



自動運転時の移動感覚軽減のための モーションプラットフォーム設計

清水祐輝¹⁾, 澤邊太志¹⁾, 神原誠之¹⁾²⁾, 加藤博一¹⁾

Yuki SHIMIZU, Taishi SAWABE, Masayuki KANBARA, and Hirokazu KATO

- 1) 奈良先端科学技術大学院大学 インタラクティブメディア設計学研究室
(〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地-5, shimizu.yuki.sy6@is.naist.jp)
- 2) 甲南大学 知能情報学部 (〒 658-8501 兵庫県神戸市東灘区岡本 8-9-1)

概要: 自動運転によって搭乗者は車内で自由な活動が可能となる一方で、自動走行時に発生する加速度刺激は車内活動の妨げとなる。先行研究では、搭乗者が加速度刺激を知覚することで生じる移動感覚を軽減することで、車内活動の快適性の向上を目的とした。しかし、搭乗者が前庭覚・体性感覚で知覚する加速度刺激を軽減するためのモーションプラットフォームの仕様は経験的に決められたものであった。そこで、本研究では実環境の走行で発生する加速度刺激の特性と人の加速度刺激の知覚特性から移動感覚軽減に必要なモーションプラットフォームの設計を行う。

キーワード: 移動感覚, 自動運転, モーションプラットフォーム, 加速度刺激, 快適性

1. はじめに

自動運転技術はシステムが運転操作のアシストや代行を可能にするだけでなく、自動運転タクシーや自律移動型スーパーマーケットなどのサービスを提供する自動運転車を実現し、これらは既に身近な存在として普及しつつある [1, 2]。東京 2020 オリンピック競技大会では、トヨタ自動車株式会社が「e-Palette」という自動運転車を提供し、移動だけでなく、将来的には車内でのアパレル店舗の設営やフードデリバリーの提供などの構想も紹介されている [3]。

自動運転の研究分野では、以前から自動運転車に搭載された多くのセンサで取得した情報やコンピュータによる高い処理能力を活用して安全性や効率性を向上させる研究が進められている [4]。しかし、自動運転車の多様化に伴い、これらの能力を活用して搭乗者の快適性を向上させることも重要視されている [5]。我々は、快適化知能 (Comfort Intelligence) を提唱しており、搭乗者の初搭乗時から継続的な日常利用までの、搭乗者の快適性を自動走行知能がサポートするという考えに基づき、この際に障害となる自動運転に対する不安や恐怖などの精神的なストレスを、自動走行ストレス (Autonomous Vehicle Stress, AVS) と定義している [6]。

しかし、先述のように搭乗者が車内空間で様々な活動を行うことを考えると、精神的なストレスだけでなく、活動を妨げるような物理的な刺激というのも問題となってくる。例えば、車両の加速やカーブ時に発生する加速度刺激は、飲食であればこぼしてしまう、また手元の細かな作業であれば集中力の低下に繋がるなど、活動の継続を困難にする可能性がある。

我々の先行研究では、図 1 に示す XR キャビンをを用いて、

視覚および前庭覚・体性感覚で感じる車両からの加速度刺激を制御することで、搭乗者が走行中に感じる移動感覚を軽減することができた [7]。しかし、前庭覚・体性感覚で感じる加速度刺激を制御するモーションプラットフォームは実験用に設計されており、実際の自動走行環境で必要とされる設計については議論されていなかった。

本研究では、先行研究をもとに、実際の自動走行時に適した XR キャビンの設計を目的とし、実走行で発生する加速度刺激の特性と人の加速度知覚から移動感覚軽減に必要なモーションプラットフォームの設計を提案する。

2. 関連研究

我々は先行研究において搭乗者の移動感覚を軽減することを目的とし、XR キャビンと傾斜制御アルゴリズムの提案を行った [7]。XR キャビンは、図 1 に示すような半球スクリーンと一体となったモーションプラットフォームで構成され、実際の自動運転車の後部座席部に搭載されている。半球スクリーンは没入型 VR・ビデオシーズル型 AR の情報提示が可能であり、また半球スクリーンと座席が一体となって傾くことで、搭乗者は没入状態となり、搭乗者にキャビンの傾斜を気づかせることなく移動感覚の軽減が可能となる。一方で、モーションプラットフォームは座席の背面に取り付けられた 2 本のアクチュエータによって傾斜制御が可能となっており、可動域が前後方向に±7.5度、左右方向に±12度、傾斜速度は1.1度/sと、搭乗者が座席の傾く動作に気づきづらくなるように遅めに設計している。また、提示できる加速度刺激は、前後方向に±0.15G、左右方向に±0.2Gとなっている。

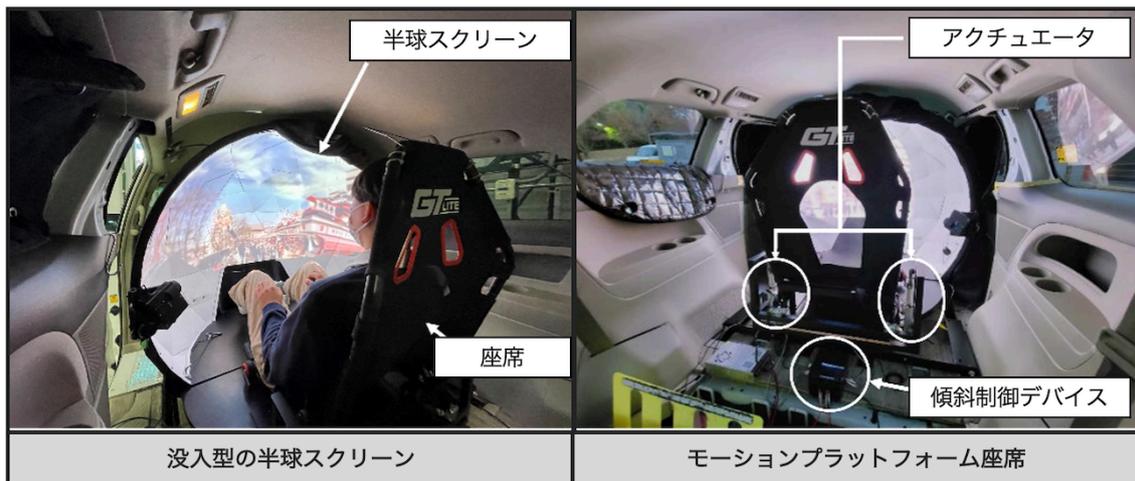


図 1: XR キャビン：没入型の半球スクリーン (左) ，モーションプラットフォーム座席 (右) [7]

実験によって、提案システムは移動感覚の軽減に有効である可能性が示されたが、モーションプラットフォームの仕様は経験的に設計されており、実際の走行環境で必要とされる性能・設計が明らかにされていないことが課題であった。

3. 移動感覚軽減のためのモーションプラットフォーム設計の提案

本論文では、先行研究で提案されたシステム構成に基づき、より移動感覚を軽減するための車載型モーションプラットフォームの設計を提案する。

3.1 モーションプラットフォームが提示する加速度刺激

まずは、モーションプラットフォームが提示する加速度刺激について設計を行う。移動感覚軽減のためにキャビンが提示する必要がある加速度刺激は、走行時に発生する加速度刺激から求めることができる。このとき、車両から発生する加速度刺激は前後方向と左右方向に分けられるが、前後方向の加速度刺激については一般的に自動運転車は十分に滑らかな車両挙動を行うことが想定されるので、左右方向に比べて十分小さいと考えられる。一方で、左右方向の加速度刺激はカーブで発生し、このときの車両の速度やカーブの曲率によって発生する加速度刺激の大きさが決まる。そのため、高速道路などの一定の速度以上でカーブをしなければいけない状況において、加速度刺激が発生することは避けられない。よって、カーブで発生する加速度刺激の範囲に応じて対応可能なモーションプラットフォームの設計を行うことが重要となる。

国土交通省の道路設計に関する規定では、道路の曲線部は車両が横滑りを起こさないような曲率半径となるように設計がされている [8]。つまり、その設計に基づく道路においてモーションプラットフォームが提示するべき加速度刺激は、横滑りを起こさない最大の遠心力がかかる瞬間に発生する加速度刺激と同様となる。

まず、カーブの際に車両にかかる遠心力は次式から求まる。 Z は遠心力 (N)、 v は車両の速度 (m/s)、 g は重力加速度 ($\cong 9.81\text{m/s}^2$)、 G は自動車の総重量 (N)、 f は横すべ

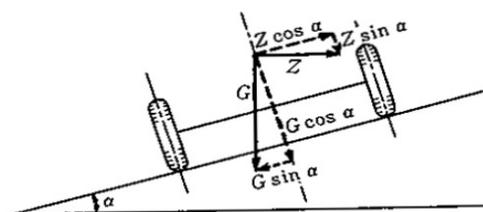


図 2: 曲線部走行時の横すべりの限度 [8]

りに対する路面とタイヤの摩擦係数、 i は路面の片勾配 ($= \tan \alpha$)、 R は曲線半径 (m) を表している。

$$Z = \frac{G v^2}{g R} \quad (1)$$

このとき、図 2 より車両が横滑りを起こさないための条件式が以下で表される。

$$Z \cos \alpha - G \sin \alpha \leq f(Z \sin \alpha + G \cos \alpha) \quad (2)$$

これらの式より、車両が満たすべき遠心加速度が次式で計算される。

$$\frac{v^2}{R} \leq g \frac{f+i}{1-fi} \quad (3)$$

つまり、遠心加速度は設計速度と横すべり摩擦係数及び片勾配の関係から求めることができる。以上より、モーションプラットフォームが提示する加速度刺激は、道路の特性に合わせて図 3 の関係グラフや道路の片勾配から式 (3) を用いて計算することができる。

3.2 モーションプラットフォームの傾斜速度の検討

次にモーションプラットフォームの傾斜速度の設計を行う。傾斜速度を設計する上で重要な点が、搭乗者に傾いていることを気づかせないことである。キャビンが傾斜していることに搭乗者が気づいてしまうと自身の身体の角度から重力方向を認識し、打ち消されていた車両からの加速度刺激を正しく知覚してしまう可能性がある。つまり、移動感覚の軽減効果が小さくなってしまふ。従来のシステムでは、

そこで、人の傾斜速度の知覚閾値に基づいた設計を行う。Kobel らの研究によると、人が知覚できる角速度の閾値は

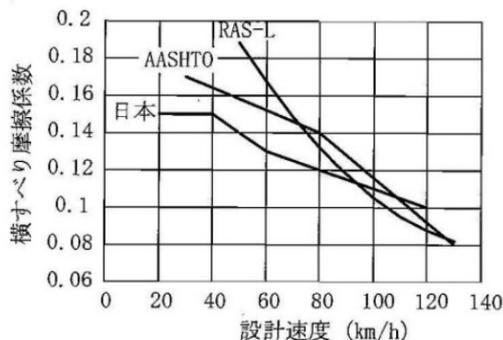


図 3: 各国の規定における設計速度と設計上の横すべり摩擦係数 [8]

0.55 度/s であると分かっている [9]。つまり、傾斜速度については 0.55 度/s 以下に設計することで移動感覚の軽減において十分である。また、Paul らの研究によると、搭乗者の姿勢の変化に応じて搭乗者の角速度の知覚閾値が優位に変化することが知られている [10]。そのため、搭乗者の車内での活動に応じて傾斜速度を動的に調整することで、より移動感覚を軽減できる可能性がある。

一方で、上記の傾斜速度でモーションプラットフォームの設計を行った場合に問題となるのが、車両からの加速度刺激の変化量よりモーションプラットフォームが提示できる加速度刺激の変化量が小さい場合に、車両からの加速度を打ち消せないことである。これは先行研究で提案した傾斜制御アルゴリズムにより一部解決することができるが、従来のシステムの傾斜速度 1.1 度/s であっても打ち消せなかったことを考えると、モーションプラットフォームのみで発生する加速度刺激を打ち消すことは難しいと考えられる。そこで、車両自体の挙動を制御することで、モーションプラットフォームが対応できない加速度刺激の変化を少なくする必要があり。今後は、本稿で提案したモーションプラットフォーム設計に基づいて、車両自体の挙動についても移動感覚軽減のための設計を調査する必要がある。

4. むすび

本論文では、実走行で発生する加速度刺激の特性と人の加速度知覚から移動感覚軽減に必要なモーションプラットフォームの設計を検討した。モーションプラットフォームが提示する加速度刺激を、国土交通省が定める安全設計より車両が横滑りしない最大加速度刺激に基づき決定することができた。傾斜速度については、人の傾斜速度の知覚閾値より傾斜に気づかない速度を設計することができた。

今後は、提案したモーションプラットフォームの設計に加え、モーションプラットフォームを用いた上で打ち消せなかった搭乗者にかかる加速度刺激を最小にするために必要な車両挙動の制御について調査する予定である。また、走行経路がリアルタイムに変化する場合にも移動感覚の軽減を可能とするため、リアルタイムなモーションプラットフォームの傾斜制御の実装も行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP24K17238 及び放送文化基金の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] C. Lisa. Self-driving cars, closer to reality. *Robo Globa, White Paper*, pp. 1–13, 2020.
- [2] H. Mokter. Self-driving robots: A revolution in the local delivery. *California Management Review*, pp. 1–6, 2022.
- [3] 木津雅文. Maas 技術の最前線. トヨタ自動車株式会社 コネクティッドカンパニ MaaS 事業部, pp. 1–11, 2018.
- [4] T. Kim. Automated autonomous vehicles: Prospects and impacts on society. *Journal of Transportation Technologies*, Vol. 8, No. 3, pp. 137–150, 2018.
- [5] N. Kalra and S. M. Paddock. Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 94, pp. 182–193, 2016.
- [6] T. Sawabe, M. Kanbara, and N. Hagita. Comfort intelligence for autonomous vehicles. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 350–353, 2018.
- [7] 清水祐輝, 澤邊太志, 神原誠之, 藤本雄一郎, 加藤博一. 搭乗者の移動感覚の軽減による快適な自動運転環境の構築. *ITS 研究会*, Vol. 123, No. 380, pp. 72–77, 2024.
- [8] 国土交通省. 4 線形. 国土交通省の道路設計に関する規定 道路構造令について (3) ~道路構造の各規定~, pp. 22–112, 2023.
- [9] M. J. Kobel, A. R. Wagner, and D. M. Merfeld. Evaluating vestibular contributions to rotation and tilt perception. *Experimental brain research*, Vol. 241, No. 7, pp. 1873–1885, 2023.
- [10] P. R. MacNeilage, M. S. Banks, G. C. DeAngelis, and D. E. Angelaki. Vestibular heading discrimination and sensitivity to linear acceleration in head and world coordinates. *Journal of Neuroscience*, Vol. 30, No. 27, pp. 9084–9094, 2010.