

平成 31 年 4 月 10 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18007

研究課題名(和文) 小型PMVの操縦性向上とその評価手法に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of maneuverability and evaluation of compact PMVs

研究代表者

中川 智皓(Nakagawa, Chihiro)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70582336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型のパーソナルモビリティ・ビークル(PMV)の操縦性の向上のため、数値解析および実験を行い、走行安定化技術を構築した。特に、PMVの形態として、平行二輪や直列二輪、四輪を取り上げ、それぞれの形態における車両と人間の力学的挙動を把握し、操縦性向上の手法を提案した。平行二輪では自動制動の手法および直列二輪ではステアバイワイヤを導入した制御を提案し、四輪では操縦者の意図の有無による挙動について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PMVは軽量小型なため、人間の影響を無視してそのダイナミクスを議論することはできない。本研究によって人間も含めた系全体の挙動を把握し、それを考慮した制御系を構築したことは学術的に意義深い。また、環境保全、高齢社会への対応、移動権の確保といった観点から、歩行の延長をコンセプトとした新しい個人の移動手段の開発が進んできている。本研究結果は各々の車両形態の安全性向上につながり、社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to improve the maneuverability of a small personal mobility vehicle (PMV), the numerical analysis and experiments were carried out to propose driving stabilization methods. In particular, we investigated inverted pendulum vehicles, bicycles, and four-wheels as the form of PMV. The dynamic behaviors of the vehicle and human in each form were analyzed and the methods of maneuverability improvement were proposed. We have proposed the automatic braking method for an inverted pendulum vehicle and the control method using steer-by-wire for a small wheel bicycle, and clarified the dynamic behavior of the drivers on four-wheeled vehicle with and without the driver's intention.

研究分野：機械力学

キーワード：パーソナルモビリティ 運動力学

1. 研究開始当初の背景

近年、環境保全、高齢社会への対応、移動権の確保といった観点から、歩行の延長をコンセプトとした新しい個人の移動手段、パーソナルモビリティ・ビークル (PMV) の開発が国内外で進んできている。これまでパーソナルな移動手段として、電動スクータ、電動アシスト自転車、電動車椅子が普及している。最近では、オートリフト式の福祉モビリティや新しいデザインと動きの着席型車両も登場している。平行に2つの車輪を有し、制御によって安定性を保持する倒立振り子型車両も市販されている。操縦者は、重心移動によって車両を自由に操ることができる。このように、移動の負担を低減させる PMV は、持ち運びや省スペース性の観点から、近年軽量小型化されることが望まれている。しかしながら、車両が軽量になると、車両は人の重量と同程度となり、人との相互作用が無視できなくなる。

2. 研究の目的

本研究では、小型のパーソナルモビリティ・ビークル (PMV) の操縦性を向上させること、また操縦性の評価することを目的とする。車両単体での走行性能を考えるのではなく、車両と人間の力学的インタラクションを詳細に把握することで、車両の姿勢安定性および操縦性を評価する。PMV の形態 (平行二輪や直列二輪、四輪) に応じた操縦性向上のための走行安定化技術を構築する。

3. 研究の方法

これまでの研究より、車両形態・車輪数の相違によって車両のダイナミクスが大きく変化することが分かっている。従って、その特性を記述できる車両モデルと人間モデルを連成させ、車両形態および人間の操縦方法の違いを考慮した運動解析および実験を行い、系全体のダイナミクスを評価する。ここでは PMV の形態として、平行2輪、直列2輪、4輪の3形態を取り扱う。

(1) 平行2輪

平行2輪の形態として倒立振り子型車両を考える。倒立振り子型車両は制御の特性上、機械的なブレーキを取り付けることができない。そのため急制動時には、操縦者は重心を大きく後方へ傾ける必要がある。既往研究では加速操作時と減速操作時に着目した車両と操縦者の二次元シミュレーションを行い、加減速時の操縦者の挙動が明らかになった (荒川他, 2012)。またその結果を踏まえて、倒立振り子型車両の自動制動に関する制御手法を提案する。倒立振り子型車両と操縦者のモデルを図1に示す。通常走行時には、従来の乗用の倒立振り子型車両システムと同様に、車体の傾き角度 θ_{body} と傾き角速度 ω_{body} をフィードバックする制御入力を加えることにより系の安定化を図る。このときの車輪への入力トルク T_1 は式(1)となる。

$$T_1 = K_1 \theta_{body} + K_2 \omega_{body} \quad (1)$$

$K_1 (> 0)$ と $K_2 (> 0)$ は任意に設定できる制御ゲインである。一方、本研究における自動制動時には、フィードバック要素として車車輪の速度 ω_{wheel} を加えた次の入力トルク T_2 も用いる。

$$T_2 = K_1 \theta_{body} + K_2 \omega_{body} + K_3 \omega_{wheel} \quad (2)$$

$K_3 (> 0)$ も同様に任意に設定できる制御ゲインである。本研究における自動制動は、センサで計測した前方障害物との距離等に応じて、式(1)で表される入力から式(2)で表される入力に切り替えることで実現される。つまり、操縦者が不安定にならない程度の加速を車両に一瞬生じさせることで、操縦者が慣性力を受け進行方向と逆向き後方に少し傾き、結果として制動がなされるという仕組みである。

図2に示すよう超音波センサを車両に取り付け、制動実験を行った (図3)。

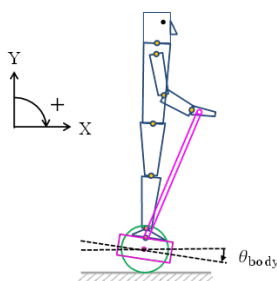


図1 連成モデル

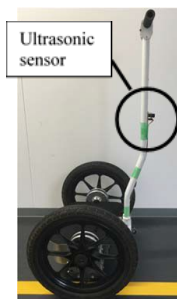


図2 実験車両



図3 制動実験

(2) 直列2輪

直列2輪の形態として小径自転車を考える．ここでは，操縦性向上のための手法として，ステアパイワイヤを取り入れる．従来機械結合されていた操舵系を，電氣的に置き換えることで，操舵系の設計自由度や運動性能を向上させる技術である．ロール角やハンドル角の情報をセンサで検知し，これを電気信号として操舵システムに送信することでタイヤを左右に回転させる．本研究では，自転車が安定となるようなトルクを操舵部に加えることで自転車の安定性の向上を図る．図4にステアパイワイヤ機構を導入した自転車の概略図を示す．本研究では，ステアパイワイヤ機構が操舵部に加えるトルクとして，操舵角 δ が時間遅れ無しにハンドル角 θ に追従するための追従トルク T_{PID} と走行中にロール角方向に車体が傾いた場合，傾いた方向にハンドルを切りタイヤの上へ重心を戻すための安定化トルク T_s の2種類を用いた．図5にステアパイワイヤ小径自転車の試作車による走行実験の様子を示す．

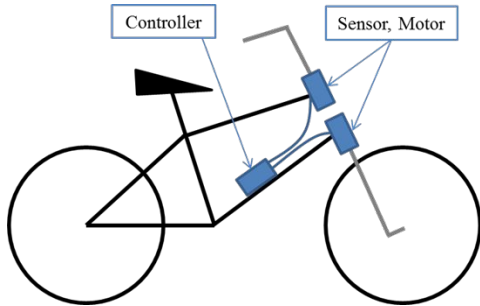


図4 ステアパイワイヤ自転車の概略図



図5 走行実験の様子

(3) 4輪

4輪の形態として，立ち乗り式四輪車両を検討する．運転支援を受けて加減速する場合の操縦者の挙動は，自ら意図的に操縦する場合とは異なると考えられ，運転支援の方法によっては，操縦者が予期せぬ挙動をしてしまい，転倒の可能性がある．ここでは，立ち乗り式四輪車両に運転支援システムを適用するために，加減速時の操縦者の意図の有無による挙動のメカニズムの違いを把握する．ハンドルを持つ場合と持たない場合，および意図の有無，加速時，制動時に着目した実験を行うことで，操縦者の挙動の違いを把握する．実験では，図6に示す三次元動作解析装置を用いて人間の動きを取得する．また，マルチボディダイナミクス(MBD)を用いて制動時の数値解析モデル(図7)を作成し，実験で得られた結果と比較を行う．



図6 三次元動作解析装置を用いた実験

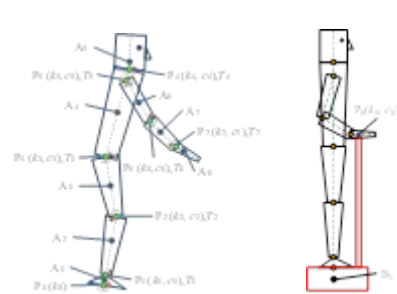
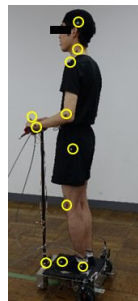


図7 MBD 解析モデル

4. 研究成果

(1) 平行2輪

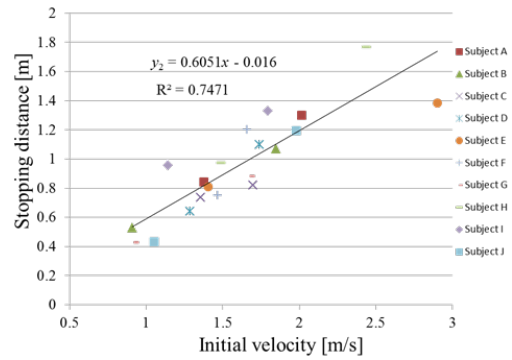
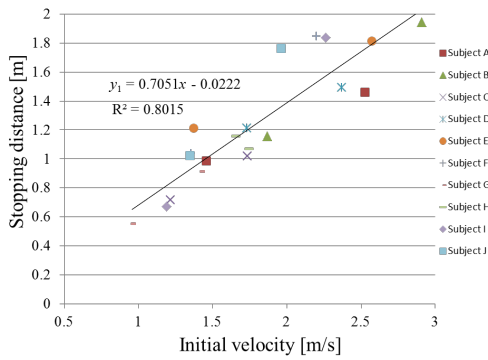
図8(a)は操縦者による意図的な急制動時の走行速度と停止距離の関係，図8(b)は自動制動時の走行速度と停止距離の関係を表す．横軸が電源をいれてから15秒時点の速度，縦軸が， $t = 15[s]$ 時点から $t = 15[s]$ 以降において速度が完全に0[m/s]になる地点までの停止距離を表す．各々の実験結果に対して，走行速度と停止距離に関する近似曲線を一次関数で求め，それらの大小関係を考察した．それぞれ停止距離を， $y_1 = 0.7051x - 0.0222$ ， $y_2 = 0.6051x - 0.016$ (x : 走行速度， y : 停止距離)とおくと，自動制動時の停止距離が小さいと判断できる速度域は次のように求められる．

$$y_1 - y_2 = 0.1000x - 0.0062 > 0$$

$$\Leftrightarrow x > 0.062 \text{ [m/s]}$$

(3)

本結果より，日本の公道での使用で想定される速度域(6[km/h] (=1.67[m/s])未満)(国土交通省，2015)では，ほとんどの場合において操縦者による意図的な急制動よりも自動性能の方が停止距離が短くなり，優れた制動性能を有する制動方法であることが分かった．



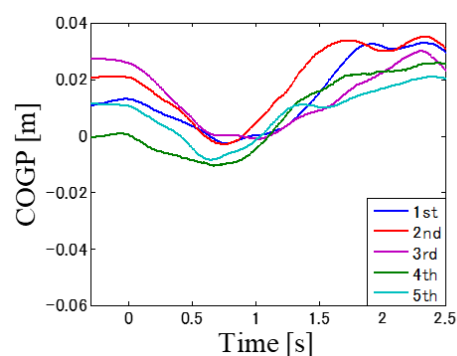
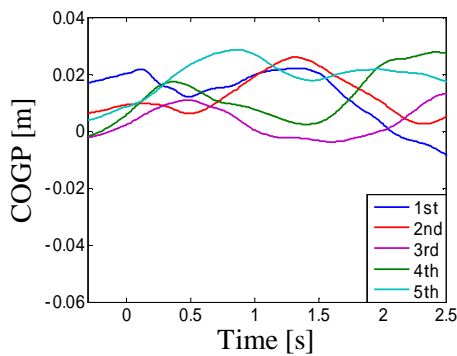
(a) 操縦者による意図的な急制動時 (b) 自動制動時
 図 8 走行速度と停止距離の関係

(2) 直列2輪

直進実験では、低速走行時(ここでは走行速度が 1.5[m/s]以下の場合)にステアバイワイヤ機構を搭載した小径自転車において、前輪に追従トルクと安定化トルクを加えることで通常の小径自転車よりもロール角の平均値が有意に小さくなった。旋回走行実験においても、前輪に追従トルクと安定化トルクを加えることで通常の小径自転車よりもロール角の標準偏差およびハンドル角の揺動回数を抑えられ、最も少ない操作量でロール角を安定させることができた。したがって、ステアバイワイヤ機構を搭載した小径自転車において、前輪に追従トルクと安定化トルクを加えることで通常の小径自転車よりも高いロール方向に対する安定性を実現できた。一方、線のはみ出し回数や操縦性に関するアンケートの結果では、通常の小径自転車が最も良い結果となった。このことからロール方向に対する安定性が向上しても、操縦性が向上するとは限らないことが分かった。操縦性を向上できなかった原因として、モータやギアによる慣性や摩擦抵抗の増加とそれに伴う操舵角のハンドル角に対する遅れにより反力トルクが過大になってしまっていることなどが考えられる。

(3) 4輪

結果の一例として、ハンドルなしでの加速実験における操縦者の重心移動変位を図9に示す。(a)は操縦者の意図で加速、(b)は外部指令により加速する場合である。本結果より、操縦者の意図で加速する場合、加速により後ろに倒れすぎないように予備動作を行っており、外部指令により加速する場合は加速に備える予備動作がほとんどなされていないことが有意に示された。



(a) 操縦者の意図で加速 (b) 外部指令で加速
 図 9 操縦者の重心移動変位

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

谷口文彦, 中川智皓, 新谷篤彦, 伊藤智博, 超音波センサを用いた倒立振り子型車両の自動制動に関する実験(TTCを指標とした安全システムの提案), 日本機械学会論文集, 84(861), 17-00534, 9 pages, (2018).

[学会発表](計32件)

三谷俊貴, 中川智皓, 新谷篤彦, 立ち乗り式四輪車両上の加減速時における操縦者の意図の有無による挙動への影響, 日本機械学会関西支部第94期定時総会講演会講演論文集, DVD-ROM, 806, 2 pages.