



AMURO、行きまーす！ : 超加速感を実現する自動運転 VR システムの検討

清水祐輝¹⁾, 重藤瞭介¹⁾, 野口翔平¹⁾, 澤邊太志¹⁾

Yuki SHIMIZU, Ryosuke SHIGETOU, Shohei NOGUCHI, and Taishi SAWABE

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)

概要: 自動運転車内での没入型エンターテインメント研究は増えており, VR 映像コンテンツを車両挙動に同期させ, 搭乗者の視覚と体感を一致させることで, 没入感向上の効果があることが知られている. これらの既存研究を元に, 本研究では, 車両挙動を利用した, より没入感の高い自動走行 VR エンターテインメント実現のため, まずは車両の加速時の挙動に注目し, 加速以上の超加速感を搭乗者に知覚させる新しい自動走行没入型システムを提案する.

キーワード: 超加速感, 没入感, 自動運転, モーションプラットフォーム, 仮想現実感

1. はじめに

自動運転技術によって, 従来手動運転時に運転手が行っていた認知・判断・操作のプロセスを自動運転のシステムが運転手の代わりに行うことで, 人よりも安全で効率的な運転操作が可能となる [1]. そのため, 自動運転車の搭乗者は運転操作を行う必要がなくなり, 車内で様々な活動に時間を費やすことが予測される. さらに, 自動運転では数秒先の経路や車両挙動を予測することができるため, これらの車両情報を活用した車内での VR エンターテインメントが以下のように多く提案されている. Holoride では, 仮想空間の中を移動する際に, 自動運転車の動きと同期した VR 映像を提示している [2]. このとき, VR による視覚での移動感覚と車両から搭乗者にかかる加速度による体感での移動感覚が一致することで, 没入感が高く, また酔いの少ない VR 体験を実現している. しかし, この手法では没入感が高いが実際の車両の動きが制約となり, その制約の中だけの VR コンテンツしか表現することができず, 車内 VR 体験の表現の幅は狭いものになってしまうことが問題となる. また, Akiyoshi らは, 走行中の車内エンタメとして視覚と体感への刺激による没入感向上のシステム提案を行なっている [3].

そこで, 実際の車両の動きとは異なる動きを伴う車内 VR 体験での搭乗者の没入感を向上させることを目的とし, 車内にモーションプラットフォームを導入することで, 車両からの加速度刺激を VR 映像に合わせた加速度刺激へと制御する手法を実現する. 本研究では, まず車両の加速時に着目し, 実際の車両の加速感よりも大きい加速感, 超加速感を搭乗者に与えるための手法を提案し, 効果検証を行う.

2. 提案手法

本研究では, XR キャビンと呼ばれる図 1 に示すような, 半球スクリーンによる VR 提示とモーションプラットフォーム



図 1: XR キャビンの概要図 (自動運転車 (上), 没入型の VR 映像提示 (左), モーションプラットフォーム (右))

ムによる傾斜制御を可能としたシステムにより, 搭乗者の視覚と体感から超加速感を与える.

2.1 XR キャビンの概要

XR キャビンは, VR およびビデオシースル AR を提示可能な半球スクリーンと, スクリーンと座席が一体となったキャビンごと傾斜可能なモーションプラットフォームで構成される. また, キャビン全体はカーテンで覆われているため, 搭乗者はスクリーン外の真の水平を認識できず, 傾斜を視覚的に認識することができない.

モーションプラットフォームは, 半球スクリーンと一体化した座席部, 2 本のアクチュエータ, 制御デバイスの 3 要素で構成されている. 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り, 傾斜の提示が可能となっている. アクチュエータの制御には自作の制御デバイスが用いられ, PC

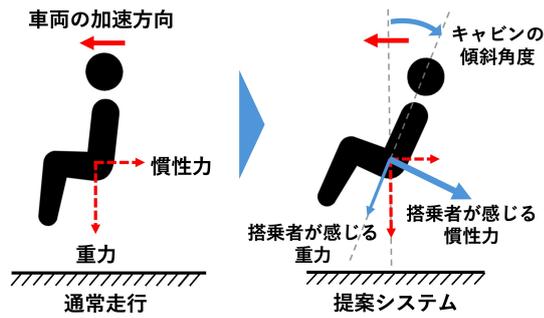


図 2: 超加速感を提示するキャビンの傾斜制御の手法

から伸縮長さの指定による制御が可能である。各アクチュエータの伸縮長は最大 150mm であり、人が乗った状態での伸縮速度は 10mm/s である。キャビンの傾斜は、前後方向に 15 度、左右方向に 24 度の傾斜が可能となっており、傾斜速度は $1.1^\circ/\text{s}$ である。このように、傾斜速度はゆっくりであるため、搭乗者は体感的にもキャビンの傾斜に気づきにくい設計となっている。

2.2 超加速感の提示手法

XR キャビンを用いて搭乗者に視覚および体感による超加速感を提示する手法について説明する。通常の走行時には、図 2 の左図に示すように、視覚的な移動と車両からの加速度刺激による体感的な移動の両方を感じることで移動感覚を得る。従来のドライブシミュレータは、座席を後方に傾けることで重力の一部が搭乗者に後ろ方向の力として作用し、これを体感的な移動として認識させる。さらに、VR を活用して座席の傾斜を認識させない没入状態を作り出し、視覚的な移動を追加することで、視覚と体感の両方を通じて高い移動感覚を得ることができる。

本研究では、図 2 の右図に示すように、車両からの加速度刺激に加え、キャビンの傾斜によって与えられる重力の一部が加算されることで、車両からの加速度刺激以上の強い加速感(超加速感)を搭乗者に与える。このとき、搭乗者にかかる加速度は以下の式 (1) で表され、車両の加速度 $a_{\text{vehicle}}(t)$ に対してキャビンの傾斜角度 $\theta(t)$ で決まる搭乗者の水平方向に与えられる重力 G の一部を加えた合計の加速度 $a_{\text{cabin}}(t)$ で決定される。

$$a_{\text{cabin}}(t) = a_{\text{vehicle}}(t) \cos \theta(t) - G \sin \theta(t) \quad (1)$$

キャビンは車両の発進と同時に、図 2 のように後方に傾き始め、14 秒後に最大傾斜に達する。搭乗者はこのキャビンの傾斜によって、徐々に増加する加速感を体感で知覚する。

視覚に関しては、半球スクリーンを用いた没入型の VR 映像によって搭乗者に超加速感を与える。図 3 に示すように、VR 映像は Unity を使用して作成され、左右に 15m 間隔で電柱が配置された道路を描いた。この道路上を視点カメラが様々な加速度で直進する映像をスクリーンに投影した。搭乗者は電柱や白線を視覚的な手がかりとして前方への加速感を得ることができる。映像における加速度に関しては、キャビンを傾斜させて体感的に超加速感を与える場合、式 (1) で計算される加速度に設定することで、視覚と体感における加速度が一致し、没入感の向上が期待される。

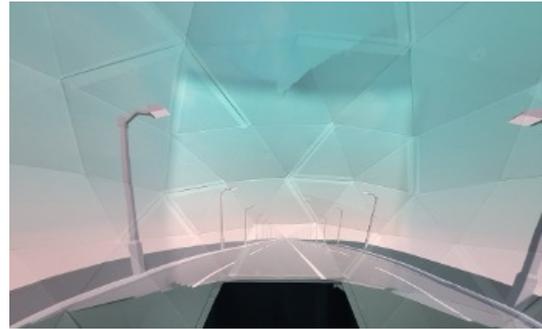


図 3: 車内半球スクリーンに投影した VR 映像

映像の加速は、自動運転車の発進と同時に開始し、加速時間はキャビンが最大傾斜に達する 14 秒間に設定した。

3. 予備実験

3.1 実験概要

超加速感を搭乗者に知覚させるための提案手法による加速感提示効果を調べるために、予備実験を実施した。また、視覚に対する加速度提示が体感にどの程度影響するかを調べるため、次の 3 つの条件を設定した。視覚について、VR 映像の加速度は式 (1) で計算される加速度と、重力加速度 1G の 2 種類を用意した。

条件 1: 映像のみ (式 (1))

条件 2: 映像 (式 (1)) + 傾斜制御

条件 3: 映像 (1G) + 傾斜制御

以上の条件について以下のような仮説を立てた。

H1: 搭乗者は”提案手法なし (通常走行) < 条件 1 < 条件 2 < 条件 3”という順に強い加速感を感じる

H2: 視覚と体感の加速度が一致している条件 2 が最も没入感が高い

視覚による移動感覚は五感の中でも大きな割合を占めていることが知られており、さらに複数の感覚刺激によって移動感が増すことも知られている。そのため、条件 2, 3 のような視覚と体感の組み合わせがより強い加速感を提示し、また視覚効果の大きい条件 3 が最も加速感も強くなると予想した [4]。没入感については、視覚と体感の一致している条件 2 が最も没入感が高いという仮説を立てた。

3.2 実験環境

実験には著者らが所属する研究室内の学生 4 名が参加した。平均年齢は 23.8 歳、男性 3 名、女性 1 名となっている。予備実験は、けいはんなオープンイノベーションセンタ (KICK, 京都) の屋外実証ゾーンで行った。実験場は屋外駐車場の一部にある進行方向に長い形状の道路であり、実験中は他の車両による実験用道路の通行を制限することが可能である。

実験で使用した走行ルートは直進 100m のルートであり、車両の加速度はおおよそ 0.1G となるように走行経路を設定している。この時の車両から搭乗者にかかる加速度について加速度センサで取得したので、図 4 に示す。発進時の加速にばらつきが見られるが、その後の走行中に発生する加

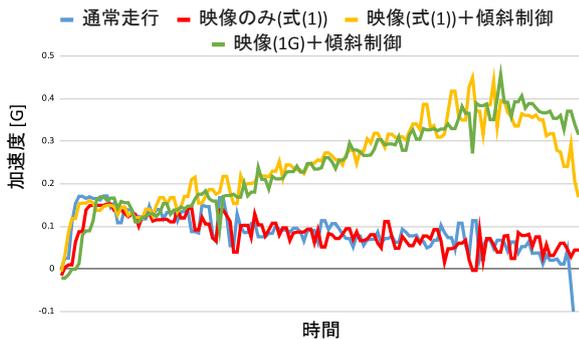


図 4: 各条件の走行で発生した加速度グラフ [G]

速度は自動運転技術によって毎走行で誤差が小さいことが分かっている。

3.3 実験手順

実験の流れは以下の通りで、全体の所要時間は約 20 分であった。

1. 年齢や性別、自動走行車の乗車経験に関するアンケートに回答
2. 実験前の酔いに関するアンケート (SSQ) に回答
3. 加速感の評価の基準となる通常走行を行い、加速感の評価と、その他の質問・SSQ に回答
4. 各条件での走行を被験者毎にランダムな順番で実施
5. それぞれの走行後に加速感の評価とその他の質問・SSQ に回答
6. 提案システムに関する記述式アンケートに回答

実験中、被験者は XR キャビンから発生する音を遮断するために、ノイズキャンセリングヘッドホンを装着した。

3.4 評価方法

搭乗者が知覚した加速感の評価にはマグニチュード推定法を用いて、被験者は実験用の走行ルートで感じた加速感を基準値 1 として、各条件で感じた加速度を基準値の倍数で回答した。また、その他にも映像の違和感や没入感に関して、0~10 の 11 段階のリッカート尺度のアンケートを実施した。最後にシミュレーション酔いについて SSQ アンケートを用いたアンケート評価を行った。

4. 結果

4 条件の各走行実験後のマグニチュード推定法による各走行実験時の加速感の評価結果を図 5 に載せる。図 5 に示されている平均値を見ると、条件 3(映像 (1G) + 傾斜制御) が最も高くなっていることがわかり、仮説 H1 は支持される可能性があると考えられる。

次に、4 条件の各走行についての走行体験のアンケート評価の結果をまとめた。図 6 では視覚と体感で感じた加速感に不一致があったかどうか、図 7 では VR 環境に没入できたと感じたかどうかの評価結果を示している。図 6 では、条件 2(映像のみ (式 (1))) が最も平均値が高く、条件 3(映像 (1G) + 傾斜制御) が最も平均値が低くなった。また、図

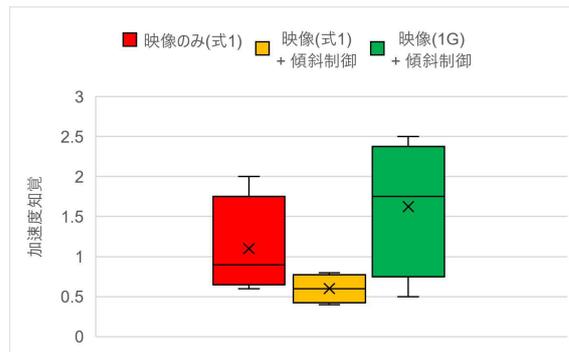


図 5: マグニチュード推定法による加速感の評価結果

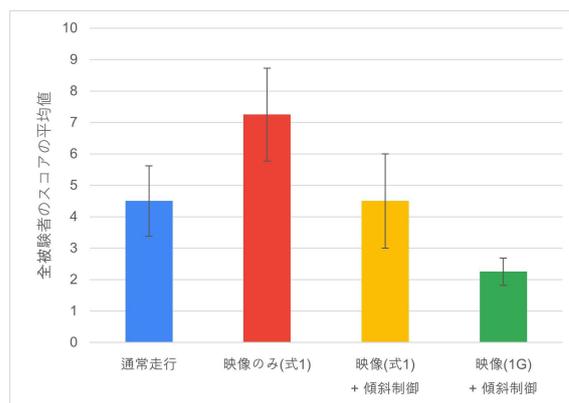


図 6: 「映像と体感に違和感やズレがあったか」の質問結果

7 では、条件 3(映像 (1G) + 傾斜制御) が最も平均値が高くなった。これらの結果から、仮説 H2 は支持される可能性が低いと考える。

最後に、走行実験前及び、4 条件の各走行実験後に SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) を用いてシミュレーション酔いのスコアを測定した。図 8 に実験前と実験後の全被験者の総合スコア (Total Simulator Sickness) の平均値を載せる。実験前の被験者の総合スコアの標準偏差は 11.17 であり、実験後の被験者の総合スコアの標準偏差は 9.35 であった。結果より、実験前と実験後の総合スコアには大きな差がなく、提案システムが酔いを発生させにくいシステムである可能性が示唆された。また、図 9 に示す各条件ごとの総合スコアの平均値を見ると、他の条件に比べて条件 2(映像のみ (式 (1))) が最も高いことがわかる。図 6 において、条件 2(映像のみ (式 (1))) が最も映像と体感にズレがあったことが示されていることから、図 9 に示されている結果と合わせて、映像と体感にズレがあるほど酔いやすくなることが示唆された。

5. 考察

5.1 提案手法による超加速感提示の効果

超加速感については、結果より仮説 H1 が支持される可能性があった。条件 3(映像 (1G) + 傾斜制御) が最も大きな加速感を提示しており、提案手法は実際の車両の加速度以上の超加速感を提示できる可能性が示唆された。映像の加速度の違いについては、加速度の大きい映像の方が搭乗者が知

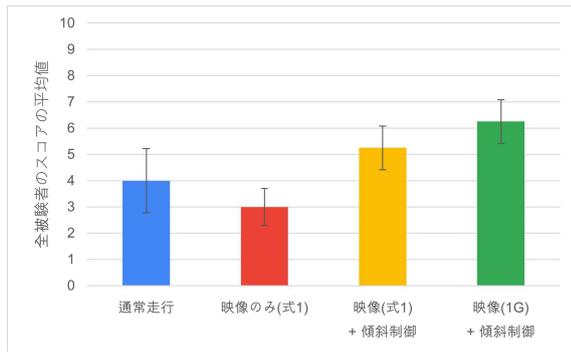


図 7: 「VR 環境に没入できたと感じたか」の質問結果

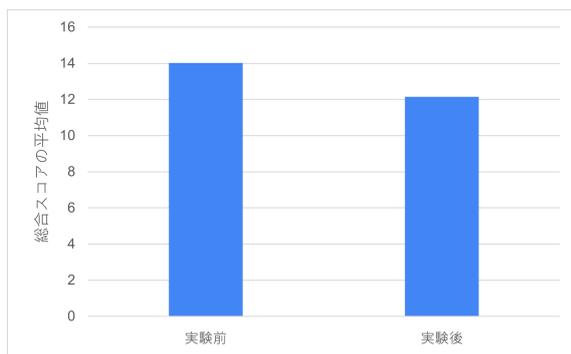


図 8: 実験前と実験後の被験者の総合スコア (Total Simulator Sickness) の平均値

覚した加速感が大きくなっており、これは視覚効果が大きいほどベクションの強度が高くなるという Carpenter-Smithらの研究の結果と一致している [5]。一方で、条件 1, 2 について傾斜制御の有無による効果を比較すると、図 4 で見られるように傾斜制御によって搭乗者にかかる加速度は増加しているが、評価結果では傾斜制御を行う条件 2 の方が搭乗者が感じる加速感が低かった。実験後の記述式アンケートによると、「座席が後方に傾斜することで、加速時の背もたれへの圧力が小さく感じた」というような意見が見られ、加速と傾斜のタイミングによって背もたれから感じる加速感、つまり体性感覚からの加速感が下がる可能性があることが分かった。今後は、座席の背もたれに圧力センサをつけることで、搭乗者の体性感覚から感じる加速感についても評価する必要がある。

5.2 視覚と体感にかかる加速度と没入感の関係について

本実験では、視覚と体感で感じる加速感の関係を調査するために映像の加速度が異なる条件について比較を行った。結果より、体感より視覚にかかる加速度が大きい条件 3 において違和感やズレが少なく、没入感が高い結果となったため、仮説 H2 は棄却される可能性が示唆された。Schlackらの研究によると、加速時に視覚で感じる速度は過小評価する傾向があることがわかっており [6]、知覚する加速度も過小評価する可能性がある。本実験においても条件 2 では映像の加速度とキャビンの傾斜による加速度は一致していたが、搭乗者が視覚で感じる加速度は過小評価され、ズレを生じたと考えられる。このことから、映像の加速度は体感にかかる加速度よりも大きい方が没入感が向上する可能

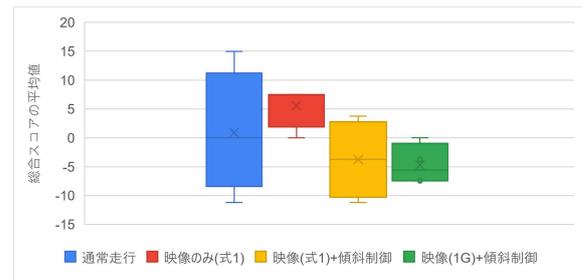


図 9: 各走行での被験者の総合スコア (Total Simulator Sickness) の平均値

性があり、車内で視覚と体感に与える加速度と没入感の関係性についてより詳細に調査する必要がある。

6. むすび

本研究では、XR キャビンを用いて実際の車両の加速感よりも大きい加速感、超加速感を搭乗者に与えるための手法を提案した。予備実験によって、提案システムは搭乗者に超加速感を与える可能性が示された。一方で、没入感については視覚に与える加速度を体感に与える加速度よりも大きく設定することが効果的である可能性があった。今後は、視覚と体感で感じる加速度の関係をより詳細に調査することや前後方向の加速度だけでなく、カーブで発生するような左右方向の加速度についても車両の動きと異なる移動感覚を与える手法を調査する。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP24K17238 及び中山隼雄科学技術文化財団の助成を受けたものである。また、加藤研(加藤博一教授)での研究成果となり、設備の提供や日頃の助言等に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Tschangho Kim. Automated autonomous vehicles: Prospects and impacts on society. *Journal of Transportation Technologies*, Vol. 08, pp. 137–150, 2018.
- [2] Audi. Virtual reality entertainment holoride on the road to series maturity. *Audi MediaInfo*, p. 1–4, 2021.
- [3] Takuto Akiyoshi, et al. Hype d-live: Xr live music system to entertain passengers for anxiety reduction in autonomous vehicles. pp. 148–156. IEEE, 2023.
- [4] Alain Berthoz, et al. Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental brain research*, Vol. 23, pp. 471–489, 1975.
- [5] Theodore R Carpenter-Smith, et al. Inertial acceleration as a measure of linearvection: An alternative to magnitude estimation. *Perception & psychophysics*, Vol. 57, No. 1, pp. 35–42, 1995.
- [6] Anja Schlack, et al. Speed perception during acceleration and deceleration. *Journal of Vision*, Vol. 8, No. 8, pp. 9–9, 2008.