

修士論文

加減速時のドライビングシミュレータ酔いを 抑制する 3D 映像提示法

平成 30 年度

三重大学大学院 工学研究科

博士前期課程 情報工学専攻

人間情報学研究室

辰巳 鏡介

目次

1. 序論	
1.1. 背景	2
1.2. 目的	3
2. 実験説明	
2.1. 実験装置	4
2.2. シミュレータ	5
2.3. モーションベース	6
3. 実験Ⅰ 左右方向の加速度に応じた映像刺激Ⅰ	
3.1. 概要	7
3.1.1. 撮像画角の変化	8
3.1.2. カメラ間距離の変化	9
3.2. 被験者	10
3.3. 実験内容	11
3.4. 走行コース	12
3.5. 実験手順	13
3.6. 評価項目	13
3.7. 結果	14
4. 実験Ⅱ 左右方向の加速度に応じた映像刺激Ⅱ	
4.1. 概要	17
4.2. 被験者	18
4.3. 実験内容	19
4.4. 走行コース	21
4.5. 実験手順	22
4.6. 測定項目	22
4.7. 結果	23
5. まとめ・考察	
6. 謝辞	

1. 序論

1.1. 背景

ドライビングシミュレータは、運転席から見える景色を映すモニタ、走行音や衝突音などを出すためのスピーカ、実車に似せたステアリングハンドル、アクセルペダル、ブレーキペダルなどからなる自動車の運転をシミュレートする装置であり、自動車学校や運転者教習などで普及している。また自動車業界では、「安全未確認」、「疲労」、「居眠り」等による交通事故を回避するためのアクティブセーフティ技術のニーズが高まっている。この技術開発では、長時間シミュレータを運転し続けることが求められる[2]。しかし、シミュレータを長時間運転するとシミュレータ酔いが生じる。これは、実際の自動車を運転する感覚とシミュレータ運転時に感じる感覚との相違が原因である[1]。また、通常の乗物酔と同様に、視覚と前庭感覚の感覚情報の矛盾もシミュレータ酔いの原因であると考えられている。特に運転経験が豊富な人ほどシミュレータ酔いは生じやすく、違反者や高齢者などを対象にした安全運転教習や、自動車や道路を設計・改良する際に自動車の走行をシミュレートする研究開発等で支障を来すため、シミュレータ酔いを抑制するドライビングシミュレータの開発が必要とされている。

この酔いを抑制するため、シミュレータ運転者の操作情報を元にモーションベースを動かし加速度を知覚させ、実車両を運転する感覚に近づける研究が行われている[6]。しかし、抑制をすることは出来ても、まだシミュレータ酔いは生じてしまう。また、私たちの研究グループは、過去にカーブ走行時のシミュレータ酔いをスクリーンに投影する映像の傾斜によって抑制する研究を行っている[3][4][5]。

そこで、本研究では、シミュレータ酔いを抑制するための新たな映像提示法を考案し、その手法のシミュレータ酔い抑制効果を調査した。

1.2. 目的・手法

本研究は、モーションベース付き 3D ドライビングシミュレータ運転時の加速・減速時に発生するシミュレータ酔いの抑制を目指す。実際に自動車を運転すると、乗車している人は加速時には前方向へ、減速時には後方向へ加速度を感じる。しかし、シミュレータ運転時では、この前後方向に発生する加速度を感じることができない。この違いによりシミュレータ酔いが発生する。

実験 I では、シミュレータ酔いを抑制するため、実車運転時とシミュレータ運転時に感じる感覚の違いを減らすような 3D 映像提示法を検討した。映像の奥行きを変化させ前後へ移動するような感覚を与え、視覚から得られる加速度をより強く知覚させることを考えた。これを実現するため、速度に応じて仮想空間内を撮影する右目用・左目用のカメラの撮像画角やカメラ間距離を変化させる。

3D ドライビングシミュレータでは、両眼立体視のために右目用・左目用の 2 つのカメラを使用する。仮想空間を撮影するカメラの撮像画角は、速度が時速 0km の時、通常撮像画角(水平画角:124°, 垂直画角:36°)で撮影し、速度が上がるに連れ、撮像画角を広くした。仮想空間を撮影する 2 のカメラのカメラ間距離は速度が時速 0km の時、通常距離(人の眼球間距離の平均である 65mm)にし、速度が上がるにつれ狭くなるよう設定した。これらの変化により、操作者に加速時には後ろ方向・減速時には前方向に加速度を知覚するような映像刺激を作成することで、実車に近い加速度を感じさせ、シミュレータ酔いの低減を狙う。モーションベースは、速度に応じた動きはせず、映像刺激のみで前後加速度を運転者に知覚させ、酔いを抑制するドライビングシミュレータの開発を目標としている。

実験 II では、**実験 I** での結果より、不快感がそこまで上がらなかったことから、被験者に長時間運転させ、その時の不快感の蓄積を見ることにした。また、車両が完全停止した直後に映像が走っていた方向と逆向きに動いて感じる運動残効が生じた。そこで、画角の変化により仮想空間内のモノの奥行きを変化させる。これにより運動残効を打ち消し、完全停止後の視覚と前庭感覚間での感覚情報の矛盾を解消させることでシミュレータ酔いを抑制する 3D 映像提示法を検討した。

仮想空間を撮影する 2 つのカメラの撮像画角は、速度が時速 0km の時、通常撮像画角で撮影し、速度が上がるに連れ、撮像画角を広くした。また、運動残効は完全停止した直後に生じ、運転者は動いていないのにも関わらず後方向へ動くように感じるため、減速時は速度に応じて撮像画角が通常画角に戻らないようにし、完全停止した後に私たちが決めた時間をかけて通常画角に戻るよう設定した。これにより、運転者に見ている映像が近づくような感覚を与えることで運動残効を打ち消し、実車運転時に近い感覚を与え、シミュレータ酔いを抑制することを目指した。

2. 実験環境

2.1. 実験装置

Figure 1 に実験環境を示す。1 台のサーバーPC と 6 台のクライアント PC(DELLE 社製 PrecisionT5400)によって作成した映像を、6 台の DLP プロジェクタ(SANYO 社製 PGD-DXT10JL)より、実験室に固定されている円筒型スクリーン(半径 10.0m の 60° 円弧、幅 10.0m×高さ 2.6m)に円偏光方式による 3D 映像として 60Hz で投影を行った。スクリーンの中央から 4.0m 前方に被験者の頭部が位置するように、モーションベース(COSMATE 社製 MB-150DSM, Figure 2)とステアリング(Guillemot Corporation 社製 Thrustmaster, Figure 3)を設置した。この位置からの 3D 映像の水平視角は 124° であり、垂直視角は 36° である。

被験者の 3D 映像以外に与える視覚刺激を減らすために、作成した映像の端にはエッジブレンド処理を施し、実験室の天井・床・壁を黒い布などで覆い、外からの光やスクリーン以外からの反射光を減らした暗室で行った。**実験 I** では視野制限を設けた円偏光メガネを装着させたが、**実験 II** では視野制限を設けていない。また、運転の臨場感や走行している感覚を高める目的で、走行中に座席を少し振動させ、スピーカ 7 台とウーファー 1 台から音楽と自動車の走行雑音を流して被験者に聞かせた。

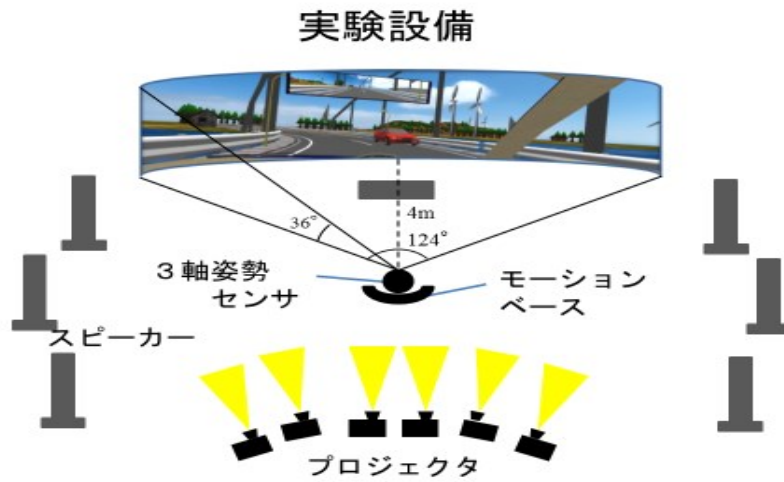


Figure 1: 実験設備



Figure 2: モーションベース

2.2. シミュレータ

本実験では、3D ドライビングシミュレータを使用した。自動車の計算については、付録を参照のこと。自動車の動特性を考慮し、ステアリング操作によって変化する自動車の方位角に、カットオフ周波数 2Hz で 1 次のバターワースローパスフィルタをかけた。また、細かいステアリング操作によるモーションベースのがたつきおよび映像のふらつきを抑えるために、運転時に発生する遠心加速度にカットオフ周波数 1Hz で 2 次のバターワースローパスフィルタをかけた。

2.3. モーションベース

モーションベースは、COSMATE 社製の MB-150DSM を使用した。また、走行感覚を高めるための上下振動として、0~1 の乱数を発生させたものにカットオフ周波数 1.5Hz~3.0Hz で 1 次のバターワースバンドパスフィルタをかけたものを与えた。この振動は、路面入力による乗り心地に関わる部分の振動を再現している[7]。

3. 実験 I 速度に応じた映像刺激

3.1. 概要

3D ドライビングシミュレータでは、両眼立体視のために右目用・左目用の 2 つのカメラを 65mm の間隔で配置し、仮想環境を撮影する。この 2 つのカメラの撮像画角やカメラ間距離を車両の速度に応じて変更することで、運転者から見えている仮想空間内の物体の奥行きを変化させた。この変化により、運転者に加速・減速時に前後の加速度を知覚させ、実車運転時との感覚の違いを減らすことでシミュレータ酔いの抑制を目指す。

仮想空間を撮影する撮像画角は、速度が時速 0km の時に通常の画角で撮影し、速度が加速するにつれ最大通常の 1.1 倍の画角まで広くなり、減速するにつれ時速 0km の時の画角に戻るよう設定した。仮想空間を撮影する右目用・左目用の 2 つのカメラ間距離は、速度 0km の時のカメラ間距離は一般的な人の眼球間距離の平均である 65mm に設定しており、加速するにつれてその距離を最小 6.5mm まで小さく変化させ、減速するにつれて元の 65mm に戻るよう設定した。モーションベースは速度に応じた動きはせず、映像刺激のみで前後加速度を知覚させることを図った。

3.1.1. 撮像画角の変化

撮像画角とは、カメラが仮想空間を撮影する時の光景の範囲を角度で表したものである。本実験環境では、観察位置からの水平視野角 124° 、垂直視野角 36° であるため、通常はスクリーンに投影する映像もこの画角で計算して映像提示を行う。Figure 3 は、撮像画角が変化した場合の撮影している範囲の変化を上から表したものであり、Figure 4 は、Figure 3 の変化をカメラの映像として表したものである。赤の範囲は通常の画角であり、Figure 4(a)のように見える。カメラの撮像画角を広く変化させると、Figure 3 の青の範囲になり撮影される範囲が増え、Figure 4(b)のように見える。Figure 4 の映像を比較すると、撮像画角が広くなると見えているモノは遠ざかったように感じる事が分かる。これを利用して、速度に応じて撮像画角を変化させ、映像の奥行きを変化させ、運転者に前後加速度を知覚させる。実際に用いた画角変化の式は、3.3 節で紹介する。

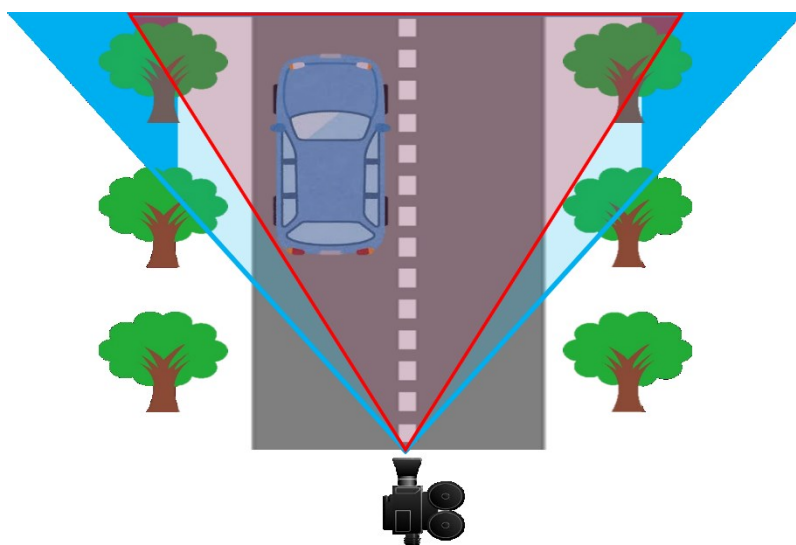


Figure 3: 撮像画角の範囲



(a)撮像画角が通常の時の映像



(b)撮像画角が通常より広い時の映像

Figure 4: 撮像画角の範囲の差による映像の違い

3.1.2. カメラ間距離の変化

3D 映像は、両眼立体視のため、右目用の映像・左目用の映像に分けてスクリーンに投影を行う。この映像を、偏光メガネを通して観察すると、右目用の像と左目用の像の違いから立体的に見える。この右目用・左目用の映像を撮影する 2 つのカメラ間距離は、ヒトの眼球間距離の平均である 65mm として作成している。また、カメラ間距離の変化による奥行きの違いは、5m 以内のモノにより強く作用する特性を持つ。

Figure 5 は仮想空間内の前方車両を右目用・左目用カメラで撮影している様子を上から表したものであり、Figure 6 は実空間で偏光メガネを通して運転者がその映像を見たときに感じるモノの奥行きを図示したものである。Figure 5 の赤い角度は人の眼球間距離の平均である 65mm をカメラ間距離に設定して撮影しており、青い角度は赤い角度よりもカメラ距離を狭くして撮影している。この映像を、実際に偏光メガネを通して見ると、Figure 6 に示すような奥行きの違いが確認できる。運転者の位置は変わることなく、前方者との距離が変わって見えることが分かる。ただし、運転者が見ているモノの大きさが変化することなく奥行きが変化するため、大きさが変化したように感じる。これを利用して、速度に応じてカメラ間距離を変化させ、映像の奥行きを変化させ、運転者に前後加速度を知覚させる。実際に用いたカメラ間距離の変化の式は、3.3 節で紹介する。

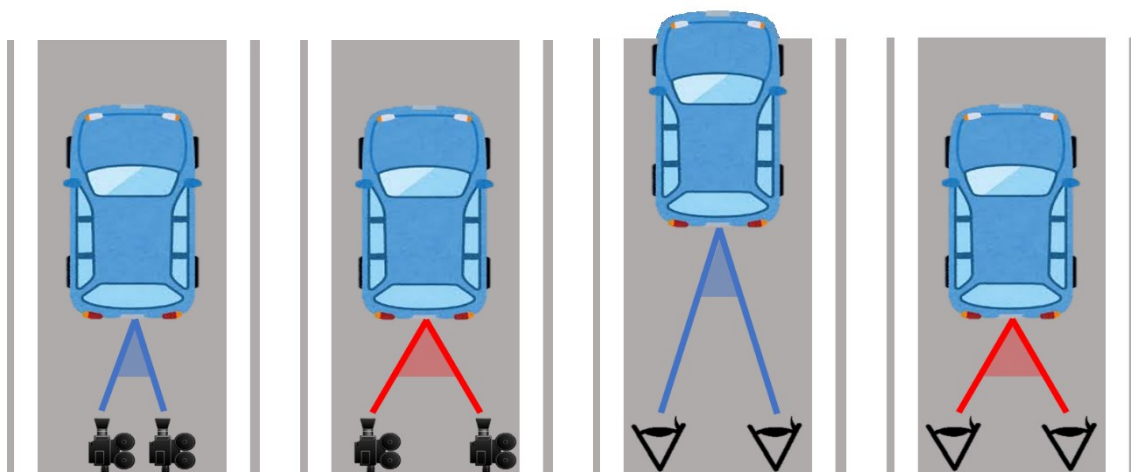


Figure 5: カメラ間距離の変化(仮想空間内)

Figure 6: カメラ間距離の変化(実空間)

3.2. 被験者

被験者は、男子学生 15 名（うち 2 名は 2 回参加）と女子学生 5 名の計 20 名を用いて、22 回実験を行った。全ての被験者に「8 時間以内にお酒を飲んでいるか」「十分な睡眠をとっているか」「体調は良好かどうか」の 3 項目を訪ね、男子学生 1 名、女子学生 1 名は、十分な睡眠をとっているかで「いいえ」を答えたが、2 項目以上「いいえ」を答えた者は居なかった。また、全ての被験者に「免許取得歴」「運転頻度」の 2 項目を訪ね、まとめたものを Table 1 に示す。

被験者に、実験中は実際の自動車の運転と同じように、急なハンドル操作や急発進・急ブレーキは控え、片側 1 車線の道路の左側車線内を道路交通法に従って走行するように指示した。また、停止する際の目安として、前方車両に追突しないよう前方車両のタイヤが見えるか見えないかの位置で停止するように伝えた。

Table 1: 実験 I 被験者の免許取得歴と運転頻度の回答

		運転頻度					
		ほぼ毎日	週2.3回	月数回	年数回	なし	計
免許取得歴	1年未満	1	0	0	0	2	3
	1～3年	2	0	3	4	3	12
	3～7年	0	2	1	2	0	5
	7年以上	0	0	0	0	0	0
	計	3	2	4	6	5	20

3.3. 実験内容

仮想空間を撮影するカメラの撮像画角 A [°] を式(1)で変化させ、仮想空間内の右目・左目の眼球間距離 L [mm] を式(2)で動かした(Figure 7, Figure 8)。撮像画角は、速度が時速 60km でおおよそ 1.1 倍になり、カメラ間距離は通常のヒトの眼球間距離のおおよそ 0.1 倍である 6.5mm になる。この式を用いた理由は、速度が、低速から時速 0km になる時に映像の変化を特に強く与えたかったからである。実験は、通常の何も施していない映像、撮像画角が変化する映像、カメラ間距離が変化する映像、撮像画角とカメラ間距離が変化する映像の 4 種類で行った。被験者が操作する車両の奥行きを変化させると映像が変化していると知覚しやすく、むしろシミュレータ酔いを増加させてしまう恐れがあったことや、一般的なドライビングシミュレータでは車の内装部分は実物として存在しており映像は仮想空間のみを提示していることから、本実験では車内風景は変更せず、車外風景のみ上記のように変化した。

$$A(t) = 1.1^{\tanh(0.1 \cdot v(t))} \quad (i = k \text{ or } l \text{ or } m) \quad (1)$$

$$L(t) = 65 * 0.1^{\tanh(0.1 \cdot v(t))} \quad (i = k \text{ or } l \text{ or } m) \quad (2)$$

$v(t)$: 速度にカットオフ周波数 0.1Hz で 1 次のチェビシェフローパスフィルタ通過済

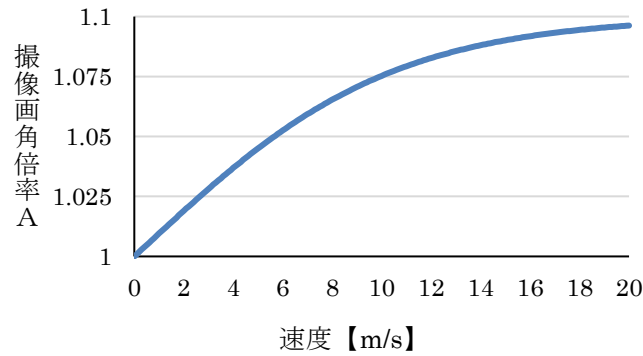


Figure 7: 撮像画角の変化(式 1)

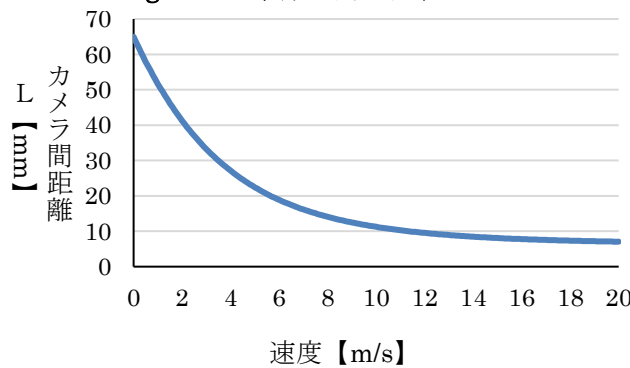


Figure 8: カメラ間距離の変化(式 2)

3.4. 走行コース

走行コースは、停止するためのオブジェクトを 3 カ所に設置した日中晴天下の全長 1km の直線道路を作成した(Figure 9)。停止するためのオブジェクトは、信号と踏み切りを用意し、250m ごとに信号、踏み切り、信号の順に設置した。信号は、被験者が停止するよう常に赤信号になっており、被験者の運転する車両が信号の手前で完全に停止してから 4 秒後に切り替わるので、それから発進させた。踏み切りは、通過前に一時停止した後、速やかに発進するよう被験者に伝えた。この実験で用いた車両の最大速度は時速 60km 程度までしか上がらないように設計した。

実験 I で使用した実際の映像を Figure 10 に示す。カメラ間距離の変更による奥行きの変化は、およそ 5m 以内の物体に対して強く感じる。よって、停止する際の映像刺激の効果を増加するために、道路の中央に中央分離帯を置き、停止箇所の近くにモノやヒトのオブジェクトを多く用意した。また、前方を走る車両も作成した。この前方車両は、信号と踏み切りの手前で停止し、被験者が運転する車両が後方で停止した後に動き出すよう設定した。

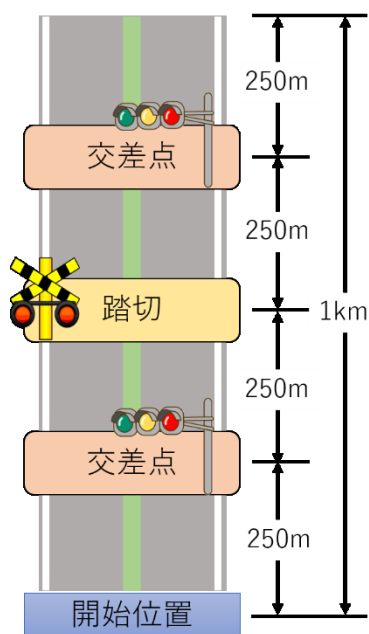


Figure 9: 実験 I で使用したコース



Figure 10: 実験 I 実験映像

3.5. 実験手順

連続する 4 試行を 1 セッションとし、1 実験で 7 セッションを行った。最初の 1 セッション 4 試行は練習試行として扱い、残りの 6 セッション 24 回分を本試行とした。また、4 通りの刺激があり、被験者間と被験者内で順序効果を打ち消すように割り当てた。1 試行を 100 秒（ゆっくり丁寧に走行しても 3 度の停止箇所を通過する時間）に設定し、試行間には 20 秒の評価時間を設け、その間に直前の試行における「不快感」、「操作感」、「走行感」の 3 つの評価項目を 0～10 の数値尺度を口頭で回答させた。また、セッション間には 2 分の休憩時間を設けた。

3.6. 測定項目

「不快感」、「操作感」、「走行感」を 0～10 の 11 段階とし、各段階が等間隔とるように評価させ、シミュレータ酔いに与える効果を検討した。被験者に各試行間で評価させた 3 つの項目の詳細を以下に示す。

「不快感」は、運転していた時に感じた気持ち悪さを答えさせた。まったく不快を感じなければ「0」、我慢できないような強い不快を感じれば「10」とした。

「操作感」は、実験中に曲がりにくいと感じたり、止まりにくいと感じたりするような感覚を答えさせた。まったく思い通りに操作ができなければ「0」、完璧に思い通りに操作ができれば「10」とした。

「走行感」は、実際の自動車でカーブを運転している際に感じる遠心力や、加速や減速をする際に感じる加速度のような運動感覚と比べた、実験中の感覚を答えさせた。実際の自動車と同じ走行感をまったく感じなければ「0」、実際の自動車と完全に同じ走行感を感じれば「10」とした。

3.7. 結果

男性 2 名、女性 2 名の計 4 名は、強い不快感を実験中に訴え、途中中断したため結果のグラフには含めていない。データ数は、24 試行 18 名分のデータで、432 試行分である。4 刺激あるので、1 刺激ごとのデータ数は 108 試行分となっている。

Figure 11 は、被験者が回答した不快感・操作感・走行感の平均と標準誤差を刺激別に表したものを示す。不快感・操作感・走行感 3 つの項目において、刺激による差が見られなかった。

また、走行したデータを元に解析を行った結果が Figure 12, Figure 13 である。Figure 12 は、個人ごとに刺激別で、前方車両の最後尾と操作者の車の最先端までの距離の平均、およびその標準偏差を計算し、それらの平均を表したものである。Figure 13 は、Figure 12 で求めた停止位置の分散と、その分散の 95%信頼区間を表している。評価項目の操作感では差がなかったように、停止する際の平均位置に違いは見られなかった。カメラ間距離の変化をさせる刺激と、両方とも変化させる刺激の分散は 5%で有意な差を示した。

Figure 14 は、被験者を運転頻度の高い者と低い者に二分し、回答した不快感・操作感・走行感の平均と標準誤差を刺激別に表したものである。分け方は、月に数回以上運転する被験者(9 名 11 回分)と、年に数回以下しか運転しない 7 名(7 回分)とした。不快感のグラフに着目して見ると、運転頻度の低い被験者に比べて、運転頻度の高い被験者の方が高かった。操作感、走行感に関しては、大きな差が見られなかった。また、運転頻度の低い被験者では、カメラの撮像画角、カメラ間距離を変化させる映像で不快感が良くなる傾向が見られ、操作感、走行感でも良くなる傾向が見られた。しかし、運転頻度の高い被験者は、カメラの撮像画角、カメラ間距離を変化させる映像で不快感が増加し、操作感、走行感でも通常の何も施さない映像が最も高い評価が得られた。

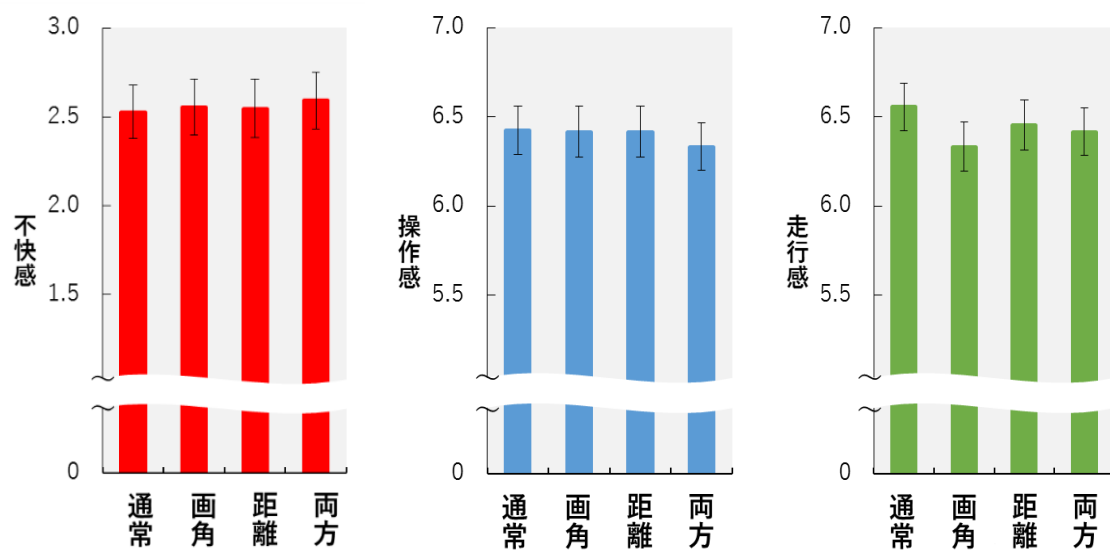


Figure 11: 実験 I 心理評価値

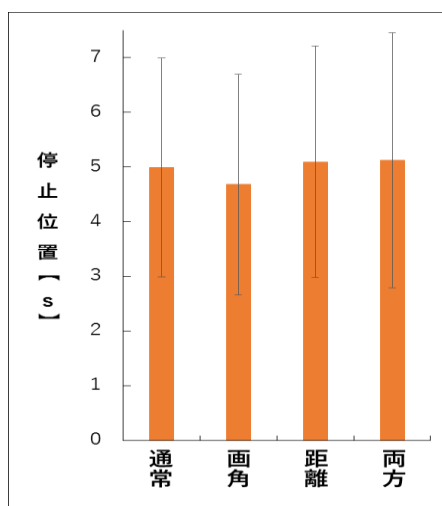


Figure 12: 停止位置

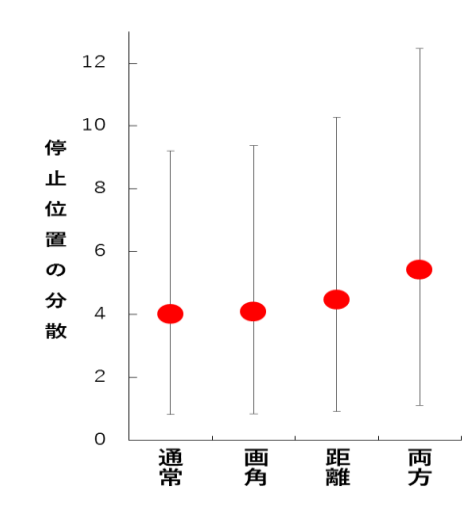


Figure 13: 停止位置の分散

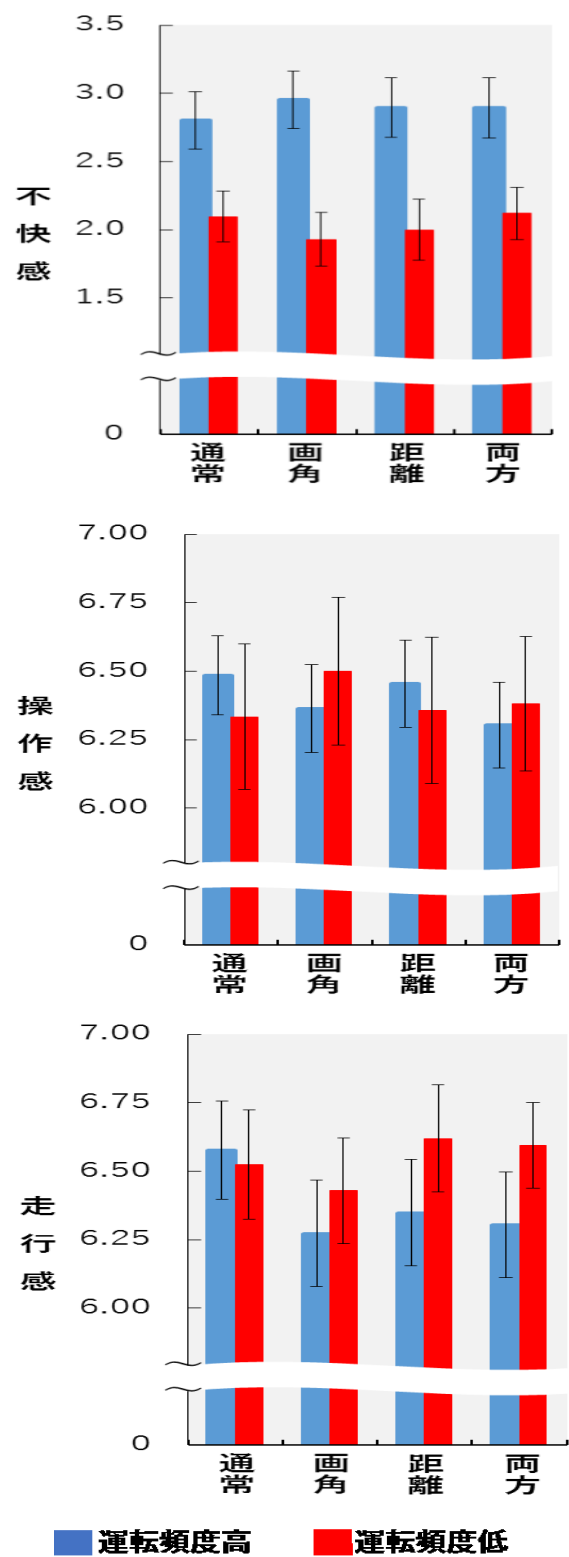


Figure 14: 実験 I 運転頻度別心理評価値

4. 実験Ⅱ 左右方向の加速度に応じた映像刺激Ⅱ

4.1. 概要

実験Ⅰでは、不快感がほとんどの被験者でそこまで高くならなかった。そのため、本実験では、運転者に長時間シミュレータを運転させ、不快感の蓄積を見ることにした。また、実験Ⅰでは、奥行きを変化させる方法の一つとしてカメラ間距離を用いていたが、カメラ間距離の違いによる奥行きの変化は 5m 以内のモノに対して強く作用することから、映像にそこまでの変化が得られないと考え、実験Ⅱでは用いないことにした。

シミュレータを運転すると、完全停止した時に運動残効が確認できた。運動残効とは、一定の方向に運動する対象をしばらく凝視したのちに静止した対象を見ると最初に見続けたものの動きと反対に動いているように見える現象である。走行中は外の景色が近づいてくるように見えるため、完全停止した際に逆方向に映像が動いて見える。そこで本実験は、この運動残効を打ち消し、シミュレータ酔いを抑制する映像提示法を考案した。

4.2. 被験者

被験者は、男子学生 17 名と女子学生 1 名の計 18 名を用いて、1 人 2 回の計 36 回実験を行った。全ての被験者に「8 時間以内にお酒を飲んでいないか」「十分な睡眠をとっているか」「体調は良好かどうか」の 3 項目を訪ねた。通常映像刺激では、「8 時間以内にお酒を飲んでいるか」で「いいえ」と回答した被験者が 1 名、「十分な睡眠をとっているか」で「いいえ」と回答した被験者が 2 名居た。画角が変化する映像刺激では、「十分な睡眠をとっているか」で「いいえ」と回答した被験者が 1 名居た。また、全ての被験者に「免許取得歴」「運転頻度」の 2 項目を訪ね、まとめたものを Table 2 に示す。

被験者に、実験中は実際の自動車の運転と同じように、急なハンドル操作や急発進・急ブレーキは控え、片側 1 車線の道路の左側車線内を道路交通法に従って走行するように指示した。また、交差点では直進するように指示した。赤信号で停止する際は、信号の手前の停止線に合わせて完全に停止するように指示した。

Table 2: 実験Ⅱ 被験者の免許取得歴と運転頻度の回答

		運転頻度					
		ほぼ毎日	週2.3回	月数回	年数回	なし	計
免許取得歴	1年未満	0	0	0	0	1	1
	1～3年	1	4	1	4	2	12
	3～7年	1	1	0	2	1	5
	7年以上	0	0	0	0	0	0
	計	2	5	1	6	4	18

4.3. 実験内容

本実験で考えた画角の変化の考え方について説明する。Figure 15 の上のグラフは走行速度を表したものであり、下のグラフは車両が上のグラフの速度で走行した時の画角に掛ける倍率の変化を表している。黄色の枠は加速・等速、緑の枠は減速、青の枠は停止直後であることを表しており、運動残効は青の枠の停止直後に生じる。

まず、撮像画角 $A(t)$ は、常に式(3)、式(4)のように変化させる。

$$A(t) = A_0 * 1.1^{\tanh(0.5*\theta(t))} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + d\theta(t)\Delta T \quad (4)$$

$A(t)$: 撮像画角($^{\circ}$)

A_0 : 通常時の画角($^{\circ}$)

$\theta(t)$: 画角の変化量

ΔT : サンプルング周期(0.002 秒)

加速・等速の場合、式(5)に示すように画角の変化量の微分 $d\theta(t)$ は、加速度 $dv(t)$ に比例させて変化させた。

$$d\theta(t) = dv(t) \quad (5)$$

本実験では、完全停止した直後の運動残効を画角変化による奥行きの変化で打ち消す。そのため、停止直後から画角を小さく変化させる必要があり、減速し始めてから停止するまでに元の画角に戻ってはいけない。そこで、減速時は速度が時速 0km に落ちても画角の変化が元に戻らない式を考えた。減速時は、式(6)のように現在の時間での速度 $v(t)$ を加速度 $dv(t)$ で割り、現在の加速度で何秒後に速度が時速 0km になるかを算出する。この時間を \hat{T} とする。さらに、停止後に何秒後に画角を戻すかを時間 τ で決める。時間 τ は、予備実験を元に 1.2 秒に決定した。この時間 τ を用いて現在の時間での、速度が時速 0km の時に必要な画角の変化量 $\theta_s(t)$ を式(7)で算出する。そして、与えられた値を用いて式(8)により、減速時の画角の変化量の微分を決める。

$$\hat{T} = v(t)/dv(t) \quad (6)$$

$$\theta_s(t) = -0.08 * \tau * dv(t) \quad (7)$$

$$d\theta(t) = \min\{(\theta_s(t) - \theta(t))/(-\hat{T}), 0\} \quad (8)$$

停止の場合、停止瞬間はその時間を t_s とし、式(9)より変化量の微分 $d\theta(s)$ を算出する。そして、停止中は画角の変化量の微分は、式(10)を用いて算出する。

$$d\theta(s) = \frac{\theta(s)}{\tau} \quad (9)$$

$$d\theta(t) = d\theta(s) * e^{-(t-s)/\tau} \quad (10)$$

以上の式(3)～式(10)により、Figure 15 の下のグラフのような画角の変化を設定した。

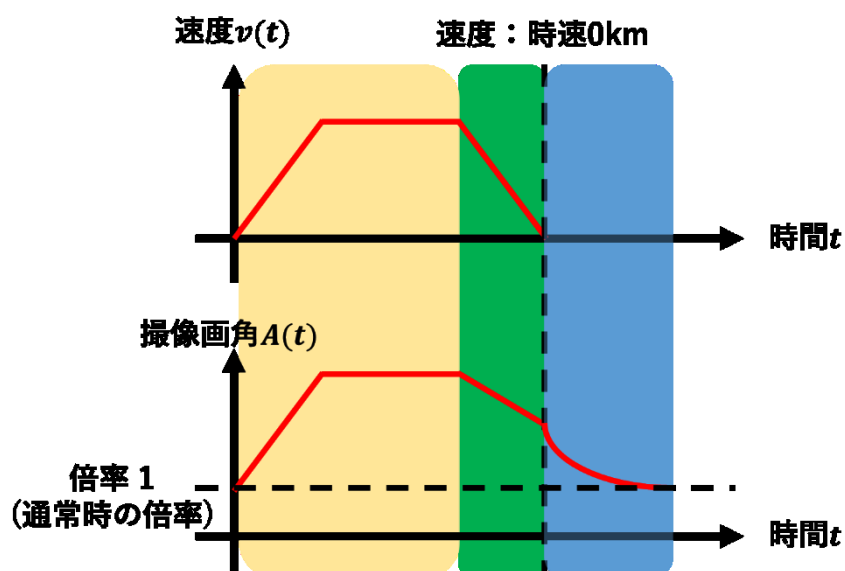


Figure 15: 実験Ⅱ 画角変化の考え方

4.4. 走行コース

走行コースは、停止するためのオブジェクトを 3 カ所に設置した日中晴天下の全長 1km の直線道路を作成した(Figure 16)。停止するためのオブジェクトは、**実験 I** とは違い、信号のみを用意し、250m ごとに設置した。信号は、被験者が停止するよう常に赤信号になっている。また、信号が変わるタイミングを**実験 I** では、信号手前で完全停止してから 4 秒後に切り替わるように設定していたが、被験者によって走行速度が異なり、実験時間が被験者間で大幅に変化するのを防ぐため、走行速度が速い被験者ほど信号での待ち時間を長くした。走行速度は、**実験 I** と同様に、最大速度が時速 60km 程度までしか上がらないように設計した。Figure 17 は、実際に**実験 II** で用いた映像である。

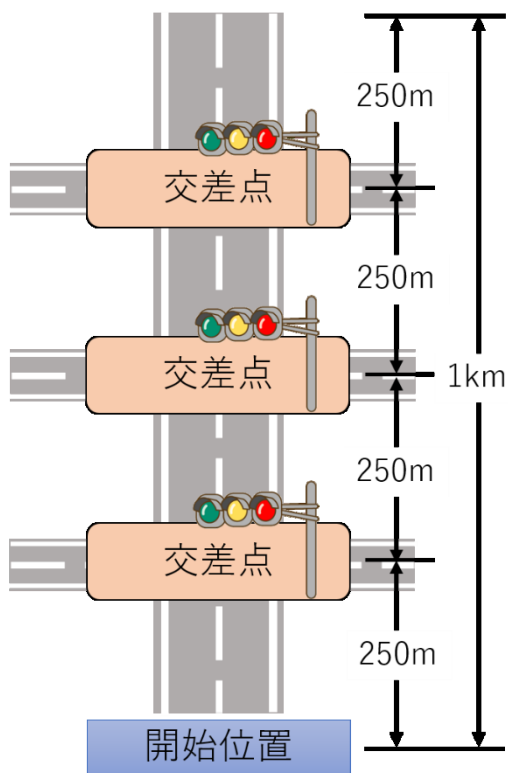


Figure 16: 実験 II で使用したコース



Figure 17: 実験 II 実験映像

4.5. 実験手順

連続する 4 試行を 1 セッションとし、1 実験で 7 セッションを行った。最初の 1 セッション 4 試行は練習試行として扱い、残りの 6 セッション 24 回分を本試行とした。また、4 通りの刺激があり、被験者間と被験者内で順序効果を打ち消すように割り当てた。1 試行を 100 秒（ゆっくり丁寧に走行しても 3 度の停止箇所を通過する時間）に設定し、試行間には 20 秒の評価時間を設け、その間に直前の試行における「不快感」、「操作感」、「走行感」の 3 つの評価項目を 0～10 の数値尺度を口頭で回答させた。また、セッション間には 2 分の休憩時間を設けた。

4.6. 測定項目

実験 I の時とは、「操作感」が「運転のしやすさ」に、また、走行感の説明が変わった。「不快感」、「運転のしやすさ」、「走行感」を 0～10 の 11 段階とし、各段階が等間隔と感ずるように評価させ、シミュレータ酔いに与える効果を検討した。被験者に各試行間で評価させた 3 つの項目の詳細を以下に示す。

「不快感」は、運転していた時に感じた気持ち悪さを答えさせた。まったく不快を感じなければ「0」、我慢できないような強い不快を感じれば「10」とした。

「運転のしやすさ」は、停車しようと思った位置に止めにくいと感じたりするような感覚を答えさせた。全く思い通りに停車出来ないと感じれば「0」、しっかり思い通りに停車出来ると感じれば「10」とした。

「走行感」は、自動車に乗って走行している感覚を答えさせた。前に進んでいるように全く感じなければ「0」、自動車を運転している時と同じ程度に加速・前進・減速を感じれば「10」とした。

4.7. 結果

男性 17 名、女性 1 名の計 18 名が 2 回ずつ実験を行ったため、データ数は 36 試行分あり、1 刺激のデータ数は 18 試行分である。

Figure 18 は、被験者が回答した不快感・操作感・走行感の平均と標準誤差を刺激別に表したものを示す。不快感・運転のしやすさ・走行感 3 つの項目において、刺激による差が見られなかったが、不快感、運転のしやすさでは通常の映像の方が良くなる傾向が見られた。

Figure 19 は、通常の何も施していない映像を先に行った被験者をまとめ、(a)が 1 回目(通常)の不快感、(b)が 2 回目(画角)の不快感を示したものである。Figure 20 は、画角を変化させる映像を先に行った被験者をまとめ、(a)が 1 回目(画角)の不快感、(b)が 2 回目(通常)の不快感を示したものである。それぞれのグラフ内のマーカーの形が丸、四角、三角で分けているのは、MSSQ の評価でそれぞれ酔いやすい、普通、酔いにくいを区別するためである。また、マーカーの塗りつぶしは、塗り潰されている被験者が運転頻度の高い被験者を、塗り潰されていない被験者が運転頻度の低い被験者を表している。Figure 19 の(a)(b)のグラフを比較すると、1 回目より 2 回目の不快感が全体的に低くなっていることが分かる。これは、Figure 20 の(a)(b)のグラフを見ても同じことが言える。

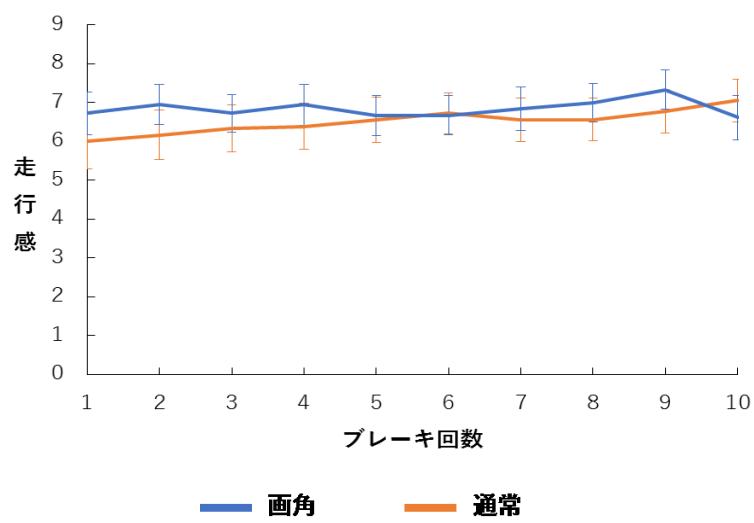
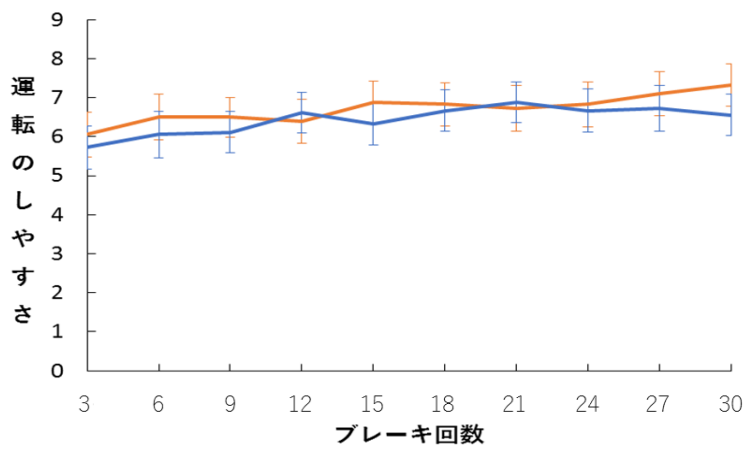
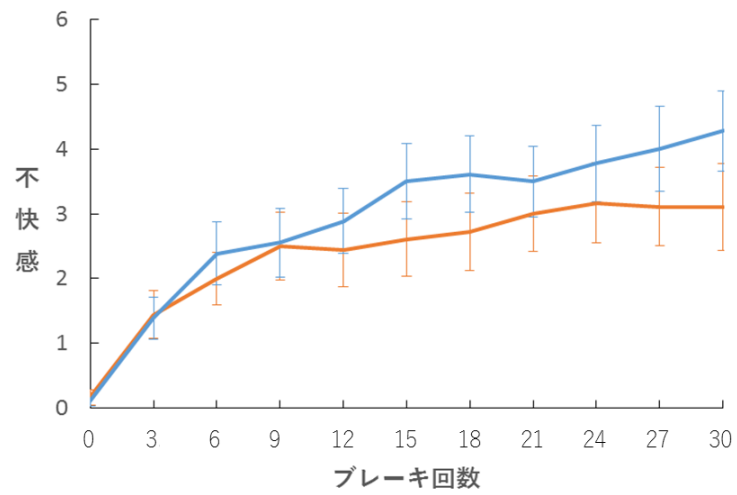


Figure 18: 実験Ⅱ心理評価値

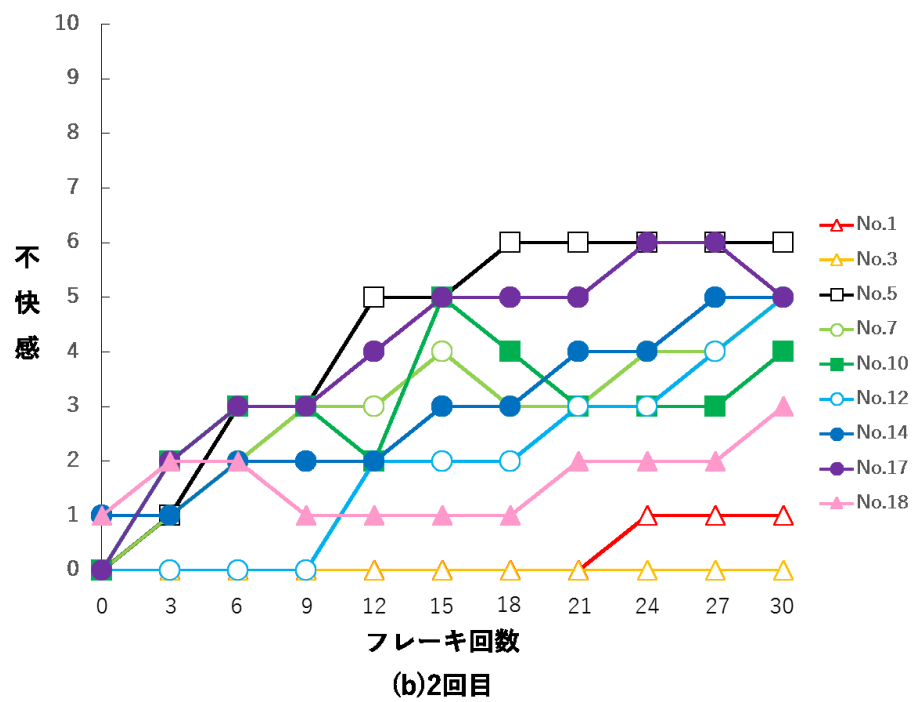
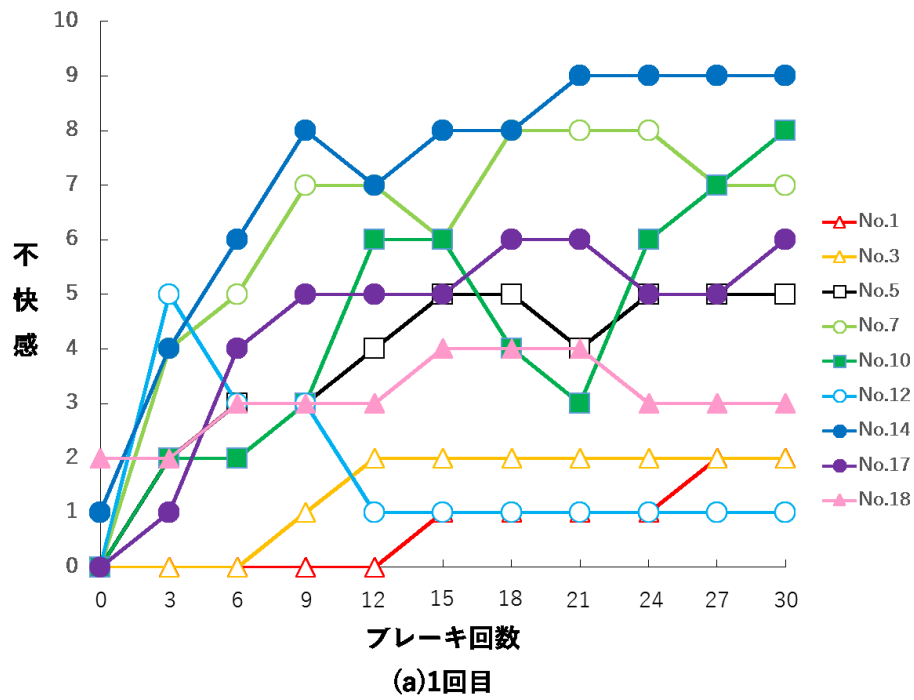


Figure 19: 実験Ⅱ 通常を先に行った被験者の不快感

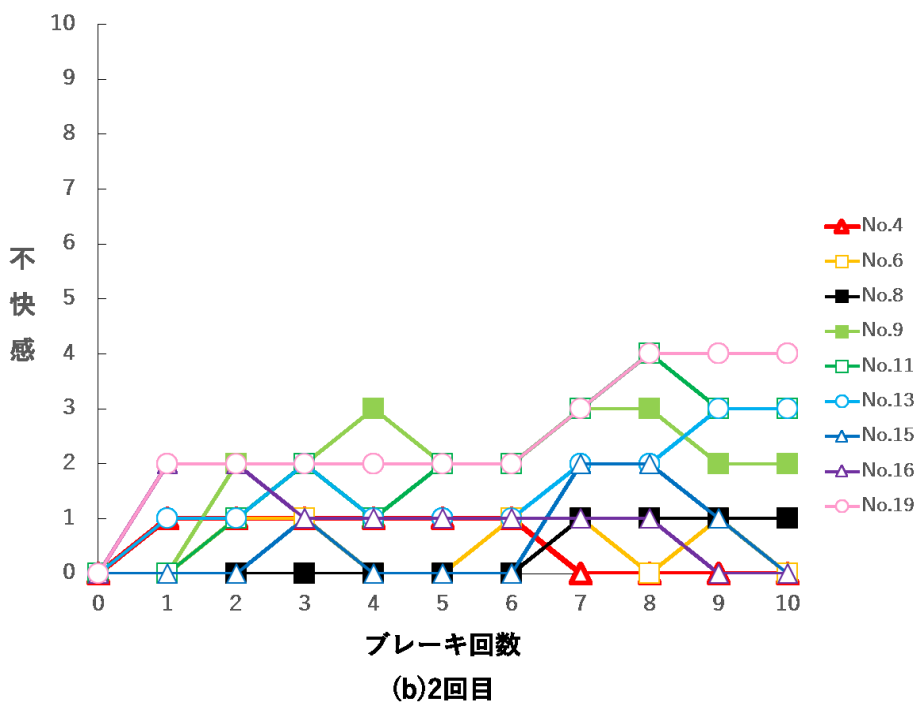
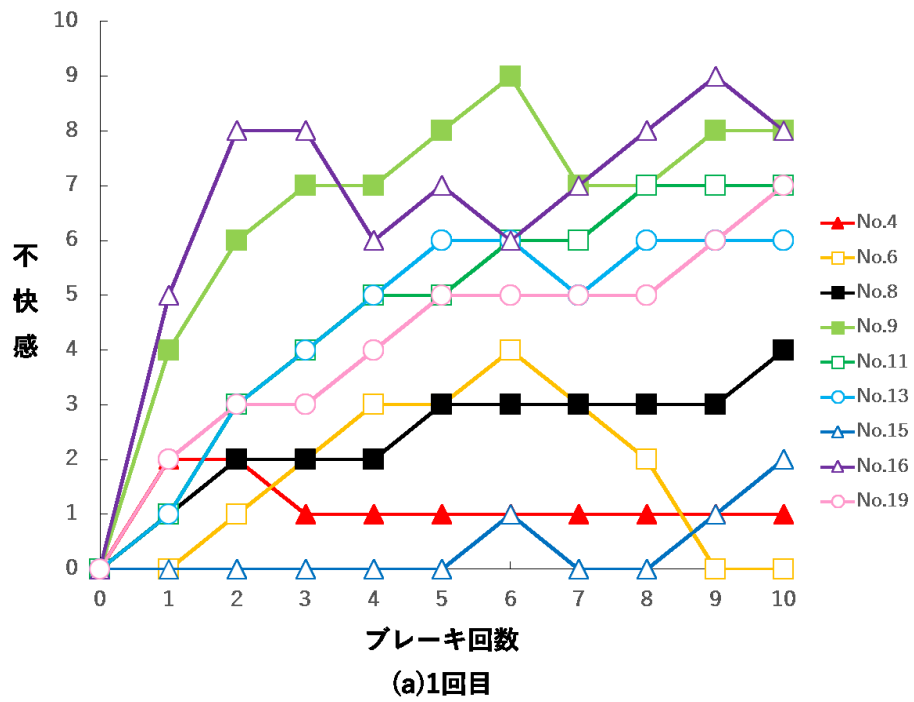


Figure 20: 実験Ⅱ 画角を先に行った被験者の不快感

5. まとめ・考察

実験Ⅰでは、速度に応じた映像提示法により加減速時のシミュレータ酔い抑制を図ったが、効果は見られなかった。効果が見られなかった原因を考察する。

実験パラメータは、本研究グループ内のメンバーで話し合い、実際に映像を確認しながら様々なパラメータを試し、検証を行った上で決定したが、撮像画角やカメラ間距離の変化の設定が適切にできておらず、不快感の低減にはつながらなかった可能性が原因の一つとして考えられる。低速時にシミュレータ酔いを生じやすいため、式(2)(3)を用いたが、この式の設定に問題があったとも考えられ、考え直す必要がある。撮像画角の変化が大き過ぎると映像があからさまに変化することや速度の感覚が変わってしまう問題があり、撮像画角の変化が小さすぎると映像の変化に気付けない可能性があり、本実験で用いた最大 1.1 倍程度が最適だと判断したが、更なる検証が必要である。カメラ間距離に関しては、最大で 0.1 倍の 6.5mm 程まで近づける変化を与えているが、仕組みを知っている実験者は違いに気付いても、被験者の多くは気付いていなかった可能性があげられる。カメラ間距離の変化による奥行きの変化は、4～5m 以内の物体に強く作用するが、外の景色のほぼすべてのモノがその範囲の外にあるため感じにくかったかもしれない。しかし、これ以上変化の大きさをつけることは難しいため、カメラ間距離は手法から見直す必要がある。

通常の何も施していない刺激での加減速時の不快感が弱かったことも原因として考えられる。その結果、あまり違いを感じられず結果に表れなかった可能性も考えられる。

運転経験別に解析を行ったところ、運転経験の少ない人は撮像画角やカメラ間距離を変化させることで、少しではあるが不快感を低減できる可能性を見出した。しかし、運転経験の豊富な人はこれらを変化させることによる効果を得ることはできなかった。また、停止位置の解析で、撮像画角またはカメラ間距離のみを変化させた刺激よりも、両方変化させた刺激で分散が大きくなる結果となった。これは、撮像画角とカメラ間距離の両方を変化させたことにより、より大きな奥行き感の変化を感じてしまい、運転に影響が出た可能性が考えられる。運転経験の豊富な人にとっては、奥行き感の変化を感じられたこと以上に、見慣れない映像に違和感を覚えて、不快感を低減できなかったと推測する。

実験Ⅱでは、被験者に長時間運転させ、通常の何も施していない映像と撮像画角を変化させる映像による不快感の蓄積を比較したが、差は見られなかった。これについて考察する。

ほとんど全ての被験者が、1 回目より 2 回目の方が映像刺激の順番に関係なく不快感を低く評価している。これは、1 回目は運転に集中するため真っ直ぐ前を見て運転

していたが、同じコースを何回も運転するに連れ2回目の運転に慣れが生じ、外の景色を見る余裕が出来たと考える。運動残効は同じ個所を見続けることでより強く感じることから、運動残効による映像の変化が2回目の方が小さくなり不快感が低くなっている。また、映像の動きが速ければ速いほど運動残効を強く感じる。しかし、2回目で1回目よりも速度を落として走行する被験者が数人見られた。これにより、運動残効が小さくなり不快感が低くなったと考える。今後の展望として、走行速度に関して指定する必要がある。また、本実験では、視線計測を行っていないが、計測を行い視線の動きと主観評価を比較してみる必要がある。

本実験では、加減速時のシミュレータ酔いの抑制を目指したが、良い結果は得られなかった。しかし、実験計画を正しく立てて実験を行うことで、運動残効を打ち消すことによるシミュレータ酔い抑制の可能性もあるかもしれない。

6. 謝辞

本研究を行うに当たり、有益な御指導、助言を頂いた井須尚紀教授、河合敦夫准教授、小川将樹助教授、ならびに日頃からお世話になりました吉永みゆき事務員に心より感謝いたします。また多くの議論を行いながら共に研究を行った古居侑也氏、伊藤大河氏、永川智泰氏、岩瀬友希氏、辻田光希氏に感謝いたします。そして不快感を伴う実験にもかかわらず協力していただいた被験者の方々、様々な意見交換や討論を交わした諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 井須尚紀;乗物酔における視覚の役割, 日常臨床に役立つ めまいと平衡障害, 162-169, 2009
- [2] 高桑義直, 栗屋伊智郎, 後藤真弘, 久保壮, 岡田卓三, 岡田幸一郎;シミュレータ酔い低減を目指したドライビングシミュレータの開発, 三菱重工技報 Vol. 46 No. 3, 38-42, 2009
- [3] 古居侑也, 西原みどり, 井上康之, 河合敦夫, 井須尚紀;遠心力に応じたモーションベースと映像の傾斜がシミュレータ酔いを低減する効果, FIT2016, 15-3: 403-404, (2016)
- [4] 山科貴史;遠心加速度に応じた映像傾斜がシミュレータ酔に与える効果, 修士論文, 2015
- [5] 伊藤健太郎;カーブ時の映像傾斜がシミュレータ酔を抑制する効果, 卒業論文, 2014
- [6] 堀磨伊也, 神原誠之, 横矢直和;低自由度モーションベースと没入型ディスプレイを用いた慣性力の再現によるテレプレゼンスシステムの構築, TVRSJ, 283-292, 2011
- [7] 泉重郎, 「車載機器の複合環境試験-概要及び試験の考え方-」, ESPEC 技術情報誌 No9, 7-9, 1997
- [8] 樋口健治, 横森求「自動車工学 第二版」東京電機大学出版局, 2011

付録 シミュレータに用いた計算

車の仕様

本田技研工業株式会社の CIVIC2.0L DOHC i-VTEC を参考に設計

重量 1200kg

ホイールベース 2.7m

ステアリングの角度 $\pm 540^\circ$

アクセル・ブレーキのあそび 10%

車の速度の計算

実験Ⅱ・Ⅲは下記の式で計算されたものを使用。**実験Ⅰ**は、基本的な計算は同じで少しパラメータ等が異なるが、基本的に加速は実験の始まりしか行わないため記載していない。

参考文献[8]p119(5.19)を参考に設計

$$Limit = \frac{1}{1 + s * e^{-t*(V-V_{limit})}}$$

$$accel = \frac{Acc * Feng * Limit - \mu r * W - \mu a * FPA * V^2}{W + Weng} * G$$

$$creep = \frac{p}{1 + q * e^{r*(V-V_{creep})}}$$

$$brake = \mu b * Brk * G$$

$$Vt = V + ((accel + creep + brake) * delta)$$

Limit 速度制限用定数

<i>s</i>	最大速度制限計算用定数	4.0
<i>t</i>	最大速度制限計算用定数	2.16
<i>Vlimit</i>	最大速度目安【m/sec】	実験Ⅱ 8.8889 実験Ⅲ 16.666

accel アクセルペダルによる加速度

<i>Acc</i>	アクセルペダル踏み具合	0~1.0
<i>Feng</i>	エンジン最大駆動力【N】	7500
<i>μr</i>	ころがり抵抗係数	0.015
<i>W</i>	車総荷量【N】	12000
<i>μa</i>	空気抵抗係数【kg/m ³ 】	0.186
<i>FPA</i>	前面投影面積【m ² 】 (Front projection area)	2.04
<i>Weng</i>	エンジン荷量【N】	800
<i>G</i>	重力加速度【m/sec ² 】	9.80665

creep クリープ現象を再現する加速度

<i>p</i>	クリープ計算用定数	0.3
<i>q</i>	クリープ計算用定数	1.2
<i>r</i>	クリープ計算用定数	2.16
<i>Vcreep</i>	クリープ最大速度目安【m/sec】	1.666

brake ブレーキペダルによる加速度

<i>Brk</i>	ブレーキペダル踏み具合	0~1.0
<i>μb</i>	摩擦係数	0.7
<i>G</i>	重力加速度【m/sec ² 】	9.80665

delta 計算周期【1/sec】 1/500