リアルタイムシミュレーションを用いた 3 輪および 2 輪バイクの乗車実験

山内 克哉^{*1}, 中川 智皓^{*2}, 新谷 篤彦^{*2}

Real-time simulation experiments of a three wheeled vehicle and motorcycle

Katsuya YAMAUCHI^{*1}, Chihiro NAKAGAWA^{*2} and Atsuhiko SHINTANI^{*2}^{*1,*2} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

Received: 18 December 2020; Revised: 27 January 2021; Accepted: 15 February 2021

Abstract

As a new means of transportation for short and middle distance, personal mobility vehicle (PMV), which is one or two-seater and has high environmental performance, is recently being developed. It is because many people drive a car when they travel a short distance alone, that is inefficient in cost and space. One of the PMVs which is recently gathering attention is three-wheeled vehicle with leaning mechanism. Leaning mechanism, which gives tires degree of freedom, has an effect of stable cornering in the case of short tread width vehicle. For this reason, this vehicle has two advantages, compact and stability. We research on the vehicle which has two front wheels and one rear wheel. We derived equation of motion by referring to Sharp's 4 DOF two-wheeled vehicle model, and carried out the numerical analysis to compare three-wheeled vehicle and two wheeled vehicle. However, it's difficult to find out driver's sensuous difference between three-wheeled and two-wheeled vehicle by only numerical analysis. Then, we conducted the real-time simulation experiments and questionnaires, search on that difference. Through that experiments, three-wheeled vehicle needs large steering torque and drivers feel sense of security, but steering is difficult when the vehicle speed is fast. On the other hand, two wheeled vehicle needs small steering torque and large output, so drivers steer constantly for maintenance of slalom running.

Keywords : Personal mobility vehicle, Leaning mechanism, Real-time simulation

1. 緒 言

近年、短・中距離用の新しい移動形態として、パーソナルモビリティ・ビークル (PMV) と呼ばれる 1, 2 人乗りの小型車両の開発が世界中で進められている。その背景として、自動車利用における少人数短距離移動の割合が高く (国土交通省都市局・自動車局, 2014), エネルギー効率やスペース効率に関してコストパフォーマンスが悪いことが挙げられる。個人用のモビリティとしてバイクがあるものの、事故に対する懸念など (自動車工業会, 2018), 様々な理由から自動車の代替品には至っていない。このような事情から、近年注目されている PMV の一つに、リーン機構を有する 3 輪 PMV, 海外では Narrow Tilting Vehicle (NTV) や Narrow Tilting Three Wheeled (NTTW) と呼ばれるモビリティがある。リーン機構とは、タイヤや車体に自由度を持たせることで、3 輪や 4 輪車であっても、バイクのように旋回時に左右に倒れこむことができる機構である。車体が倒れることで重心が内側に入り、遠心力を相殺させるため、3, 4 輪モビリティの車幅を狭くしても安定して旋回できる。すなわち、リーン機構により車両をコンパクトにできる。特に 3 輪の場合は、静的安定性があり、4 輪と比べて重量や占有面積を小さくできるというメリットを持つ。図 1 に、代表的な 3 輪 NTV を示す。図 1(a) はトヨタ自動車の i-road (トヨタ, 2020), 図 1(b) はイタリア piaggio 社の MP3 (Piaggio, 2020) である。これらのモビリティは試作機やシミュレータによる実験 (廣瀬他, 2015) (原口他, 2019), 数値解析による研究 (Sponziello et al., 2008) が行われている。

No.20-00443 [DOI:10.1299/transjsme.20-00443], J-STAGE Advance Publication date : 25 February, 2021

^{*1} 学生員, 大阪府立大学大学院 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)^{*2} 正員, 大阪府立大学大学院

E-mail of corresponding author: chihiro@me.osakafu-u.ac.jp

本研究では、前2輪のNTVを対象に解析を進めている。Sharpの4自由度モデルを参考に3輪NTVの運動方程式を導出し、数値解析やシミュレーションを通して2輪バイクとの比較を行っている。数値上では3輪NTVと2輪バイクには違いが見られるものの、この違いだけでは、乗り心地や操縦性といった操縦者の感覚に生じる違いを判断するのは難しい。そこで本稿では、VRを搭載したリアルタイムシミュレーションを用いた乗車実験を行うことで、操縦者の感覚的な違いを調査した。3輪と2輪バイクの運動方程式をシミュレータに組み込み、実験を行い、アンケートを取得することで比較を行った結果を示す。

Fig. 1 3-wheeled mobilities with leaning mechanism. These mobilities have compact tread width and static stability thanks to lean mechanism.

2. モデルと運動方程式

2・1 モデルの概要

図2に、本研究で対象とするリーン機構を有する3輪PMVのモデルと概略図を示す。図2(a)のモデルに対し角変位や重心を示した概略図が図2(b)である。フロントフレームがタイヤ、操舵機構、タイヤと車体を繋ぐアームで構成され、それが車体の左右に取り付けられている。車体とタイヤを繋ぐアームが、車体部のジョイント A_L 、 A_R を中心に y 軸周りに回転することで、リーンすることができる機構となっている。

Fig. 2 The models of 3-wheeled mobility with leaning mechanism. This model has arms for right and left tires, respectively. In (b), the symbols $\psi, \phi, \epsilon, \delta$ are angles (yaw, roll, caster, and steer, respectively). Furthermore, the symbols θ_y is angle of the lean mechanism.

2・2 Sharpの4自由度モデル

バイクの基礎的な論文に、Sharpの4自由度モデル(Sharp, 1971)がある。この論文では車両をフロントフレームとリアフレームの2つに分け、それぞれの重心の運動エネルギーや位置エネルギーからラグランジュの運動方程式より式を導出する。以下に運動方程式導出の概要と仮定を示す。

- 自由度は、横滑り (y_1)、ヨー角 (ψ)、ロール角 (ϕ)、操舵角 (δ) の4つ。

- 座標系は、進行方向を x_1 、鉛直下向きを z_1 とする右手系である。
- 前進速度（車体基準点 A の x_1 方向速度）は一定とし、点 A は z_1 方向に速度を持たない。
- 座標変換は、ヨー方向（ ψ ）、ロール方向（ ϕ ）、キャスタ角（ ϵ ）、操舵方向（ δ ）の順番に行う。
- 重心は y 軸方向に偏心がない。
- タイヤにかかる力はタイヤ横力と垂直抗力とし、転がり抵抗は小さいとして無視する。
- タイヤ横力は横滑り角とキャンバ角より導出する。
- 角変位は小さいものとし、線形近似を行う。

本研究では、さらに以下の仮定を加え、Sharp の 4 自由度＋リーン機構回転角の 5 自由度の運動方程式を構築した。実際の式は次節に示す。

- リーン機構回転角を自由度に加える。
- ロール回転軸はトレッド幅の中央に位置する。
- タイヤをばねダンパ系と仮定し、タイヤが変形から戻ろうとする力を垂直抗力とみなす。

2・3 運動方程式

導出した運動方程式を以下に示す。Sharp の 4 自由度モデルとの違いは以下の通りである。フロントフレームが 2 つになったことで、係数に 2 が現れた。さらに、前 2 輪にしたことで、トレッド幅の半分の長さ t_f の項や、垂直抗力の差によるモーメントの項が発生している。また、フロントフレームが y 軸回転するため、回転角 θ_y の項や y 軸回転の慣性モーメント I_{fy} の項、アームの回転軸とトレッドの距離 l_b の項が発生した。これら新たな項に下線を付加して示す。

- ・車体横方向

$$(2M_f + M_r)(\ddot{y}_1 + \dot{x}_1\dot{\psi}) + 2M_fk\ddot{\psi} + (2M_fj + M_rh)\ddot{\phi} + 2M_fe\ddot{\delta} - 2Y_f - Y_r = 0 \quad (1)$$

- ・ヨー方向

$$\begin{aligned} 2M_fk\ddot{y}_1 + 2(M_fek + I_{fz} \cos \epsilon)\ddot{\delta} - 2\frac{i_{fy}}{R_f} \sin \epsilon \dot{x}_1\dot{\delta} + \{2M_fjk - C_{rxz} + 2(I_{fz} - I_{fx}) \sin \epsilon \cos \epsilon\}\ddot{\phi} \\ - \left(2\frac{i_{fy}}{R_f} + \frac{i_{ry} + \lambda i}{R_r}\right)\dot{x}_1\dot{\phi} + \{2M_f(k^2 + \underline{t_f^2}) + I_{rz} + 2I_{fx} \sin^2 \epsilon + 2I_{fz} \cos^2 \epsilon\}\ddot{\psi} \\ + 2M_fk\dot{x}_1\dot{\psi} + 2(M_fj_u + \underline{\frac{i_{fy}}{R_f}})\ddot{\theta}_y - 2lY_f + bY_r = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

- ・ロール方向

$$\begin{aligned} (2M_fj + M_rh)\ddot{y}_1 + 2(M_fej + I_{fz} \sin \epsilon)\ddot{\delta} + 2\frac{i_{fy}}{R_f} \cos \epsilon \dot{x}_1\dot{\delta} + (tZ_{fr} + tZ_{fl} - 2M_feg)\delta \\ + \{2M_f(j^2 + \underline{t_f^2}) + M_rh^2 + I_{rx} + 2I_{fx} \cos^2 \epsilon + 2I_{fz} \sin^2 \epsilon\}\ddot{\phi} + \{K_g \\ - (2M_fj + M_rh)g\}\dot{\phi} + \{2M_fjk - C_{rxz} + 2(I_{fz} - I_{fx}) \sin \epsilon \cos \epsilon\}\ddot{\psi} \\ + \left(2M_fj + M_rh + 2\frac{i_{fy}}{R_f} + \frac{i_{fr} + \lambda i}{R_r}\right)\dot{x}_1\dot{\psi} - 2M_fk_u t_f \ddot{\theta}_y + \underline{t_f(Z_{fl} - Z_{fr})} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

- ・操舵方向

$$\begin{aligned} 2M_fe\ddot{y}_1 + 2(I_{fz} + M_f e^2)\ddot{\delta} + K\dot{\delta} + (tZ_{fr} + tZ_{fl} - 2M_feg) \sin \epsilon \dot{\delta} + 2(M_fej + I_{fz} \sin \epsilon)\ddot{\phi} \\ - 2\frac{i_{fy}}{R_f} \cos \epsilon \dot{x}_1\dot{\phi} + (tZ_{fr} + tZ_{fl} - 2M_feg)\dot{\phi} + 2(M_fek + I_{fz} \cos \epsilon)\ddot{\psi} \\ + 2\left(M_f e + \frac{i_{fy}}{R_f} \sin \epsilon\right)\dot{x}_1\dot{\psi} + 2tY_f = \tau \end{aligned} \quad (4)$$

・ フロントフレーム y 軸回転

$$2 \left\{ M_f (j_u^2 + k_u^2) + I_{fy} - 2 \frac{i_{fy}}{R_f} h_u \right\} \ddot{\theta}_y + 2 \left(M_f j_u + \frac{i_{fy}}{R_f} \right) \ddot{\psi} - 2 M_f k_u t_f \ddot{\phi} + l_b (Z_{fr} - Z_{fl}) = 0 \quad (5)$$

・ タイヤ横力

$$\frac{\sigma_f}{\dot{x}_1} \dot{Y}_f + Y_f = C_{f1} \left(\delta \cos \varepsilon - \frac{\dot{y}_1 + l \dot{\psi} - t \delta}{\dot{x}_1} \right) + C_{f2} (\phi + \delta \sin \varepsilon) \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_r}{\dot{x}_1} \dot{Y}_r + Y_r = C_{r1} \frac{b \dot{\psi} - \dot{y}_1}{\dot{x}_1} + C_{r2} \phi \quad (7)$$

・ 垂直抗力

$$Z_{fr} = -C_t (t_f \dot{\phi} - l_b \dot{\theta}_y) - K_t (z_0 + t_f \phi - l_b \theta_y) \quad (8)$$

$$Z_{fl} = -C_t (-t_f \dot{\phi} + l_b \dot{\theta}_y) - K_t (z_0 - t_f \phi + l_b \theta_y) \quad (9)$$

3. リアルタイムシミュレーション乗車実験

3・1 リアルタイムシミュレーション

始めに、乗車実験で用いたシミュレータについて説明する。図3に、リアルタイムシミュレーションの概略図を示す。(a)はシミュレータの概略図であり、(b)はシミュレーションの流れを示している。シミュレータの車体部は既存のモータサイクルを利用し、ハンドルグリップを握る感触や車体に跨る感覚は実機のそれとほぼ同じである。操縦者からシミュレータに操舵などの入力があると、コンピュータに組み込まれている運動方程式をもとにシミュレータが動作し、車体が実際にロールなどのリアルタイムなフィードバックがある。本シミュレータでは、シミュレーションより求まる重力と旋回の合力の方向に、重力が作用するようにモーションテーブルを運動させ、疑似的に遠心力を感じるような仕組みとなっている。リアルタイムコンピューティングにはdSPACE社のDSPを用いている。計算ソフトはMatlab/Simulinkである。VR画面には、走行路が映る。顔の動きと連動して映像が変化する。すなわち、車両を前進させる入力をしているときはVR画面上でも前進しているように映像が流れるなど、視覚的なフィードバックがある。運動方程式は任意に変更可能となっており、複数のモデルを比較するのに適している。また、シミュレーション時の動作データは、コンピュータより取得可能となっている。

Fig. 3 System of real-time simulation. A rider can steer the handle. PC calculates based on the rider's input and the equation of motion. The simulator moves based on that calculation results and then a rider feels the feedback.

3・2 実験方法

本実験は、前章で示した運動方程式をリアルタイムシミュレーションに組み込み、実際にシミュレータを操作することで、操縦者の挙動や操縦時の感覚的な違いを把握することを目的としている。実験参加者に、Sharp モデル（2 輪モデル）と 3 輪モデルの 2 つで走行してもらい、その後乗り心地に関するアンケートに回答してもらった。リアルタイムシミュレーションは実験時の入出力を取得することができ、このデータとアンケートの結果を用いて比較を行う。走行コースはスラロームとし、VR 上に表示される等間隔に並ぶパイロンを躲しながら走行する。実験の条件をまとめたものを表 1 に、実験の概略図を図 4 に示す。操縦者の入力はステアトルクのみである。また、車両諸元を表 2 に示す。基本的に Sharp が解析で使用した値を用いた。

本実験の参加者は 5 名（男性 4 名、女性 1 名）であり、平均年齢 23 ± 1.2 歳、自動車の運転頻度は月に 1 回程度が 1 人で他はそれ以下である。バイクの習熟度や 3 輪と 2 輪の乗車経験の差異といった、実験参加者の事前条件の違いを減らすため、本実験ではバイク免許を所持していない人を対象とした。これに伴い、実験条件はバイク初心者でも運転しやすいように設定した。2 輪と 3 輪の固有値解析（Sponziello et al., 2008）より、遅い場合どちらも安定性が低下する。速い場合、安定性はあるものの操縦が難しくなる可能性がある。そのため、バイク初心者でも運転しやすいように車速は中速の 60km/h 程度とした。パイロン間隔に関して、本実験で用いる運動方程式は線形近似を行っているため、角度などの変数が大きくなりすぎないように車速も考慮し広めに設定した。

実験の流れを以下に示す。データは、参加者 5 人 $\times$ モデル 2 つ $\times$ 速度 3 つの計 30 個となる。

- ① 練習 （ $\times 5$ 人）
3 輪 60km/h で 1 人 10 分程度リアルタイムシミュレーションの練習
- ② 実験 1 (60km/h) ($\times 5$ 人)
2 輪 $\rightarrow$ 3 輪 $\rightarrow$ アンケート $\rightarrow$ 操縦者交代
- ③ 実験 2 （ $\times 5$ 人）
2 輪 (50km/h) $\rightarrow$ 3 輪 (50km/h) $\rightarrow$ アンケート $\rightarrow$
2 輪 (70km/h) $\rightarrow$ 3 輪 (70km/h) $\rightarrow$ アンケート $\rightarrow$ 操縦者交代

なお、本実験は、ヘルシンキ宣言に則り、想定される危険は全て事前に説明したうえで同意書による承諾を得、倫理原則に基づいて実施した。また、本実験は大阪府立大学大学院 工学研究科 研究倫理委員会の承認を得ている。

Table 1 The conditions of a riding experiment.

Item	Condition
Driving course	slalom
Distance of pylons	80 [m]
Number of pylons	40
Forward speed	50, 60, 70 [km/h]

Fig. 4 Slalom. In this experiment, the slalom frequency is about 0.1Hz.

Table 2 Parameters of Sharp model and 3-wheeled model. * shows only 3-wheeled parameter. Underline shows the parameter of one side front frame or tire in 3-wheeled model.

Parameter	Symbol	Unit	Value
Mass of front frame	M_f	kg	<u>30.6</u>
Mass of rear frame	M_r	kg	217
Front frame inertia about x	I_{fx}	kg m ²	<u>1.23</u>
Front frame inertia about y	* I_{fy}	kg m ²	<u>1.5</u>
Front frame inertia about z	I_{fz}	kg m ²	<u>0.442</u>
Rear frame inertia about x	I_{rx}	kg m ²	31.2
Rear frame inertia about z	I_{rz}	kg m ²	21.1
Rear frame product of inertia	C_{rxz}	kg m ²	1.74
Polar moment of inertia of front wheel	i_{fy}	kg m ²	<u>0.719</u>
Polar moment of inertia of rear wheel	i_{ry}	kg m ²	1.05
Gear ratio and polar moment of inertia of engine flywheel	λi	kg m ²	
Distance $G_f - G_r$ in x	k	m	0.854
Height of G_f	j	m	0.467
Distance G_f - steer axis	e	m	0.0244
Distance front tread - G_r in x	l	m	0.935
Distance rear tread - G_r in x	b	m	0.480
Height of G_r	h	m	0.616
Radius of front tire	R_f	m	0.305
Radius of rear tire	R_r	m	0.305
Distance tread - steer axis	t	m	0.116
Half of tread width	* t_f	m	0.23
Caster angle	ϵ	rad	0.4715(27°)
Front tire cornering stiffness	C_{f1}	N/rad	<u>11180</u>
Front tire camber stiffness	C_{f2}	N/rad	<u>939</u>
Rear tire cornering stiffness	C_{r1}	N/rad	<u>15840</u>
Rear tire camber stiffness	C_{r2}	N/rad	<u>1330</u>
Front tire relaxation stiffness	σ_f	m	0.24
Rear tire relaxation stiffness	σ_r	m	0.24
Steer damper coefficient	K_s	Nm s/rad	6.78
Front tire vertical spring coefficient	* K_t	N/m	<u>120000</u>
Front tire vertical damper coefficient	* C_t	Ns/m	<u>600</u>
Roll spring coefficient	* K_g	Nm/rad	100
Distance $G_f - A_{L,R}$ in x	* k_u	m	0.369
Distance $G_f - A_{L,R}$ in z	* j_u	m	0.167
Height of $A_{L,R}$	* h_u	m	0.3
Distance tread - $A_{L,R}$ in x	* l_b	m	0.45

3・3 アンケート

アンケートは、以下の3種類の質問を行った。

- I. 5段階評価 (2輪, 3輪それぞれ)
- II. 最も快適に乗れた速度条件 (2輪, 3輪それぞれ)
- III. 自由記述

Iは各速度で2つのモデルの実験が終わるごとに回答してもらい、II, IIIは全ての実験が終わった後に回答してもらった。5段階評価は、以下の乗り心地に関する質問を行った。また、図5に本実験で用いたアンケートの一部を示す。

① 操作性	5: 非常に操作しやすい 4: やや操作しやすい 3: どちらとも言えない 2: やや操作しにくい 1: 非常に操作しにくい	● 入力に関する質問 ● 自分の思った通りに操作できたか
② ハンドルの重さ	5: 非常に軽い 4: やや軽い 3: どちらとも言えない 2: やや重い 1: 非常に重い	● 入力に関する質問 ● 手に伝わる操舵時のハンドルの感触について
③ 安心感	5: 非常にある 4: 少しある 3: どちらとも言えない 2: あまりない 1: 全くない	● 出力に関する質問 ● もっとロールできそうと感じたか、転倒の恐怖心を感じたか
④ 横にふられる感じ	5: 非常にある 4: 少しある 3: どちらとも言えない 2: あまりない 1: 全くない	● 出力に関する質問 ● ロールや横方向の変位をどのくらい体で感じたか

Fig. 5 The answer column of five-grade evaluation. This is created with reference to the Likert scale.

3・4 実験結果

3・4・1 シミュレーション結果

図6～図11に、ある参加者の実験結果を示す。5人の結果は傾向が似ていたため、代表して1人分のデータを載せる。走行軌跡が比較的sinカーブに近い5周期分のデータをピックアップし、その時の角変位や角速度、ステアトルク等を表す。図6～図11はそれぞれ50, 60, 70km/hの2輪と3輪の結果を表している。また、各図の(a)～(d)は、それぞれ走行軌跡、入力(ステアトルク)とロール角、操舵角とヨーレート、入力とロールレートを示している。符号は左旋回、左ロール、左操舵が正である。実験結果より、ロール角が20[deg]程度とやや大きい角度が見られる。そこで、スラローム実験を行った論文(Cossalter and Lot, 2002)の結果と、その実験で用いた車両の諸元を用いてSharpの4自由度モデルでシミュレーションを行った結果を比較したところ、近い結果となったため、本稿ではこの実験結果をもとに話を進める。

(b)の入力とロール角をみると、2輪と3輪ともに似た傾向であることがわかる。どの速度でも入力とロール角がおおよそ1/4周期分ずれており、走行軌跡の $Y=0\text{m}$ 付近に入力のピークが、 Y の振幅のピークにロール角のピークが来ている。これは実機における2輪のスラローム実験でも見られる傾向であり (Cossalter, 2006)、2輪と3輪で、入力に対するロール角の応答は近くなると考えられる。一方、2輪と3輪の違いとして、入力の変化が挙げられる。2輪は入力が細かく変化しており、右操舵と左操舵の切替が激しい。それに対し3輪は、sinカーブの傾向が見られ、比較的滑らかに操舵していることがわかる。

(c)の操舵角とヨーレートをみると、50, 60km/hに関しては、2輪と3輪ともに同位相となった。走行軌跡と逆位相になり、こちらも実機における2輪と同じ傾向が見られた。一方70km/hでは、3輪の操舵角の周期がやや遅れた結果となった。速度が上がることで、3輪の操舵角の特性が変化する可能性が示唆された。定量的には、2輪の操舵角が大きく出ており、3輪は小さな操舵角でも十分な旋回ができていると考えられる。

(d)の入力とロール角速度では、両モデルともに同周期であった。一方振幅の大きさでは、3輪が入力に比べロールレートが小さく、3輪は2輪と比べ入力に対するロールの応答が小さくなることが確認できた。

Fig. 6 Slalom test of Sharp's model in 50km/h. Driver steer constantly.

Fig. 7 Slalom test of 3-wheeled model in 50km/h. There was no difference in phase from Sharp's model.

入力に対する応答の大きさを比較するため、RMS を用いて比較を行う。5 人分のデータに関して、走行軌跡が sin カーブに近い 5 周期分の RMS 値を出し、平均して比較する。図 12 に、入力に対するモデルの角度応答の RMS 値を示す。この図では、角度における RMS 値の平均値を入力 RMS 値で除して割合を算出している。ヨー角、ロール角ともに 3 輪モデルの値が小さい。即ち、入力に対する応答が小さく、旋回に大きな入力を要すると言える。

3・4・2 アンケート結果

表 3 に、5 段階評価のアンケート集計結果を示す。2 輪と 3 輪で比較するために、アンケートの 5 段階評価を得点とし、有意水準 5% の対応のある両側 t 検定を行った。

①操作性について、70km/h において 2 輪の方が有意に操作しやすいという結果となった。一方、60km/h では有意傾向があり、3 輪が操作しやすい傾向にあった。50km/h では有意差は得られなかったものの、こちらも 3 輪が操作しやすい回答が多い。このことから、同じモデルでも速度によって操作のしやすさが変化すると考えられる。

Fig. 8 Slalom test of Sharp's model in 60km/h. Tendency is similar to Fig. 6.

Fig. 9 Slalom test of 3-wheeled model in 60km/h. Tendency is similar to Fig. 7.

Fig. 10 Slalom test of Sharp's model in 70km/h. Tendency is similar to Fig. 6.

Fig. 11 Slalom test of 3-wheeled model in 70km/h. In (c), phase of steer delay.

Fig. 12 Ratio of RMS in output angle per input. The ratio of 3-wheeled model is smaller than that of Sharp model.

②ハンドル重さについて、70km/h において 2 輪の方が有意に軽いという結果となった。一方、50km/h では有意傾向があり、こちらも 2 輪の方が軽いという回答が多い。

③安心感について、50km/h において 3 輪の方が有意に安心感があるという結果になった。一方、70km/h では有意傾向があり、こちらも 3 輪の方が安心感があるという回答が多い。

④横にふられる感じについて、50km/h と 60km/h で有意傾向にあり、2 輪は横にふられる感じがする傾向にあった。

続いて、表 4 に最も快適に乗れた速度条件のアンケート結果を示す。どの実験参加者においても、3 輪は 2 輪より遅い速度が乗りやすいという回答となった。

Table 3 Result of questionnaire of five-grade evaluation.

Questionnaire	Model	50km/h		60km/h		70km/h	
		average	<i>p</i> -value	average	<i>p</i> -value	average	<i>p</i> -value
①Operability	2 wheels	2.8	0.11	3.4	0.070†	3.4	0.0039*
	3 wheels	4.2		4		2.2	
②Heaviness of steering	2 wheels	3.6	0.052†	3.4	0.27	3.4	0.016*
	3 wheels	2.2		2.4		1.8	
③Sense of security	2 wheels	2.2	0.0039*	3	0.14	3	0.070†
	3 wheels	4.6		4.2		4.2	
④Feeling swing laterally	2 wheels	3.4	0.088†	3	0.089†	2.4	0.70
	3 wheels	1.6		2		3.4	

* : $p < 0.05$ † : $p < 0.1$

Table 4 Result of questionnaire of choice the best velocity [km/h].

Participants	A	B	C	D	E
2-wheeled	70	70	70	60	70
3-wheeled	50	60	50	50	60

3・5 考察

前節の実験結果をもとに考察を行う。2 輪と 3 輪では、入力や操舵角の周期とロール角やヨーレートなどの周期の傾向に違いは見られなかった。一方で 2 輪の傾向として、2 輪は入力に対する応答が大きく、3 輪より小さい操舵でも十分なヨー角（旋回の大きさ）が得られている。また、アンケート結果から 2 輪は 3 輪と比べハンドルが軽く、横に振られるという意見が多い。したがって、2 輪はハンドルが軽く入力操作が楽であり、さらに応答も大きいため、一定のスラローム維持のために、図 6(b)のように細かく微調整しながら操舵していると考えられる。このように、ハンドル操作が楽なことが、逆に操縦を難しくしている可能性がある。実際、操作性のアンケートでは 60km/h では 3 輪の得点が高く有意傾向にあり、ハンドルが軽いことや、入力に対する旋回量が大きいことが必ずしも操作のしやすさには繋がらないと考えられる。

3 輪の傾向として、2 輪とは逆に入力に対する応答が小さく、旋回に大きなトルク入力を必要とする。2 輪同様アンケート結果からもその傾向は見てとれ、3 輪はハンドルが重いという意見が多い。これにより、2 輪のように微調整をしなくても旋回に必要なトルク量が把握しやすく、ステアリングトルクのグラフが比較的綺麗な sin カーブとなったと考えられる。また、アンケートでは 3 輪の方が安心感の点数が高い傾向にある。2 輪のように細かく操舵するより、ハンドルが重く入力があまり大きくならない方が、乗車時に安心感を得られる可能性がある。一方で、この 3 輪の性質が悪影響を及ぼす場合もある。操作性の質問で、70km/h では 2 輪の点数が高く、有意差も得られている。また、表 4 より全ての実験参加者で 3 輪は 2 輪より遅い速度となっており、自由回答においても、3 輪は 70km/h の場合早めに操作しないと曲がり切れないという意見があった。必要なステアリングトルクが

大きいと速度が大きいと逆に操縦が困難になってしまうと言える。加えて、図 11(c)のように、3 輪の 70km/h は 2 輪と異なる特性が見られたことから、速度が上がることで 3 輪の運動特性が 2 輪と変わり、操縦性や乗り心地に影響した可能性が考えられる。

以上より、3 輪はハンドルが重く操縦が安定し、安心感は得られるものの、速度が大きいと操縦が難しくなってしまうことがわかった。逆に速度が大きいときは 2 輪の操作性が良く快適という意見が多い。したがって、乗り心地に関して、モデルごとに適切な速度条件があることが示唆された。

4. 結 語

本稿は、2 輪バイクと 3 輪バイクにおける乗車時の感覚的な違いを比較するため、リアルタイムシミュレーションとアンケートを用いて検証した。以下に得られた知見をまとめる。

- 2 輪の場合、ハンドルが軽く入力に対する出力も大きいと、スラローム走行を維持するために細かく微調整しながら操舵していた。比較的速度が大きい (70km/h) 場合、操作しやすいという評価となった。
- 3 輪の場合、2 輪とは逆にハンドルが重く出力は小さいため、滑らかな入出力となった。また、2 輪と比べ安心感があるという結果となった。一方、速度が大きい (70km/h) 場合ではハンドルが重く操作しづらい。

今後の方針として、実験参加者の確保と実験条件の追加を検討している。本稿では 5 人分のデータを用いて比較検討しているが、より精度を上げるため実験人数を増やすことを考えている。続いて実験条件について、今回はスラロームのみ、また速度も 3 種類で実験を行ったが、今後は定常円旋回など別の走行コースや、スラロームでの速度条件をより広げての実験を検討している。

文 献

- Cossalter, V., Motorcycle dynamics, Lulu.com (2006).
- Cossalter, V. and Lot, R., A motorcycle multi-body model for real time simulations based on the natural coordinates approach, Vehicle System Dynamics, Vol.37, No.6 (2002), pp.423-447.
- 原口哲之理, 景山一郎, 金子哲也, 内傾型パーソナルモビリティビークルの急操舵時内輪浮き特性, 自動車技術会論文集, Vol.50, No.1 (2019), pp.96-101.
- 廣瀬徳晃, 津坂祐司, 清水毅, 山内智裕, 白石孝, 谷中壯弘, リーン機構を有するパーソナルモビリティのロール運動モデルと姿勢安定化制御の提案, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00087.
- 一般社団法人 自動車工業会, 2017 年度 二輪車市場動向調査 (2018).
- 国土交通省都市局・自動車局, 超小型モビリティ導入に向けたガイドライン ~新しいモビリティの開発・活用を通じた新たな社会生活の実現に向けて~ (2014).
- Piaggio, MP3 SPORT 500, available from < https://www.piaggio.com/us_EN/models/mp3-range/piaggio-mp3-sport/piaggio-mp3-sport-500hpe/>, (参照日 2020 年 09 月 18 日).
- Sharp, R. S., The stability and control of motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.13, No.5 (1971), pp. 316-329.
- Sponziello, A., Frendo, F. and Guiggiani, M., Stability analysis of a three-wheeled motorcycle, SAE International Journal of Engines, Vol.1, No.1 (2008), pp.1396-1401.
- トヨタ, TOKYO MOTOR SHOW 2019, available from < <https://toyota.jp/playtoyota/>>, (参照日 2020 年 09 月 17 日).

References

- Cossalter, V., Motorcycle Dynamics, Lulu.com (2006).
- Cossalter, V. and Lot, R., A motorcycle multi-body model for real time simulations based on the natural coordinates approach, Vehicle System Dynamics, Vol.37, No.6 (2002), pp.423-447.
- Haraguchi, T., Kageyama, I. and Kaneko, T., Inner wheel lifting characteristics of tilting type personal mobility vehicle by sudden steering input, Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Inc., Vol.50 No.1 (2019), pp.96-101 (in Japanese).

- Hirose, N., Tsusaka, Y., Shimizu, Y., Yamauchi, T., Shiraishi, T. and Yanaka, A., Proposal of motion model around roll axis and posture stabilization control for personal mobility with leaning mechanism, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 81, No.826 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00087.
- Japan Automobile Manufacturers Association, Inc., Nirinshashijodokochosa (2018) (in Japanese).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, City Bureau and Road Transport Bureau, Chokogatamobilitydonyunimuketagideline (2014) (in Japanese).
- Piaggio, MP3 SPORT 500, available from < https://www.piaggio.com/us_EN/models/mp3-range/piaggio-mp3-sport/piaggio-mp3-sport-500hpe/>, (accessed on 18 September, 2020).
- Sharp, R. S., The stability and control of motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.13, No.5 (1971), pp. 316-329.
- Sponziello, A., Frendo, F. and Guiggiani, M., Stability analysis of a three-wheeled motorcycle, SAE International Journal of Engines, Vol.1, No.1 (2008), pp.1396-1401.
- TOYOTA, TOKYO MOTOR SHOW 2019, available from < <https://toyota.jp/playtoyota/>>, (accessed on 17 September, 2020) (in Japanese).