

スマートシティに向けた三輪小型パーソナルモビリティの開発

檀上 蓮・横田 雅司¹⁾*

岡山理科大学大学院理工学研究科修士課程システム科学専攻

1) 岡山理科大学情報理工学部情報理工学科

(2024年10月31日受付、2024年12月4日受理)

1. 緒言

我が国は、本格的な高齢者社会を迎えており、高齢者ドライバーによる事故の増加や、公共交通機関の衰退等が懸念されている。自動車業界世界3位の自動車生産大国である我が国では、自動車は重要な移動手段である。日本自動車工業会の調査結果より、「国民の乗用車ユーザーの特性と使用状況」を図1に示す。主運転者の世帯ライフステージは高齢期が3割強を占めていることが確認できる¹⁾。つまり、高齢化社会が加速している我が国において、高齢ドライバーは増加しており、いくつかの懸念点がある。



図1 世帯ライフステージ【乗用車保有世帯】

また、高齢ドライバーの増加により、自動車における事故の増加が予想されている²⁾。そのため、政府は交通機関を利用することを推奨している。しかし、主要都市以外の地方では公共交通機関の整備が不十分であり、乗用車が重要な移動手段であることから普通自動車免許を返納する高齢者が少ないことが深刻な問題になっている。主要都市以外の地方に住んでいる高齢者は、日用品の買い出しの際、自宅からかなりの距離があることで、自転車や徒歩では身体的に負荷がかかるため、自家用車を手放すことができない。

前述で述べた問題を解決するため、我が国ではスマートシティという取り組みが注目されている³⁾。スマートシティとは、国土交通省によると「都市が抱える諸問題に対して、ICT等の新技術を活用しつつ、マネジメント（計画・整備・管理・運営）が行われ、全体最適化が図られる持続可能な都市または地区」と定義

される。その取り組みの一つとしてパーソナルモビリティや自転車などを用いたコミュニティサイクルがある。パーソナルモビリティは、近年日本国内では定着しつつある言葉である。パーソナルモビリティの例を以下の図3に示す。また、コミュニティサイクルは、岡山県でも図2に示す「ももちやり」というサービスが行われている。しかし、コミュニティサイクル「共有自転車」の導入は都市交通の持続可能性を向上させる目的があるが、いくつかの問題点が浮き彫りになっている。問題として、利用者が適切な場所に自転車を駐輪せずに乱雑に放置することであり、これが歩行者の通行を妨げる原因となっている。さらに、ももちやりを含むパーソナルモビリティは二輪車両であるため、段差などに躓き走行中に転倒する可能性がある。これらを解決するために開発する新たなモビリティは、折り畳みが可能で省スペースであることや、整備性の良さ、セキュリティ強化、転倒しにくい機構などを取り入れる必要がある。

また、近年諸外国では電動キックボードの普及が進んでいる。日本でも2023年7月に法改正があり電動キックボードが免許不要で公道で走行可能になった。近年、日本では一部の都市で図3に示すLuupが普及している⁴⁾。Luupは、電動マイクロモビリティのシェアリングサービスとして、2021年4月23日に小型導入された。最初のポートは約50箇所であったが、現在では1200箇所以上に増加している。電動キックボードが普及していくにつれて新たなルール整備の議論が進む中、新たな問題も浮上している。正しい走行ルールの認知向上や走行環境の整備など、解決すべき課題が挙げられる。また、Luup自体も不安定な乗り物である点やバッテリー問題などモビリティの問題があることも挙げられる。Luupの他にも三輪の電動キックボードや折り畳み式の電動キックボードも存在する。それら既存の電動キックボードでは段差を乗り越えることが、容易ではないことも課題の一つである。

本研究では、スマートシティの実現に向けて振動抑

制機能が搭載された小型パーソナルモビリティ(以下、三輪 PMV と称する)を開発し、その基本的性能や安定性、操縦性など定量的に評価する。



図2 ももちやり



図3 LUUP

2. 三輪 PMV の構成と基本特性

本研究で製作したダブルウィッシュボーン式サスペンションを用いた三輪の電動キックボードを図4に示す。一般的な電動キックボードは二輪である。さらに、既存の二輪のモビリティでは自らバランスをとる必要があり、停止時は片足つかなければならない。したがって、本装置は三輪にすることで安定化を向上させ停止時に片足をつく必要をなくすなど、バランスをとることが容易に行うことができる。また、既存の電動キックボードや、一般的な小型モビリティはバネマスダンパ系の減衰機が搭載されておらず、リジットサスである場合が多数である。本来、キックボードはタイヤが小型で地面からの振動をダイレクトに感じることができるレジャー要素が強い物が一般的である。

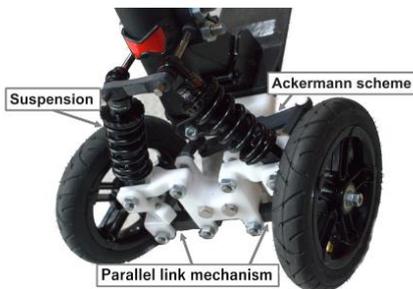
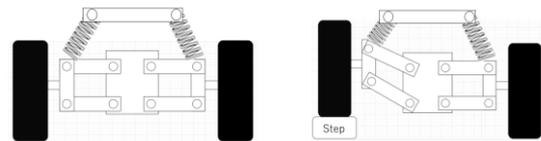


図4 製作した実機の外観

本装置には車に搭載されるダブルウィッシュボーン式サスペンション機構を採用することで、乗り心地向上を目的とした設計を行った。ダブルウィッシュボーン式サスペンションのような独立懸架システムを用いることで段差の走行時のロール角を抑制し安定性の向上をさせた。また、旋回時の車体のロール回転に対しても4節リンク変形によるタイヤの傾き角の変化が少ない利点がある⁷⁾。さらに、ダブルウィッシュボーン式サスペンションは、ほかのサスペンション機構に比べ、ジオメトリー(幾何学)の自由度が高いほか、剛性を保持しやすいなどの利点がある⁸⁾。独立懸架においては、日本の車道と歩道の段差が5cmとなってお

り、さらに、交差点などの横断歩道では2cmの段差になっている⁷⁾。本装置では歩道での走行を想定し、約5cmの段差を懸架できるように平行リンクを設計している。平行リンクを用いることでサスペンションの伸び縮みによりタイヤ片側だけ独立懸架させることが可能である。独立懸架の様子を図5に示す。



(a) 正常時 (b) 独立懸架時

図5 独立懸架のイメージ図

また、二輪電動キックボードや二輪車の多くがステアリング機構としてフロントフォーク式を用いており、タイヤを支えるフォークを回転させて車両の進行方向を変えている。しかし、本装置は三輪車両であるため、フロントフォーク式のステアリング機構を搭載することは難しい。そこで、本装置ではステアリング機構として、図6に示すようにアッカーマン機構を搭載した。



(a) 直進時 (b) 旋回時

図6 アッカーマン機構

18V バッテリーを二つ搭載しており取り外し可能である。スロットルで変化させた電圧をESP32で読み取ることによって、モータを制御する。インホイールモータのパルスからFVコンバーターを用いて速度を読み取り、速度を制御する。

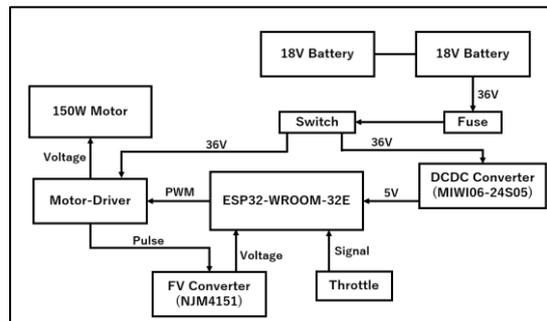


図7 システム図

3. シミュレーション

3-1 運動モデルの構築

本章では、本装置にダブルウィッシュボーン式サスペンションを搭載することで、段差の高さが車体の傾きにどれほど影響するのかを調べるためシミュレーションを行った。解析モデルを図8に示す。本装置のロール運動の簡単なモデル化を行った。各運動における変数の添え字 r, l は本装置の左右を表す。本研究では本装置の前輪二輪の左右のロール運動のシミュレーションを行った⁸⁾。概要図を図9に示す。

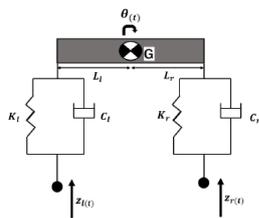


図8 解析モデル

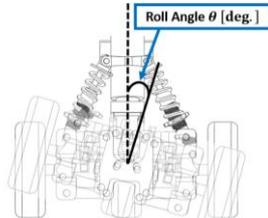


図9 概要図

本研究では運動に対する仮定を以下に示す⁹⁾。

- (1) 原点は前輪二輪の中心位置とする。
- (2) 車両を前後で切ったハーフモデルを用いて、重心を含め平面で扱う。
- (3) 水平路面に停止中の装置は左右対称とする。
- (4) 水平路面に静止状態における左右輪のキャンバ角は0とする。
- (5) 停止中に発生する応力はないものとする。
- (6) サスペンションのバネとダンパは垂直に設置されているものとする。

このモデルでは左右二つのダンパ C_r, C_l とばね K_r, K_l 、左右のタイヤ間距離 L_r+L_l とする。本装置では左右のサスペンションは同じものを使用しており、左右のタイヤ間距離も等しい。よって、ばね K_r, K_l は K 、ダンパ C_r, C_l は C とし、左右のタイヤ間距離 L_r+L_l は L とする。本装置の車体重量は m とする。重心点 G を中心とした時計回りの回転運動を考察した。ロール角を $q(t)$ 、慣性モーメントを J とする。慣性モーメントは本装置を一本の直方体として算出している。サスペンションのばね定数はフォースゲージより測定した。パラメータは以下の表1に示す。

左右のタイヤに段差、変位 $z_r(t), z_l(t)$ を印加した時の、車体のロールに対する重力の影響は限りなく小さく無視できるとした場合、本装置の簡易モデルの運動方程式の導出は以下である¹⁰⁾。

表1 各パラメータ

Name	Variables	Value (Unit)
質量	M	10.2Kg
ばね定数	K	0.02N/m
粘性減衰	C	0.1N/(m/s)
車軸間距離	L	0.135m
慣性モーメント	J	0.014kg・m ²
重力加速度	g	9.8g/s ²

運動方程式(1)をラプラス変換し伝達関数を導出した。片輪に段差の高さ(変位)をステップ入力として一回印加し、出力は車体の傾きを見るためにロール角(degree)とする。今回は左のタイヤに5cmの段差を印加すると、回転モーメントが時計回りに正になっているため $z_{1(t)} = 0.05$ とする。以下の式(1)は、それらを入出力とした時の伝達関数である。

$$G = \frac{\theta(s)}{Z_l(s)} = \frac{-L(Cs+K)}{Js^2+2L^2Cs+2L^2K} \quad (1)$$

3-2 解析結果

本装置に搭載しているサスペンションの場合、左タイヤに5cmの段差を印加すると、車体が7.5deg.ほど傾き20sec.間、微振動したのち収束することが明らかになった。また、シミュレーション結果における定常状態が、実機の定常状態と限りなく近いため、本シミュレーションの有効性を確認した。シミュレーション結果を図10に示す。

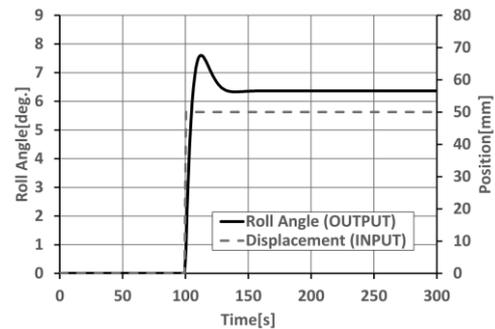


図10 ばね定数 0.01[Nm] の解析結果

4. 検証実験

4-1 実験内容

本装置の振動抑制率を調べるため、従来の電動キックボードと本装置に計測装置を、取り付け実験を行った。実験で使用する本装置と二輪電動キックボード(以下、二輪PMVと称する)を以下の図11に示す。各装置の重心位置に計測装置を取り付け、アスファルト、タイル、土路面での実験を行った。



(a) 三輪 PMV (b) 二輪 PMV

図 11 実験に使用したモビリティ

それぞれのモビリティの重心位置を算出し、計測装置を取り付けて、加速度と角速度を計測した。計測装置は、加速度センサ (REES52 MPU-6050) を使用した。公道で走行することを想定した、路面選択を行った。装置の垂直方向を Z 軸とし、Z 軸方向の加速度を計測することで振動を確認した。装置の X 軸まわりの角速度を計測することで横揺れを確認した。各モビリティに乗車した状態で一蹴りし、時速約 6km で直進し、静止するまでの動作時間を正規化し定量的に評価した。試行回数は各路面で 4 回である。



図 12 実験を行った路面

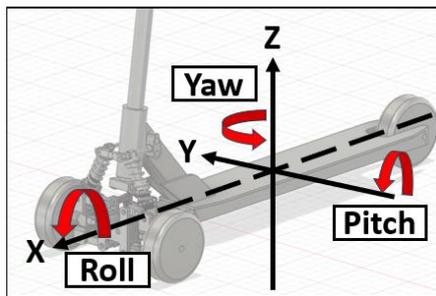
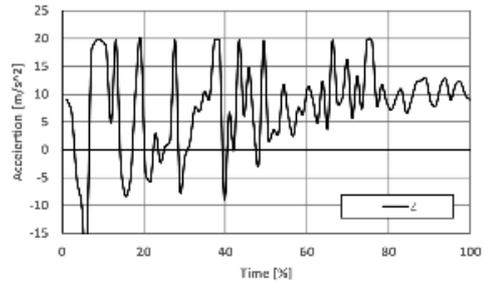


図 13 三輪 PMV の座標系

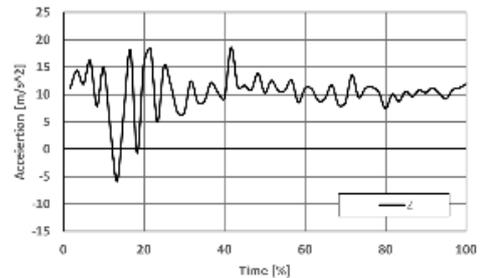
4-2 実験結果

すべての路面で横揺れ抑制の有効性を確認した。タイルにおいてはあまり振動の差が出なかった。これは実験の試行回数を増やすことで有効性が確認できると推察する。また、横揺れは、どの路面でも横揺れの抑制を確認した。さらに、本装置は土路面 (悪路) において、振動、横揺れ共に、非常に抑制できていることから、装置の安定性が高いことを確認した。しかし、町中での走行を想定しているため、アスファルトやタ

イル路面においての振動や横揺れをさらに軽減する必要がある。改善案として、前輪部のハブの距離を広くすることで横揺れを軽減することが可能であると考察する。さらに、路面振動の抑制については、サスペンションのスプリングの硬さや、オイルの粘性を変更するなどのセッティングが必要であると考察する。

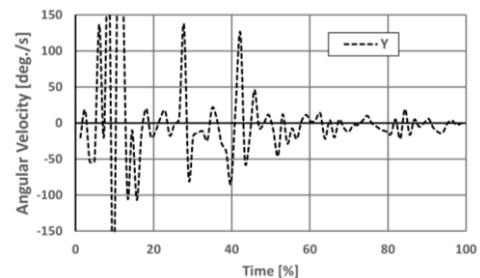


(a) 二輪 PMV

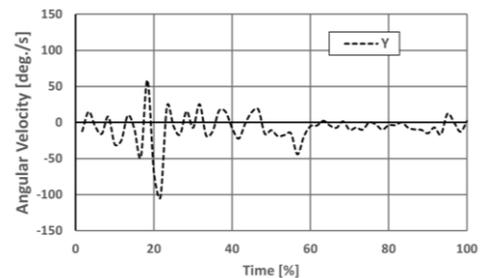


(b) 三輪 PMV

図 14 加速度 (振動)



(a) 二輪 PMV



(b) 三輪 PMV

図 15 角速度 (横揺れ)

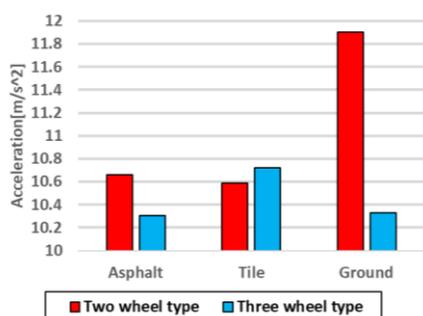


図 16 加速度

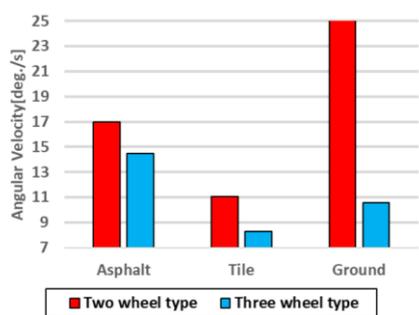


図 17 角速度

5. 結言

本論文では電動キックボードにダブルウィッシュボーン式サスペンションを搭載し、振動抑制の検証と段差乗り越え時の本装置の傾きをシミュレーションにより解析した。電動キックボード用ダブルウィッシュボーン式サスペンションを設計、製作し、三輪化に伴い新たなステアリング機構が必要であり、アッカーマン機構を搭載した。また、本装置の前輪部の簡易モデルから運動方程式を考案することにより、シミュレーション解析を行った。運動方程式は、バネマスダンパ系と2自由度振動系から考案した。シミュレーション結果における定常状態が、実機の定常状態と限りなく近いこと、本シミュレーションの有効性を確認した。さらに、既存の電動キックボードと比較して本装置の振動抑制の有効性を走行実験により確認した。既存の電動キックボードと本装置の重心位置を算出し、重心位置に計測装置を取り付け、加速度と角速度を計測した。各モビリティの垂直方向の加速度を計測することで振動を確認した。また、各モビリティのロールを確認するために角速度を計測した。実験を行った路面は、公道を想定したアスファルトと土、タイルの路面選択を行った。実験結果より、アスファルトと土路面では振動抑制の有効性を確認した。タイルにおいてはあまり振動の差が出なかった。これは実験の試行回数を増やすことで有効性が確認できると推察する。また、すべての路面で本装置の横揺れ抑制の有効性を確認した。

さらに、土路面（悪路）において、振動と横揺れ共に本装置の抑制効果はかなり高いことを確認した。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本自動車工業会, “乗用車市場動向調査”, pp15, Mar. 2022
- 2) 杉正仁, “高齢者がおこす自動車事故の特徴”, 日本老年医学会雑誌, 55 巻, 2 号, pp.187-188, Apr. 2018.
- 3) 松本虎之介, 江坂巧, 泉山墨威, “スマートシティの地域特性における取り組みに関する研究”, 公益社団法人日本都市計画学会 都市計画報告集, no. 21, p. 351, Feb. 2023.
- 4) 吉村朋矩, “若年層を対象とした電動キックボードの走行調査および利用意向に関する研究”, 日本都市計画学会中部支部研究発表会論文集 No. 32, pp35-38, Oct, 2021
- 5) 岩本太郎, “実用メカニズム辞典設計の発想力を鍛える機構 101 選”, 森北出版, p200, 2020.
- 6) 佐々木紀之, 中野冠, “消費者の選好を考慮した超小型モビリティの普及可能性の評価”, p. 22-23, 2013.
- 7) 国土交通省, “歩道の一般的構造に関する基準”, 2005.
- 8) 田村健太, 澤田賢治, 新誠一, “自動車の前後制動力配分のシミュレーションモデルベース最適化”, システム制御情報学会論文誌, vol. 30, no. 5, pp. 42-43, 2016.
- 9) 李大維, 影山一郎, “サスペンションが車両運動に与える影響に関する研究,” p. 119, 2016,
- 10) 落直哉, 藤本博志, 堀洋一, “電気自動車におけるロールおよびピッチモーメントオブザーバを用いた規範モデル追従制御”, 電気学会研究会資料. IIC, vol. 2013, no. 1-16, pp.7-12, Mar. 2013.

Development of Three-wheeled Small Personal Mobility for Smart Cities

Ren DANJO and Masashi YOKOTA¹⁾ *

Graduate School of Science Engineering,

1) Department of Information Science and Engineering, Faculty of Information Science and Engineering,

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received October 31, 2024; accepted December 4, 2024)

Japan is entering a full-fledged elderly society, and there are concerns about the increase in accidents caused by elderly drivers and the decline of public transportation systems.

In this study, a three-wheeled electric kickboard with a double wishbone suspension system was fabricated. This independent suspension system suppresses the roll angle when traveling over bumps and improves stability. The kickboard also has the advantage that the change in the lean angle of the tires due to the deformation of the four-node linkage is small even when the vehicle body rolls during turning. Compared to existing electric kickboards, the effectiveness of this device in suppressing vibration was confirmed through driving experiments. The experimental results confirmed the effectiveness of vibration suppression on asphalt and dirt road surfaces. The effectiveness of this device in suppressing rolling vibration was confirmed on all road surfaces. In addition, it was confirmed that the device was quite effective in suppressing both vibration and rolling vibration on dirt road surfaces (rough road).

Keywords: Personal mobility; Double-wishbone suspension; Electric kick board; Spring-mass-damper-system.