

二輪車の運動とタイヤ特性に関する研究

日大生産工(院) ○鈴木 隆之 日大生産工 景山 一郎

1 まえがき

二輪車の運動に対する検討を行う場合、定常特性と動特性を考える必要がある。しかしながら近年の二輪車の運動解析の現状は、Sharpにより示された3つの基本モード(キャプサイズ、ウィーブ、ウォップル)が不安定特性を有することから非常に重要視されており、研究論文においてもこの3つの基本モードに関連するものが多い。しかし一般にライダーが操縦を行う場合、近年の二輪車では極低速時以外の振動モードは大きな問題となることがほとんど無くなってきている。また一般のライダーが感じる二輪車の問題としてステア特性や横すべり角特性、保舵特性などの車両運動特性との関係が強いと考えられる。

そこで、本研究では定常円旋回試験より得られた車両運動特性をもとに二輪車の運動解析を行うことを目的とする。

2 定常円旋回運動

本節より二輪車の運動について述べるが、まず定常状態と過渡状態について簡単に説明する。

ステップ状入力(自動車では操舵角)を入れた場合を考える。入力が一定にも関わらず、出力(自動車では横すべり角、ヨーレート、横向加速度など)がすぐには一定状態にはならない。入力に変化しないにも関わらず時間とともに出力の値が変化する領域を過渡状態といい、出力が一定値に達した以後を定常状態という⁽²⁾。本論文では定常状態時の値を用い過渡状態を含めた解析を目的とする。

2.1 定常旋回試験

四輪車において定常円旋回時の特性は、ステア特性により現され、操縦性・安定性を論じる上で最も重要な特性の一つと考えられる。

ステア特性とは、半径一定の円周上で、車速を段階的に変化させて走行した場合、舵角がどのように変化するか、または一定舵角で車速を段階的に変化させた場合に旋回半径がどのように変化するか注目したものである。

前述したように定常円旋回試験には、

① 半径一定円旋回

② 舵角一定円旋回

の二通りの試験法がある。四輪車の場合、試験状況や目的に応じて適した試験法を選択し実施する。しかし二輪車の場合、四輪車と異なり保舵角固定の円旋回を行うことができない。そこで旋回半径一定の定常円旋回試験を行う。また定常円旋回試験を行う場合、円を作成し定常円旋回試験を行う方法と円弧による部分定常円旋回試験法がある。前者の場合には旋回半径に応じた広い試験場所を必要とし走行速度が制限されてしまう。二輪車の場合、旋回中の速度の影響を受けるため、広い速度範囲で計測を行う必要があり、また実際の道路における特性を計測する上でも高い速度域での旋回特性が必要となる。後者の場合は、通常試験路の直線部分に設置することができ、さらに円弧の大きさによっては高速域まで行うことができるため、広い速度域での旋回特性を計測できる。そこで本研究では、円弧による部分定常円旋回試験法を採用した。

2.2 試験車両および計測項目

(1) 試験車両

国産900ccの大型二輪車を用いた。車両諸元を表1、試験車両を図1に示す。

Table 1 Specifications of experimental motorcycle

Overall Length	2030mm
Wheel Base	1405mm
Weight	2207.3N
Front Wheel Weight	1069.3N
Rear Wheel Weight	1138.0N
Caster Angle	24deg
Trail Length	90mm
Front Tire Size	130/70ZR16M/C(61W)
Rear Tire Size	180/55ZR17M/C(73W)

Study on Tire Characteristics for Two-Wheel Vehicle behavior

Takayuki SUZUKI and Ichiro KAGEYAMA



Fig.1 Overview of experimental motorcycle

(2) 計測項目

図2に車両の座標系を示す。図中の o -xyz は原点を車両重心点においた車両固定座標系であり、計測器はこの座標系に固定されている。これに対して O - $x_G y_G z_G$ は原点を車両重心点に固定し、 $x_G y_G$ 平面を水平面とする座標系である。二輪車の場合、入力を正とした場合の力の発生方向等が正となるように取り扱う為に、SAE 座標系を用いる。また以下に記述する計測された各値は、 O - $x_G y_G z_G$ 座標系に座標変換しこの座標における運動として扱う。

表2に計測項目および計測装置を示す。操舵角はステアリングシステム上に設置し、SAE 座標系に合わせ右側を正とする。光ファイバジャイロは車体センタ付近での計測を意識して、ガソリタンク上部に設置した。また車両速度は、磁気ピックアップより計測した速度と RTK-GPS より計測した速度を用いる。これは、二輪車が大きくロールすることによりタイヤ回転半径が変化し速度に影響がでるため本実験では、RTK-GPS より求めた速度を用いる。

(3) 試験コース及び試験条件

幅 30m の直線コース上に、半径 50m の部分定常円を規定したコースを作成した。表3に求めた各速度における目標ヨーレート、横向加速度、ロール角を示す。

また二輪車においてはライダーの乗車姿勢が大きく影響するためリーニウィズとする。

2.2 試験結果

図3は、速度 40km/h おける定常円旋回時の速度、ヨーレート、横向加速度、ロール角を示す。この図をみると、約 5~10 秒の間が定常円旋回を行っていることがわかる。定常円旋回中のヨーレート、横向加速度、ロール角をみるとそれぞれ約 11(deg/sec)、0.2(G)、15(deg)となり表3の 40km/h 時の各値と近いことがわかる。各速度においても理論値と近い値を示しており、よってこの定常円旋回中の値を用いてステア特性を求めていくことにする。

3 準定常解析

3.1 定常円旋回時の釣り合い式⁽²⁾

- タイヤ幅を考慮しない。
- 駆制動力、転がり抵抗を考慮しない
- 空気抵抗を考慮しない。

- 舵角は路面舵角として扱う。
- 前輪キャンバ角は後輪と同一とする。
- 前後タイヤにはコーナリングフォース F_s とキャンバスラスト F_c のみが発生するものとする。

これより、定常円旋回時の釣り合い式が求められる。

$$m\omega v = F_1 \cos \delta + F_2$$

$$l_1 F_1 \cos \delta - l_2 F_2 = 0 \tag{4}$$

ここで前後タイヤを線形域で扱うと下記となる。

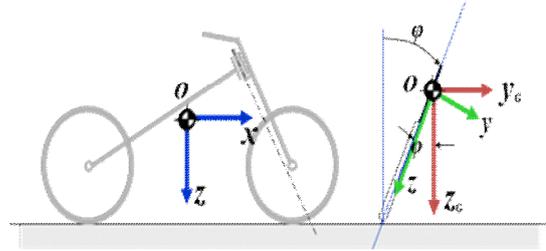


Fig.2 Coordinate system

Table 2 Measurement Item

Measurement Item	Sensor
Steer angle	Contactless Position Sensor
Angles and Angular velocities for Yawing, Rolling, Pitching	Fiber Optic Gyro
Accelerations for 3 directions (x, y, z)	Fiber Optic Gyro
Vehicle speed	Magnetic Pickup
Vehicle Position (x, y)	RTK-GPS

Table 3 Experimental parameter

Vehicle speed (km/h)	30	40	50
Yaw rate (deg/sec)	9.5	12.7	15.9
Lateral Acceleration (G)	0.14	0.25	0.39
Roll Angle (deg)	7.99	14.1	21.5

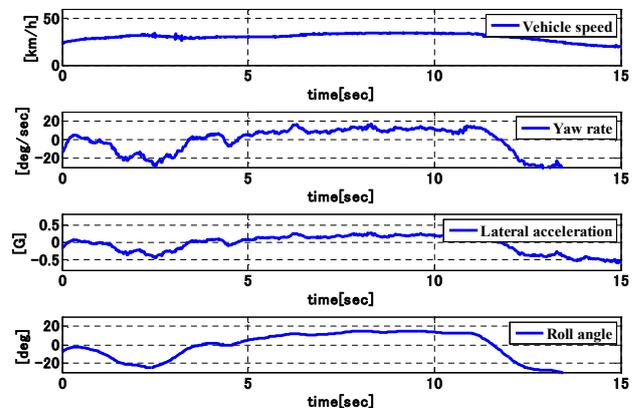


Fig.3 Steady state turning test

$$\begin{aligned} F_1 &= K_{c1}\phi - K_{s1}\alpha_1 \\ F_2 &= K_{c2}\phi - K_{s2}\alpha_2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで式(5)を式(4)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} K_{s1} & -(K_{s1} + K_{s2}) \\ K_{s1}l_1 & K_{s2}l_2 - K_{s1}l_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \beta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \left(m - \frac{K_{c1} + K_{c2}}{g}\right)v + \frac{K_{s1}l_1 - K_{s2}l_2}{v} \\ \frac{K_{c2}l_2 + K_{c1}l_1}{g}v + \frac{K_{s1}l_1^2 - K_{s2}l_2^2}{v} \end{bmatrix} \omega \end{aligned} \quad (9)$$

前節で述べたように二輪車は保舵角固定の旋回を行うことができない。そこで式(9)のヨーレイト ω を $\omega=v/R$ と置き換え、旋回半径を一定として整理すると次式が求められる。

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

ここで、右辺第一項は旋回半径が規定された場合の幾何学的操舵角となる。

そこで、これを $\delta_0=l/R$ として整理すると次式が得られる。

$$\frac{\delta}{\delta_0} = (1 + K_\delta v^2) \quad (11)$$

これは四輪車で規定される定常円旋回特性と一致し、 K_δ はスタビリティファクタと呼ばれ、次式で定義される。

$$K_\delta = \frac{m(K_{s2}l_2 - K_{s1}l_1)}{K_{s1}K_{s2}l^2} + \frac{K_{c2}K_{s1} - K_{c1}K_{s2}}{gK_{s1}K_{s2}l} \quad (12)$$

3.2 準定常解析

式(11)を用いて実際の路面舵角 δ と速度 v より幾何学的操舵角 δ_0 を求める。 $\omega=v/R$ の関係より幾何学的旋回半径 R_0 を求める。この幾何学的旋回半径を用いて以下の式より旋回半径を求める。

$$R = \frac{l}{\delta}(1 + K_R v^2) \quad (13)$$

ここで K_R は、式(6)を旋回半径について解くと式(14)になり、式(9)の K_δ と同一のため K_δ の値を用いる。

$$K_R = \frac{m(K_{s2}l_2 - K_{s1}l_1)}{K_{s1}K_{s2}l^2} + \frac{K_{c2}K_{s1} - K_{c1}K_{s2}}{gK_{s1}K_{s2}l} \quad (14)$$

ここで得られた旋回半径と計測してきた速度より $\omega=v/R$ を用いて準定常モデルのヨーレイトを求める。また式(2)、式(3)を用いて同様に準定常モデルのロール角と横向加速度を求める。

3.2 ステア特性

二輪車のステア特性を求めるために図4に操舵角と速度の二乗の関係を示す。この図において速度ゼロが幾何学的操舵角 δ_0 となる。この定常円旋回時の $\delta_0=3.86(\text{deg})$ となる。この値

を用いて各速度における操舵角を除して、無次元化したものを図5に示す。図5より、ほぼ直線な関係になることからこの傾きをスタビリティファクタ K_δ とし最小二乗法により一時近似した値は、

$$K_\delta = -5.2 \times 10^{-3}$$

となる。この値を用いてヨーレイト、横向加速度、ロール角を求める。

3.3 準定常解析

図6、図7、図8は旋回半径50mにおいて各速度30、40、50km/hにおけるヨーレイト、求心加速度、ロール角の計測された値と準定常モデルより求めた値を示す。

図6において約8~15秒の間が定常円旋回中となる。定常円旋回中は、実験値とモデルの波形が非常に似ていることがわかる。但し、0~8秒の定常状態なる前と15秒より後の部分定常円コースを抜けた辺りは、波形にずれがあることがわかる。

同様に図7も同じような現象となっており0~4秒間と12秒より後が実験値とあっていないことがわかる。

図8は、約4~8秒が定常円旋回中であるが、図6、図7と異なり実験値とモデルとが異なっていることがわかる。これは速度が高くなることにより非線形性が強くなり線形領域から外れてしまい異なっている。

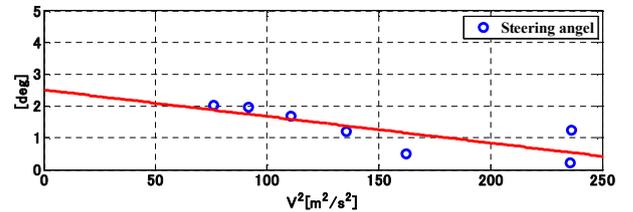


Fig.4 Steer angle against forward velocity

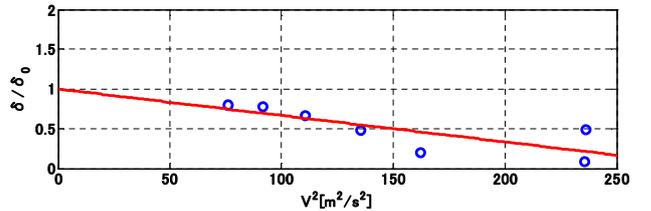


Fig.5 Steer angle ratio against forward velocity

図9が非線形領域を含めた操舵角と速度の二乗の関係を示す。この図を見ると150(m²/s²)より高い速度域が特に非線形性が強く出ていることがわかる。また高い速度において求心力に対してキャンバラストのみで補えなくなり操舵角によるコーナリングフォースで補うため操舵角が増加していることがわかる。また低速域で操舵角のバラつきがあるが、これはフロントフォークのねじれやガタによりバラつきがあると思われる。

5. 結論

本研究では、二輪車の基本的な特性である定常円旋回試験より得られた車両運動特性をもとに二輪車の運動解析について扱ったものである。

結果として定常円旋回試験より得られたステア特性をもとにヨーレイト、横向加速度、ロール角を求められることが分かった。しかしながら速度が高くなり非線形性が強くなると実験値とモデルが合わなくなることがわかった。

今後の展望として非線形領域の表現ならびに定常特性から過渡特性の表現を行い、二輪車の運動特性の解析を行う必要がある。

参考文献

- (1) 安部正人, 自動車の運動と制御(第2版), 山海堂, 1992.
- (2) 景山克三他, 自動車力学, 理工図書 1984.
- (3) 景山一郎, 二輪車の運動特性とその評価指標に関する研究, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷り集, 2007, 150-07, P13-18.
- (4) 富松正浩, 景山一郎, 二輪車のタイヤ特性と運動解析に関する研究, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷り集, 2007, 150-07, P19-12.

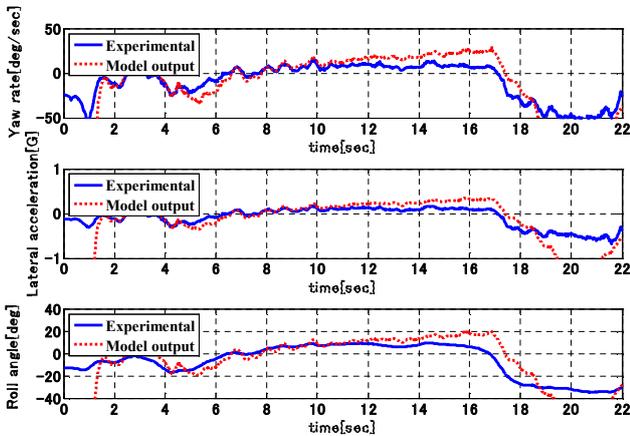


Fig.6 Vehicle Speed (30km/h)

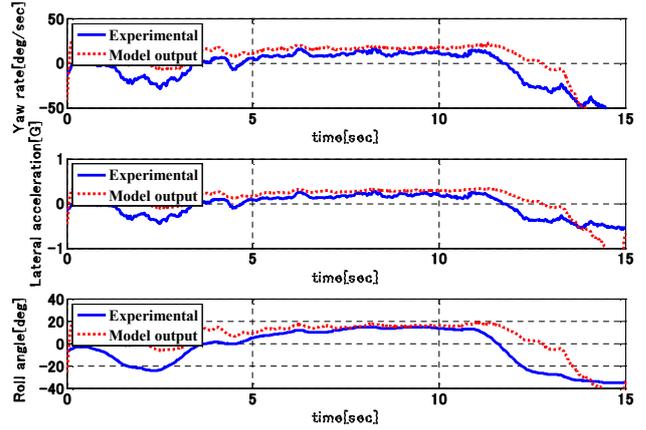


Fig.7 Vehicle Speed (40km/h)

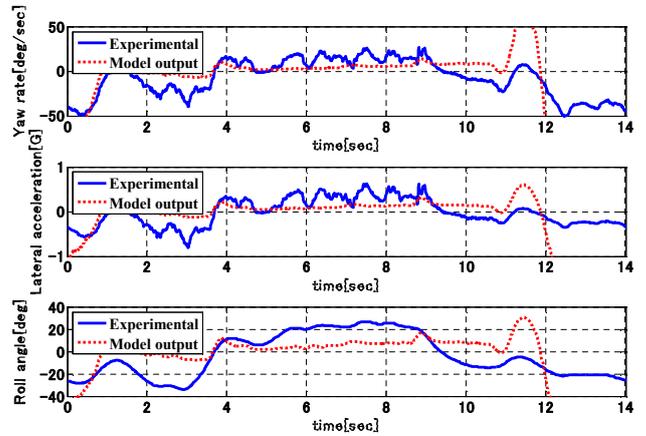


Fig.8 Vehicle Speed (50km/h)

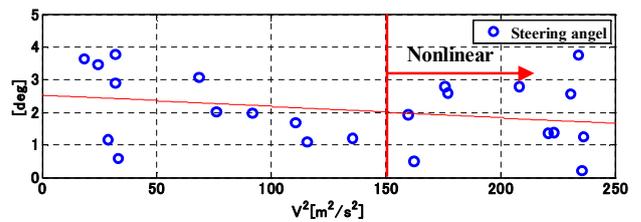


Fig.9 Steer angle against forward velocity (Nonlinear)