答に着目し、MBDヘライダの制御モデルを組み込みシミュレーションを行う。

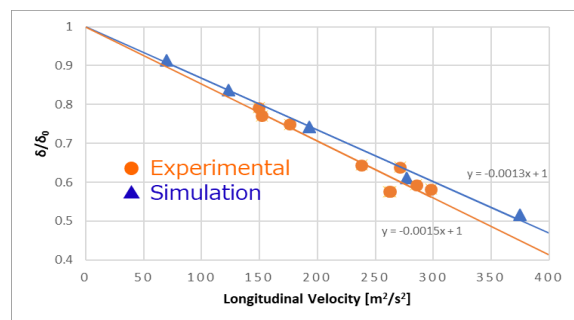


Fig.10 Steer characteristic

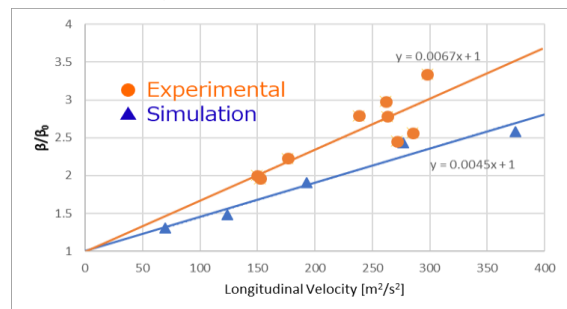


Fig.11 Side slip angle characteristic

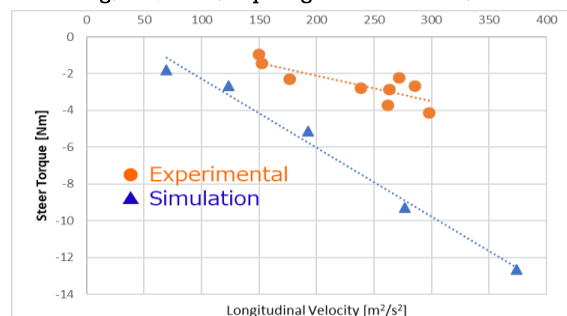


Fig.12 Steer torque characteristic

Table.1 Steer and side slip coefficient

	Stability Factor[s ² /m ²]	Side slip coefficient[s ² /m ²]
Experimental	-1.5×10^{-3}	6.7×10^{-3}
Simulation	-1.3×10^{-3}	4.5×10^{-3}

「参考文献」

- 1) 景山一郎：二輪車の運動特性とその評価手法に関する研究-第一報 定常円旋回の基礎特性について、自動車技術会前刷集 No. 150-07, p13-18 (2007)