

研究終了報告書

「パーソナルモビリティのための自動運転技術の開発」

研究期間：2019年10月～2023年5月

研究者：中川 智皓

1. 研究のねらい

本研究では、パーソナルモビリティ・ビークル(Personal Mobility Vehicle, 以下 PMV)と人間の力学的インタラクションを安全に支援するための自動運転技術を構築することを最終目的とする。PMV とは、歩行空間においても使用される個人の移動手段となる小型・軽量の乗り物である。例えば、倒立振り子型車両、立ち乗り式 3 輪車両、着席型車両などが様々な形態が開発されてきている。移動権の確保といった観点からも、このような歩行の延長となる移動手段の開発は期待されており、また持ち運びや省スペース性の面より、軽量小型化されることが望まれている。これらはコンパクトであるため、自動車では走行できない空間でも使用でき、歩行者との親和性も高い。

一方、自動車では、安全運転支援や自動運転の研究が盛んに行われている。車載カメラやセンサで周囲環境を認識し、人工知能を用いて新しい制御を実現している。PMV においても安全性向上および操縦者の負担低減、新たな移動の形のため、自動運転等の技術の適用が考えられる。しかしながら、自動車と異なり、PMV に自動運転を適用する際には、次の学術的・技術的課題が挙げられる。

①PMV に対する人間の比重は大きく、人間の力学的挙動を無視できない。

自動車に対する人間の比重に比べ、PMV に対する人間の比重は非常に高く、人間の力学的挙動を無視できない。例えば、自動車の自動制動をそのまま適用し、急制動を PMV に促した場合、人間の力学を無視すれば、人間が前方に飛び出し系全体が転倒してしまう等、むしろ危険な状態に陥ることが考えられる。

②人間の操縦(意図あり)と乗車(意図なし)では系全体の安定性が異なる。

例えば、立位式の PMV を想定する。人間が操縦する場合、ブレーキをかける際は自身が転倒しないよう立位姿勢を保持できる具合に減速していく。一方、自動運転でシステム側からブレーキがかかる場合、予期していない減速によって姿勢が乱れることが考えられる。操縦者の剛性が操縦時(意図あり)と単なる乗車時(意図なし)では異なり、それらを定量的に明らかにする必要がある。

よって、PMV に乗る人間の「積極的に操縦するダイナミクス」と「単に乗車するダイナミクス」の違いを明らかにし、PMV と人間の力学的インタラクションを安全に支援するための自動運転技術を構築することをねらいとする。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、PMV のための自動運転技術の開発として、主に倒立振子型車両、立ち乗り式 3 輪車両、着席型車両の 3 つの車両形態を取り上げ、それぞれの運動力学特性を考慮した安全運転支援を検討した。研究のアプローチは以下の手順とした。1. 「各種 PMV のダイナミクスの把握」では、運動力学の観点から理論的に各種車両の安定性を理解し、自動運転適用時の課題を導出した。2. 「PMV 上での人間挙動の把握」では、3 次元動作解析装置、床反力計、6 軸力覚センサ、20 剛体 20 関節 60 自由度の人間モデル等を用い、実験的に人間の運動を把握した。特に、重心位置や足圧中心、関節モーメントを導出し、自動操縦(意図なし)と手動操縦(意図あり)における人間の挙動の違いを明らかにした。3. 「人間モデルの構築」においては、外力に応じて、人間が発揮する関節モーメントを導出した。3形態の車両におけるそれぞれの場合について、人間の関節モーメントの推定式を構築した。これらの推定式は、意図なし、意図ありそれぞれのモデルとして提案している。4. 「マルチボディダイナミクスを用いたシミュレーション」では、路面の傾斜・すべり等の各種条件にて運動シミュレーションができるようモデル化を行った。3.における推定式を取り入れたシミュレーションの利用には工夫が必要であることが分かった。5. 「提案制御手法の実装・検証(実験)」では、PMV により安全に自動運転を適用するための制御系設計を提案し、実装を行った。特に、人間の重心位置に着目し、自動操縦時に問題となる挙動を手動操縦に近い挙動もしくはそれよりも安定な挙動に近づける制御効果を確認した。例えば、倒立振子型車両では、その運動制御の特性上、機械式のブレーキを付加することはできないため、制御によって新たな自動制動を提案してきたが、自動制動に至る前の警報と制動の各タイミングを定量的に示した。さらに、旋回においては、遠心力と操縦者の最大重心移動量の関係を示し、手動旋回時と自動旋回時の挙動の有意な差を明らかにした。自動旋回時における遠心力の閾値を示し、旋回制御系の設計指針を導出した。立ち乗り式 3 輪車両では、手動操舵においては旋回時の安定性を保つため、人間が自ら旋回開始時に重心位置を旋回内側に移動させていることが示された。通常の自動操舵ではこのような現象が見られず、不安定になる要因の一つであることが分かった。提案の自動操舵では旋回開始直前の短い時間に逆向きの操舵を加えることで、安定方向に重心を移動できることを定量的に示した。

以上のように本研究では PMV の自動運転に向けた各車両形態における操縦者のダイナミクス特性を定量的に示した。人馬一体の制御の一手法として、操縦者重心を積極的に動かす方法を提案した。また、カリフォルニア大学バークレー校・California PATH と連携し、自動車の自動運転技術を鑑みた PMV の整理および制御を検討した。

(2) 詳細

研究テーマ A「倒立振り子型車両」

PMVの一形態として倒立振り子型車両がある。倒立振り子型車両は、左右の二車輪の間のステップ台に操縦者が乗車し、重心移動によって走行する乗り物である。左右輪の回転数を変えることで、旋回することができ、省スペースにおいても使用できる。倒立振り子型車両に自動運転を適用する際の問題点として、当該車両は常に姿勢安定化制御を必要とする点が挙げられる。自動運転時、車輪への入力値によっては姿勢制御に大きな影響を及ぼし、結果としてむしろ操縦者の姿勢を乱す危険性がある。そこで、自動運転時の操縦者の挙動のメカニズムを把握することが重要である。本研究では、倒立振り子型車両の自動制動について定量的指標およびその効果を示した。また、図1に示す旋回時における実験では、倒立振り子型車両の手動旋回と自動旋回時の操縦者の挙動を明らかにした[成果リスト1]。操縦者は、旋回中、重心を後方に移動し、車両を減速させていることが分かった。自動旋回の条件では、操縦者に働く遠心力のため重心が旋回方向と逆方向に移動していることが示された。自動旋回時は、車両に働く遠心力が約50[N]を超える時、転倒する危険性があることが示唆された(図2)。以上の操縦者特性より、複数の制御系設計指針を示した。①足の踏ん張りの入力に応じて、制御を変更する。②旋回時に物理的に踏ん張れる機構を構築する。③ハンドルをロール方向に倒すことにより、重心を制御する。

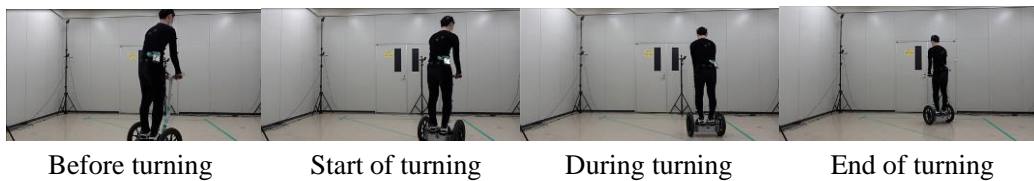


図1 旋回実験の様子

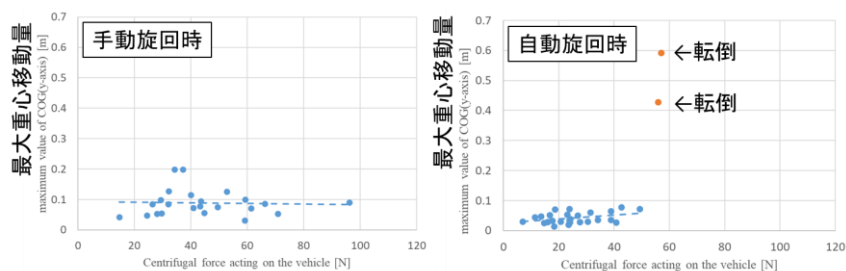


図2 遠心力と最大重心移動量の関係

研究テーマ B「立ち乗り式3輪車両」

3輪以上の車輪を有する車両は静的安定性が確保されている点が優れている。しかし、操縦者の重心位置によってタイヤの接地圧が異なり、同じ車両制御であっても操縦者の重心位置によって転倒や車輪の空転が発生する可能性があることを示してきた。そのため人間の挙動を考慮した車両の制御が重要である。操縦者を含めた系全体が安定になる制御を構築することを最終目的とする。基礎段階として、人間の挙動を把握するために、本研究では人間が身体を動かす際に関節に作用する関節モーメントに注目した。操縦者の挙動は操縦者が内力であ

る関節モーメントを作用させた結果であるため、関節モーメントをより正確に推定することが重要であると考えた。現在解析に用いられている人間モデルは各関節に回転バネ、ダンパを設け、関節角度、関節角速度をフィードバックしたシステムを構築していることがほとんどである。しかしながら、このモデルは PMV 操縦者の実際の動きを十分には表現できていないことが示唆されている。その理由として、実際には人間は、車両速度、加速度、ジャーク、風景の変化、音、風などの入力に対して、経験に基づき「これくらい体を動かせばうまく操縦できるだろう」という予測を立てたうえで、自身の体をアクティブ（意図的）に制御していることが考えられる。車両の状態量からの操縦者の重心位置の推定式のほか、図 3 に示す新規操縦者モデル

$$T_i^{New} = k_{1i}\dot{x} + k_{2i}\ddot{x} + k_{3i}\ddot{x} + k_{4i}\theta + k_{5i}\dot{\theta} \quad (\text{従来は} k_{1i}, k_{2i}, k_{3i} = 0)$$

を提案した[成果リスト 2,3]。関節モーメントの推定ができることで、より現実に近い操縦者モデルの構築につなげることができる。また、逆動力学によって関節モーメントを算出する場合、操縦者の各身体部分の位置と作用する外力を計測する必要があるが、関節モーメントの推定式を構築することで、必要なセンサを削減し、コストの低減も可能であると考えられる。自らがハンドルを操舵させて旋回を行う意図有りでの操縦と、旋回が自動でなされる乗車についての2つの操縦者モデルを構築した。

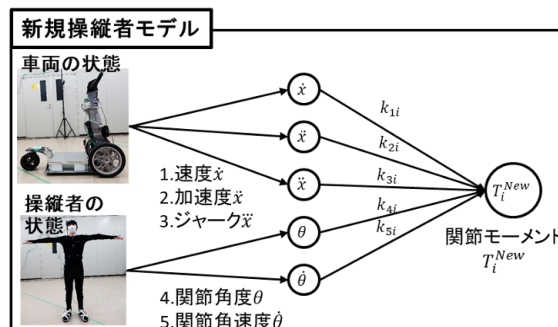
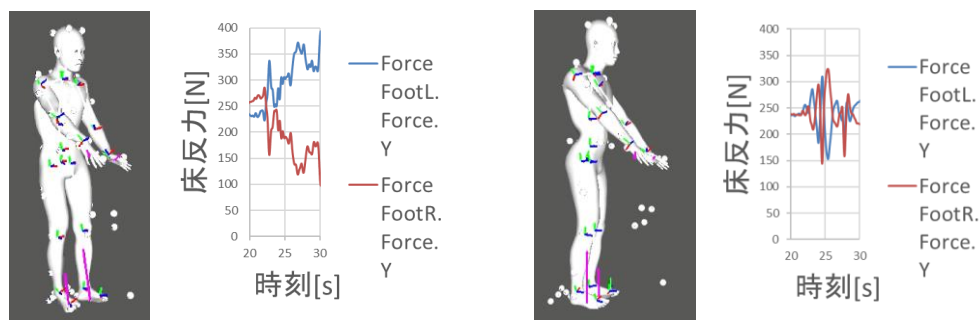


図 3 関節モーメントの推定式

また、図 4 に示すよう手動操縦（意図あり）、自動操縦（意図なし）における操縦者の姿勢安定化戦略の差異を明らかにした。自動運転時に安定性が低下する現象の改善策として、操縦者の重心を積極的に動かす制御を提案した。



手動操縦時（意図あり） 自動操縦時（意図なし）

図 4 旋回時の左右の足圧

図5に示すよう提案自動操舵では旋回開始直前に逆向きへの旋回を一瞬加えることで操縦者の重心を積極的に動かし、最終的な系全体の安定性向上に寄与させる。ただし、その制御の時間が長くなると効果がなくなるため、適切な制御時間を設定する必要性を示した。

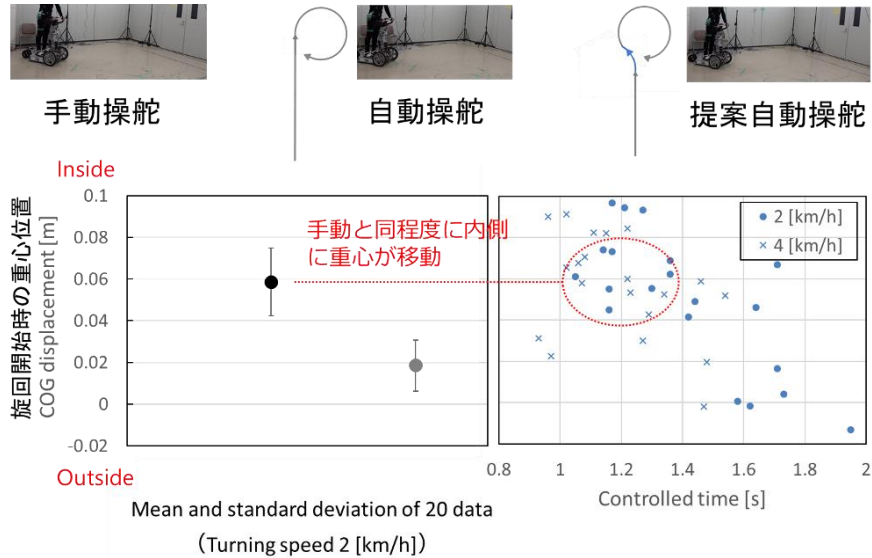


図5 操縦者の旋回開始時の重心位置の比較(手動操舵、自動操舵、提案自動操舵)

研究テーマC「着席型車両」

着席型車両についても、前述のPMVと同様に、操縦者モデル構築のため、実験を行い、重心位置や関節モーメントの推定式を導出した。速度、ヨーレートは関節モーメントに大きく影響し、また意図の有無で操縦者の挙動に有意な差が確認された。得られた知見は乗り心地改善への利用が期待できる。

次世代モビリティ大集合 in 堺(産業界、市との連携)

産学官で連携し、一般市民にPMVを体験してもらい、その機運を高める企画を堺市、次世代モビリティ関連企業と行った。日常生活における活用を想定し、課題を発見して改善を図ることや大阪・関西万博での利用可能性を検証することを目的とした。公道走行ができる車両を含む11種類の車種の試乗を行った。



図6 集合した次世代モビリティ



図7 試乗エリア

3. 今後の展開

今後の展開として、社会実装に向けた形で、提案した自動運転技術を検証していく。PMV の使用の仕方、法との関わりなども議論しながら、進めていく必要がある。また、本研究で得られた結果を基に、状況に応じた合理的な PMV 形態・システムについて追及していく。大阪・関西万博や堺市等における実証実験への参画を進めていく。

4. 自己評価

PMV は車両形態に応じてそのダイナミクスは大きく異なり、それぞれの車両に対する操縦者の運動特性も変化する。本研究では、複数の車両形態を取り上げ、それに応じて人間特性を把握できるよう、多数のセンサや装置を用いた車両-人間の計測システムを独自に構築し、手動運転時(意図あり)と自動運転時(意図なし)の挙動を明らかにした。これら、自動車ではなく PMV ならではの自動運転における系の力学特性の理解において、有意義な成果を出すことができた。また、それらの特徴からいくつかの自動運転制御手法を提案したことは、重要な成果であると考えている。一方、新たな自動運転手法は、上記にとどまらず、検証途中のものがあることが今後の課題となった。これら研究成果の波及効果として、共同研究2件につながった。また、SciFoS 活動からも広い視点を得たことや、産学官連携の実証実験を展開できたことも大変有意義であった。また、国際強化支援で米国での自動運転技術に関する情報、ネットワーク構築ができたため、今後の新たな連携を展開する予定である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:8件

1. Chihiro Nakagawa, Seiya Yamada, Daichi Hirata and Atsuhiko Shintani, Differences in Driver Behavior between Manual and Automatic Turning of an Inverted Pendulum Vehicle, Sensors, 2022, Vol.22, No 9931.
倒立振り子型車両に自動運転を適用する際の特徴として、常に姿勢を安定化させる制御が必要なが挙げられる。本論文では、旋回時の操縦者の重心位置(COG)/足圧中心位置(COP)および関節モーメントを実験的に検討した。COP については、旋回時に内足をより内側に、外足をより外側に移動させることでバランスを保っていることが示された。遠心力による転倒を防止するための足部の関節モーメントは、手動旋回よりも自動旋回の方が大きいことが分かった。
2. 西森皓平、中川智皓、新谷篤彦、重回帰分析による旋回時の意図有無を考慮した立ち乗り式 PMV 操縦者の関節モーメントの推定、日本機械学会論文集、2022、Vol. 88, No. 909
PMV 操縦者の旋回時の関節モーメントを、逆動力学解析によって算出し、その関節モーメントを推定するにあたって、どの関節の負荷が大きいかを関節モーメントの時間積を用いて検討した。従来の操縦者モデルに用いられる関節角度や関節角速度よりも、操縦者に作用する外力が関節モーメントとより相関が高いことが分かった。その結果、肩関節と足関節については意図有り時、無し時ともに従来モデルよりも提案モデルで精度よく関節モーメントを推定できた。

3. 佐藤晃輔、中川智皓、新谷篤彦、前 2 輪後キャスタ 1 輪車両の運動基本モデルの構築と乗員位置が与える影響、日本機械学会論文集、2020、Vol. 86, No. 808

前 2 輪後キャスタ 1 輪の車両モデルを構築し、数値シミュレーションと実験で得た計測データからその妥当性を考察した。特に、人間が乗車することを想定し、垂直抗力を含めたモデル構築を行った。旋回時における人間の乗車位置に関するパラメータスタディを行い、車輪の浮き上がり等の危険性を定量的に示した。

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

(学会発表)

1. 西森皓平, 中川智皓, 新谷篤彦、旋回時の意図有無を考慮した立ち乗り式 PMV 操縦者の関節モーメントに対する相関分析、第 17 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2021)、2021 年
2. 鈴木三平, 中川智皓, 新谷篤彦、立ち乗り式 PMV の操縦者の操舵行動の予備動作再現による安定性への影響の検討、2021 年、Dynamics and Design Conference 2021 (招待講演)
3. 中川智皓、人と協調するパーソナルモビリティ・ビークルの運動制御技術、江蘇省—日本設備製造分野(自動車関連)オンライン技術説明交流会、2022 年 (受賞)
4. 中川智皓、第 3 回キャタピラー-STEM 賞(最優秀賞)、2021 年 (報道)
5. 次世代モビリティ大集合！in 堺、J:COM チャンネル・J:COM テレビ、ジモト応援！つながる News ～堺・南大阪・和泉・泉大津～、2021 年