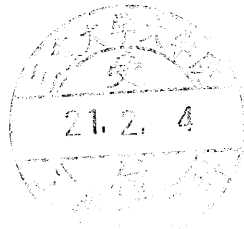


複写可

修士論文

車酔い発症を抑える 車載ディスプレイの開発



平成 20 年度修了
三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 情報工学専攻

辻 仁志

要旨

【目的】 近年の車載ディスプレイ装置の普及は、車内に便利さと快適さをもたらしている。しかし、後部座席での映像視聴の機会が増加することにより、車酔い発症者の増加が懸念される。そのため、車載ディスプレイ視聴により生じる車酔いを抑制する映像表示法の開発が必要とされる。映像視聴による車酔いの発症原因は、車の動きの情報が視覚に与えられないために、視覚情報と平衡感覚情報との間に矛盾が生じることにあると考えられる。そこで本研究では、感覚の矛盾を減少させ、車酔いを抑制することを目的に、車の動きの情報を視覚に与える映像表示法を考案した。そして、13種類の映像表示法について、実車実験により、映画を視聴した際の車酔い抑制効果を検証した。

【実験】 車の加減速、Yaw角速度、遠心力に対処した車酔い抑制対策を考案し、実車実験で被験者に視聴させた。これらの手法を比較するために、対策を施さない映像視聴、映像を視聴せずに乗車、についても同様の実験を行った。実験場所には、信号がなく交通量の少ない道路を選び、加減速対策の実験では、直線道路を20分間、カーブ対策、複合対策ではカーブの多い山道を21分間、8～10人乗りの車両で走行した。車載ディスプレイで被験者に映画を視聴させ、不快感を1分間おきに答えさせた。その際、不快感評価は整数値で、「0」を一切不快でない状態、「10」を吐く限界状態と考えてこの数値の間ができるだけ等間隔になるように答えさせた。

【結果】 被験者ごとに車酔いに対する感受性が異なることを考慮して、各実験条件において車酔い不快感に感受性の補正を加えた。補正後、範疇判断の法則にThurstoneのケースⅢを適用し、評定尺度から距離尺度値に変換した。対策を施さない時の不快感と比較して、普通乗車時の不快感まで減少効果が得られた時を対策の改善率100%とすると、加減速対策では69%、カーブ対策では33%、複合対策では74%の改善結果を得た。

【考察】 それぞれ考案した映像表示法により、平衡感覚と視覚情報の矛盾が減少され、車酔いが抑制されることを確認した。これよりYaw角速度、前後・遠心加速度の情報を視覚に与えることで、感覚情報の矛盾を打ち消し、車酔いを抑制することができたと考える。本研究の車酔い対策は視覚刺激により知覚される自己運動感覚には個人差があるので、個人ごとに車酔い対策の映像の動きの大きさを最適化できれば、更なる抑制効果が期待される。

目次

第 1 章	序論.....	1
1.1	はじめに.....	1
1.2	本研究の目的.....	2
第 2 章	車酔い抑制対策案の基本的な考え方.....	3
2.1	対策案.....	3
2.2	実車実験.....	4
2.3	車酔い不快感の解析.....	8
第 3 章	加減速時に生じる車酔いに対する対策.....	12
3.1	対策案.....	12
3.2	実車実験.....	16
3.3	実験結果.....	17
第 4 章	右左折時に生じる車酔いに対する対策.....	21
4.1	対策案.....	21
4.2	実車実験.....	26
4.3	実験結果.....	28
第 5 章	右左折, 及び加減速時に生じる車酔いに対する対策.....	34
5.1	対策案.....	34
5.2	実車実験.....	37
5.3	実験結果.....	39
第 6 章	考察.....	45
	謝辞.....	49
	参考文献.....	50
	学会発表リスト.....	51

—付録—	52
1. 予備実験	53
1.1 車両を用いた予備実験.....	53
1.2 回転装置(コリオリマシン)を用いた予備実験.....	56
2. 船酔い抑制対策.....	60

第 1 章 序論

1.1 はじめに

一般的に車酔いなどの乗り物酔いと呼ばれる動揺病(motion sickness)とは、船、馬車、鉄道、自動車、航空機などの交通機関が発達する中においても変わらず存在しつづけており、小児から大人に至るまで多くの人々に耐え難い苦痛を与えている。

近年、カーナビや車載ディスプレイの普及により、走行中に車内でTVゲームや映画鑑賞をする機会が増えてきた。しかし、車内でTV視聴をすることで車酔い発症者の増加が懸念される。走行中に車内でTV視聴をした場合、TV視聴しない時と比較すると、車酔い不快感が2倍悪化するということが分かっている^[1]。

走行中のTV視聴が車酔いを発症させる原因として、一般的に『感覚矛盾説』が知られている^[2]。感覚矛盾説によると、前庭器官情報(半規管、耳石器)、視覚情報(視器)、体性感覚情報(自己受容器)からの情報が矛盾することより、動揺病が発症すると考えられている。

前庭器官とは加速度、及び回転角速度を感知する受容器から構成され、主に人間の平衡感覚を感知するための働きをする。前庭器官は半規管及び耳石器内にある卵形嚢、球形嚢中の有毛細胞によって構成されている。半規管では3軸の回転角加速度を感知し、卵形嚢、球形嚢では直線加速度を感知している。

走行中、前庭器官は車の急発進や急停止、カーブを走行することにより刺激を受ける。しかし、視覚器官はディスプレイを注視することにより車の動きの情報を感知できない。そのため、前庭器官と視覚器官の間で競合が生じ、車酔いを発症すると考えられている。

感覚矛盾により生じる車酔いを抑制する方法として、耳の後部に電気刺激を加えることで前庭器官を刺激し、前庭器官情報を視覚情報と一致させる方法^[3]が考えられるが、車内でこの対策を行うのは困難である。また、視覚に車の動きの情報を与えることで視覚情報を前庭器官情報に一致させることで車酔いを低減させる手法が提案されている。Griffin & Newman^[4]は、車の前方にカメラを取り付け、その映像をディスプレイに表示する装置を使用し、乗員に走行しながらその映像を視聴させ、車酔い低減効果の検証を行った。しかし、車酔い低減効果は得られず、逆に車酔いを悪化させた。これはカメラやディスプレイが振動したためと考察している。また車の加減速時に生じる車酔いの抑制対策として、走行中の車載TV視聴時に、車のピッチ運動によりディスプレイの上下に移動した分だけ、TV映像を反対方向に移動させて表示することで、乗員とディスプレイとの相対運動をキャンセルする手法が報告されている。静止画をTV映像として表示した際には、有意な車酔い抑制効果が見られた^[5]が、動画を表示させた際には有意な車酔い抑制効果が得られなかった^[6]。動画の視聴をした際には、動画の映像自体が上下移動しているのか、対策により上下しているのかを、乗員が知覚できなかったため、と考察している。

また、森本ら^[7]は、TV映像の表示部を縮小し、その周辺に車の運転に応じた動きをする映像を表示することで、視覚誘導自己運動感覚を発生させて感覚情報の矛盾を減少させ、車酔いを抑制する対策を考案している。これはカーブ時の対策のみであるが、車が右左折する際に生じる、Yaw角速度に応じて周辺映像を表示することで顕著な車酔い抑制効果を得ている。

1.2 本研究の目的

本研究では、車酔い発症の原因と考えられる、『感覚矛盾説』に基づき、車酔い抑制対策案を考案した。この車酔い抑制対策は、走行中、TV視聴と同時に、視覚に車の動きの情報を運動感覚として与えることで視覚と平衡感覚の感覚情報の矛盾を失くし、車酔いを軽減させる、ということが基本的な考え方である。車の動きの大部分を前後加速度、遠心加速度、Yaw角速度が占めていることから、この3つを入力とした対策案を考案し、1)加減速時に生じる車酔い対策、2)右左折時に生じる車酔い対策、3)加減速時、及び右左折時に生じる車酔い対策、に分けて実車実験を行い、動揺病低減効果を検証した。

第2章 車酔い抑制対策案の基本的な考え方

走行中にTV視聴することにより車酔い（動揺病）を発症しやすくなる。そこで、車酔いを抑制するための映像呈示法を考案した。

また、考案した車酔い抑制対策の効果を検証するために行った実車実験の概要、およびデータの解析方法を第2章で説明する。

2.1 対策案

走行中、TV視聴による車酔いの発症メカニズムは感覚矛盾説により説明できる。人間の平衡器官は、車の加速や減速、カーブなどの刺激を受ける。それに対して、視覚器官は、ディスプレイを注視しているため、画面上での動きによる刺激を受ける。これより、平衡感覚情報と視覚情報の間に競合が生じ、動揺病が発症すると考えられる。

車酔い抑制対策として、TV視聴しながら視覚に運動感覚を与えるような映像をTV映像に付加することで視覚と平衡感覚の矛盾を失くし、車酔いを抑制する、というような映像呈示法を考案した。

車酔い対策を施した映像の概略図を図2.1に示す。これは、ディスプレイ映像表示部の縦横80%に縮小した大きさにTV映像を表示し、残りの外側20%（図2.1の橙色部分）に車酔い対策の映像を表示した。この映像表示は図2.2の様な仮想空間を用いた。ディスプレイの垂直撮像画角は $60[\text{deg}]$ 、水平撮像画角 $\theta_0=73.8[\text{deg}]$ と定めた。視点からTV映像が映っているスクリーンまでの距離を単位（1[L]）とした。車酔い対策表示部には、車の動きと一致した自己運動感覚を与えるような背景映像を与えることで、TV映像を視聴しながら視覚に車の動きの情報を与えることで感覚の矛盾を減少させようとした。

車酔い抑制対策として、加減速時に生じる車酔いに対する対策を第3章、カーブ時に生じる車酔いに対する対策を第4章、加減速時とカーブ時の複合対策を第5章で説明する。

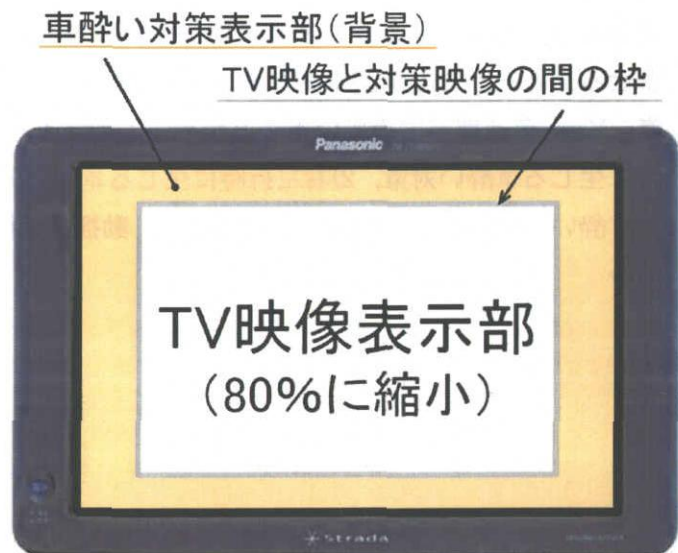


図 2.1 対策映像の詳細図

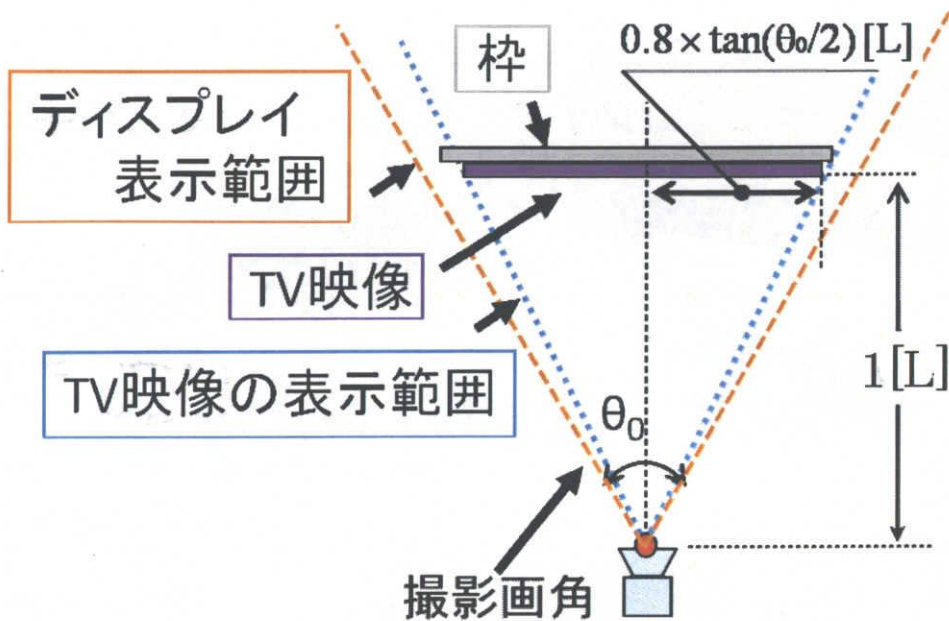


図 2.2 車酔い対策の仮想空間（上から見た図）

2.2 実車実験

2.2.1 実験車両

2007年はトヨタ自動車のハイエースグランドキャビン（実験車1）、2008年はトヨタ自動車のアルファード（実験車2）を使用して実車実験を行った。

実験車1は4列シートの10人乗りの車（全長5,380[mm],幅1,880[mm],高さ2,285[mm]）で、実験では1~5名の被験者を2~4列目シートに、実験車2は3列シートの7人乗りの車（全長4,800[mm],幅1,805[mm],高さ1,935[mm]）で、実験では1~4名の被験者を2~3列目に座らせて走行した。

車載TV（横24.3[cm],縦13.7[cm],ディスプレイの解像度は800×480[dot]）は、被験者からの距離が約60[cm],水平視角が約23[deg]の位置に設置し、走行中、及び停車中に被験者に視聴させた。TV視聴はストーリー性の高い映画を選び、音声は実験車1では車両の後方上部、実験車2では後方下部に取り付けられた2台のステレオスピーカーから再生した。実験車1の車両、車内の様子を図2.3, 2.4, 実験車2の車両、車内の様子を図2.5, 2.6に示す。また3軸の加速度と3軸の角速度を出力するセンサを実験車の後部座席下に設置した。



図 2.3 実験車 1—ハイエース



図 2.4 実験車 1 の車内の様子—ハイエース



図 2.5 実験車 2—アルファード



図 2.6 実験車 2 の車内の様子—アルファード

実車実験での運転は、実験の試行ごとの運転のばらつきを最小限に抑えるために、1つの実験につき1人の運転手に固定して実験を行った。

2.2.2 実験走路

実車実験では2種類の走路を使用した。実験コース1は信号のないカーブの多い山道で、1周約3分のコースを計7周、約21分間走行した(図2.7, 図2.8)。実験コース2は、信号がなく、直線が長く続く1周約4分のコースで、これを計5周、約20分間走行した(図2.11)。このコースは加減速時に生じる車酔いの抑制効果を検証する実験で使用したため、ほぼ90[deg]に左折する場所が4か所あるが、Yaw角速度、遠心力が生じないようにゆっくりとカーブをし、直線の道では60[km/s]まで加速し、数秒間等速運動をした後、ほぼ停車するまで減速をし、再び加速をする、という運転を1周につき10回、計50回の加減速を行った。実験コース1を走行した際に生じた車のYaw加速度、前後加速度と遠心加速度、を図2.9, 2.10、実験コース2ではYaw角速度、遠心力はほとんど生じなかったため、車の前進加速度と遠心加速度を図2.12に示す。(車の動きのデータは実験終了後に実験車とは異なる車でデータ収録したため実験車のデータとは若干異なる可能性がある。)



図 2.7 実験コース 1 のカーブ例



図 2.8 実験コース 1 のコース図

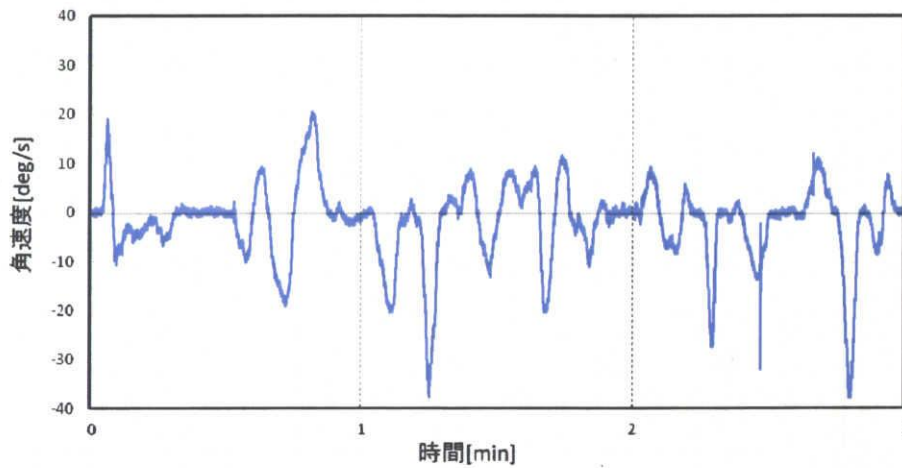


図 2.9 実験コース 1 の走行時 (1 周) に生じる Yaw 角速度

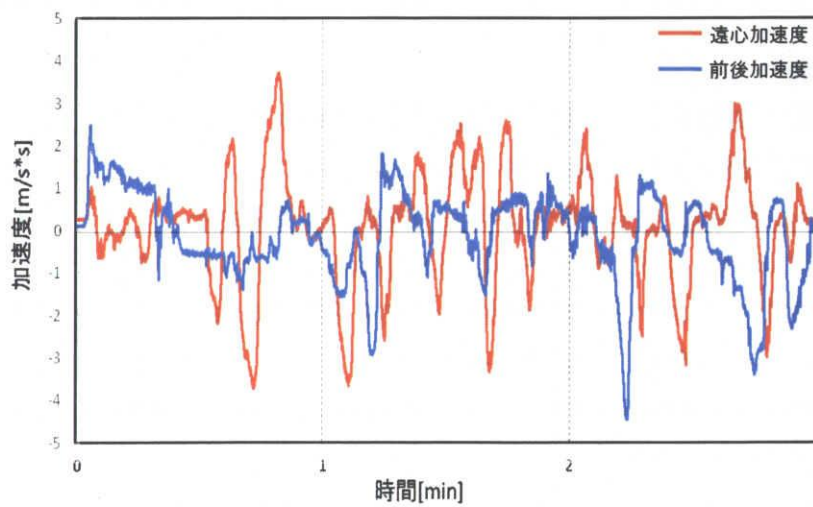


図 2.10 実験コース 1 の走行時 (1 周) に生じる前後, 遠心加速度



図 2.11 実験コース 2 のコース図

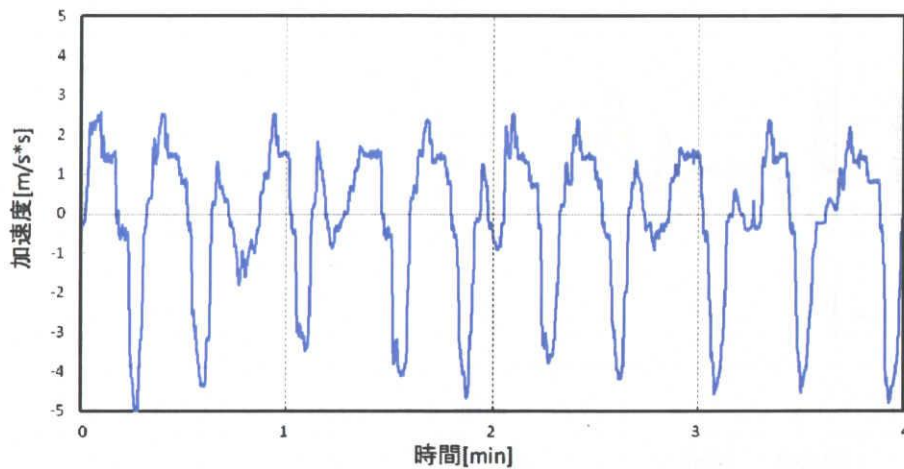


図 2.12 実験コース 2 の走行時 (1 周) に生じる前後加速度

2.2.3 被験者

被験者は健康な 20 歳前後の男女で、実験前に実験の主旨・内容、手順、評価方法を説明し、書面による承諾を得た上で実験を行った。承諾を得る上で被験者に確認したのは、

- ・ 実験中に動揺病が生じ不快感が伴う可能性が予見される。
- ・ 被験者の希望により、実験への参加を延期あるいは中断できる。
- ・ 実験を続行できないと感じた時はいつでも中断できる。
- ・ プライバシーの保護、などであった。

実験中に被験者の不快感が高まり、これ以上実験が続けられない状態になった場合はすぐに停車し、実験を中断した。

なお、本実験は、三重大学院工学研究科・工学部実験倫理委員会の承認を得て実施した。

2.2.4 計測項目

動揺病による不快感強度を計測し、その評価には評定尺度法による主観的評価を用いた。大学を出発し、実験場所に到着した後、車を停めたまま10分間映画を視聴させ、その後走行しながら映画を視聴させた。その際、走行開始10分前と5分前、また走行開始時と開始から1分ごとに不快感を答えさせた。不快感は0(不快感が全くない状態)~10(これ以上続けると吐きそうという限界状態)までの11段階で評価させた。その際、0~10の評価値が等間隔になるように指示した。また不快感強度が「10」に近くなった被験者は続行できるかを尋ね、希望に応じて下車させた。

不快感の計測のほか、呼気二酸化炭素分圧と心臓自律系活動、車体運動も計測した。

2.3 車酔い不快感の解析

2.3.1 感受性補正

不快感の強度を比較するために、各呈示条件の間で被験者の感受性の偏りをなくす必要がある。そこで感受性補正を行った。ここで感受性を求める手順を説明する。

- ① 図 2.13 のように縦軸に不快感、横軸に時間を取り、各被験者の1試行毎に原点を通る回帰直線(赤)を推定し、その傾きを求めた。
- ② 各刺激の種類毎に全被験者での平均傾きを求め、①を平均値で除して正規化した。
- ③ 各刺激で得られた②より被験者の平均傾きを求めた。
- ④ これを各被験者毎の感受性とした。この値が高いほど感受性が高いことを表す。

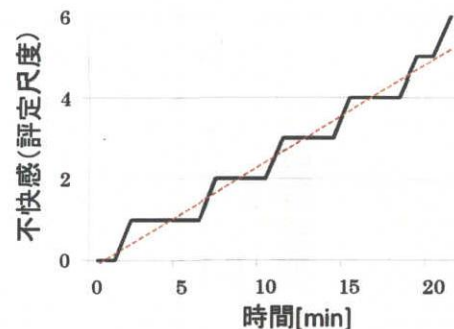


図 2.13 不快感推移(1試行)

まず解析に使用するか否かを決定するため、Grubbs-Smirnov 棄却検定¹⁰⁾を利用するとともに、どの呈示条件に対しても全く酔わない被験者を感受性 N (No) とし、解析から除外した。次に被験者の感受性の分布から昇順にソートし、試行数がほぼ 3 等分になるように感受性によって L (Low), M (Middle), H (High) の 3 段階にクラス分けした。そして各実験全体の L, M, H の比と呈示条件の L, M, H の比が等しくなるように各呈示条件・各時刻の不快感評価値の分布に重み付けを行った。この重み付けをした分布を使い、次の距離尺度化を行った。

2.3.2 距離尺度化

被験者は評定尺度法で不快感の強度を評価しており、これは順序尺度であるため定量的なデータ処理をすることができない。そのため、間隔尺度に変換する必要がある。これを距離尺度化という。距離尺度化を行うにあたり範疇判断の法則(条件B)⑨を適用した。これはThurstone^[10]のモデル(ケースⅢ)に相当する。

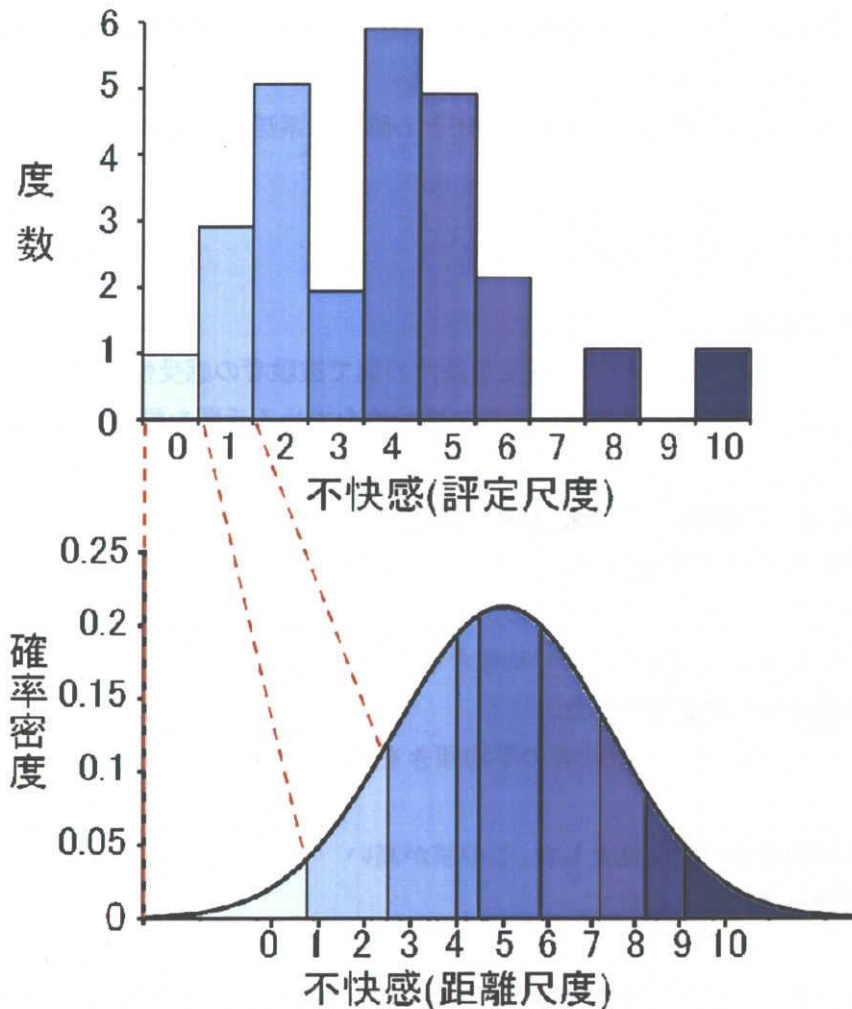


図 2.14 距離尺度化の説明 (I)

図 2.14 はある条件、ある時刻の評定尺度による不快感の分布を取り出して、距離尺度に変換する過程を表したものである。各条件の各時刻における刺激に対する反応(不快感強度)は、距離尺度で表される心理学的連続体上で正規分布すると仮定する。各カテゴリーの評定尺度の比率に等しい確率を持つように、心理学的連続体上で各カテゴリーの距離尺度を標準正規分布の z 値を用いて与えた。ここで、確率の誤差に対する z 値の変動が分布の平均値付近とそれから離れるところでは著しく異なってくる。そこで、Muller-Urbanの荷重を用いて実測値に対して重み付けをすることで、 z に対する効き方を修正した。

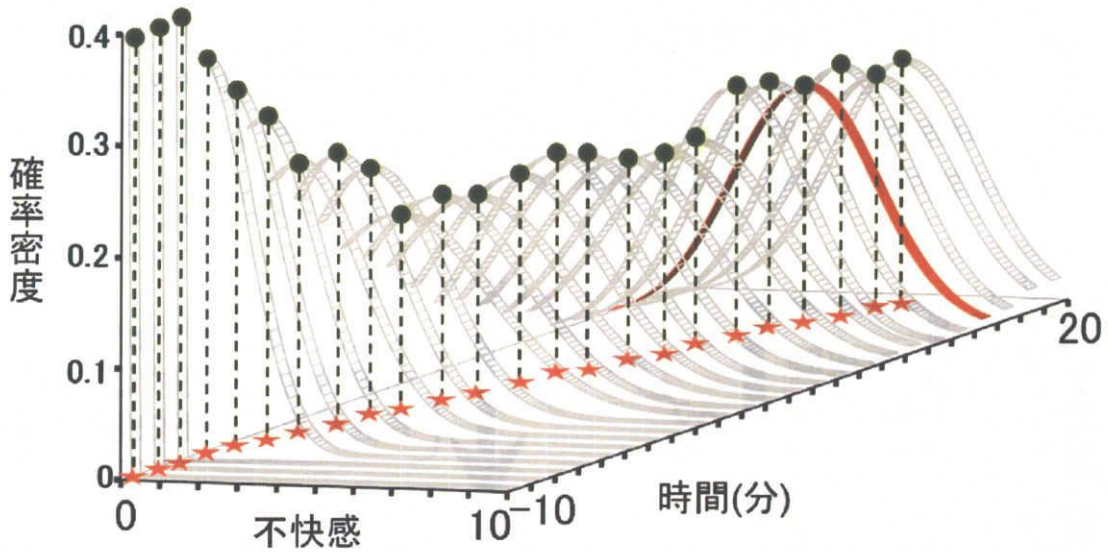
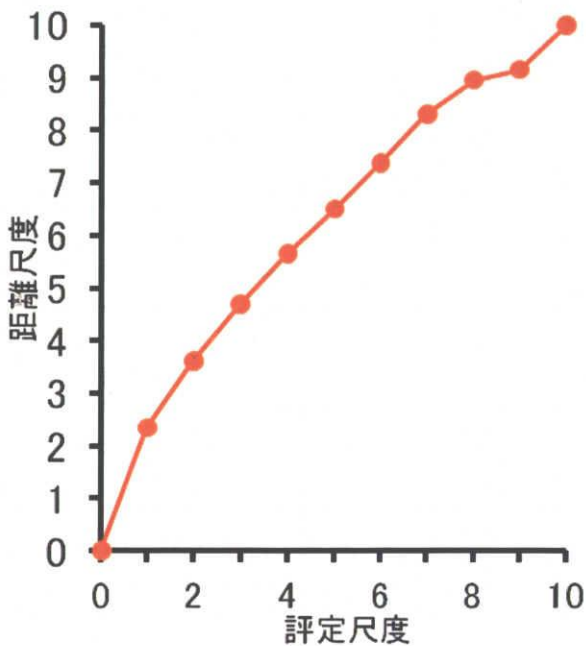


図 2.15 距離尺度化の説明 (II)

その後、正規分布の平均値をその時刻の不快感強度とし、図 2.15 に示すように各時刻について算出した。図 2.15 の★の部分各時刻の不快感強度の平均値である。

次章以降で実験結果として示すグラフは、不快感強度の平均値を呈示条件別に、走行開始から 1 分毎にプロットしたものである。



なお、図 2.16 は評定尺度と各カテゴリーの平均値を距離尺度で表したときの対応を表したグラフである。距離尺度の 0~1 の間隔が他の区間に比べ広いのは、被験者が不快感強度「1」と答えるのにためらいがあるからと考えられる。また、「全く不快感を感じていない状態」から「少しでも不快感を感じた」と自覚するまでのしきい値が高いためと考えられる。

図 2.16 評定尺度 vs 距離尺度

2.3.3 車酔い抑制改善率

対策案の車酔い抑制効果を表すために、対策案の改善率を定義した。感受性補正後に、距離尺度化して、各実験条件ごとに得られた平均不快感強度の時間推移を最小二乗法により原点に直線回帰した。TV 視聴時の回帰直線の傾きが、TV 視聴なしの普通乗車時の傾きまで抑えられた時を改善率、100%と定義した（図 2.17）。

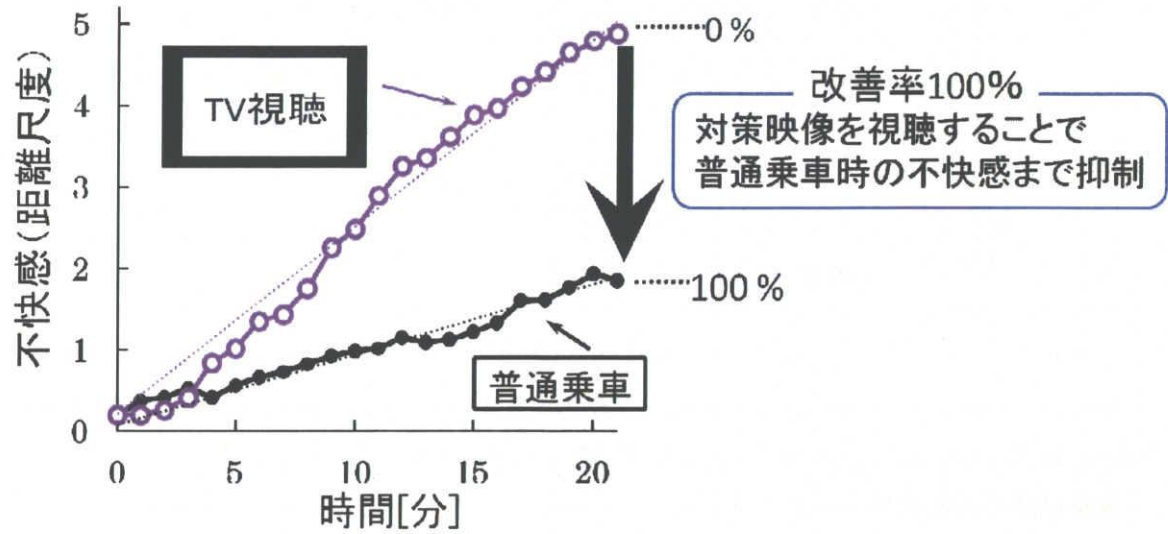


図 2.17 改善率の概要図

第3章 加減速時に生じる車酔いに対する対策

車酔いは加速時や減速時、またはカーブ時に発症しやすいと言われている。第3章では加減速時に生じる車酔いを低減する対策案と、実車実験の結果から対策案の有効性を検討した。

3.1 対策案

加減速時に生じる車酔い対策を3種類考案した。

3.1.1 加減速対策1

TV映像の周辺に白黒格子縞の映像を上下左右の4面にトンネル状に表示させた。車の加速度に応じて、周辺映像を前後に移動させることで視覚に自分が動いているという視覚誘導自己運動感覚（リニアベクション）を発生させた。加速時は前向きのリニアベクションを、減速時は後ろ向きのリニアベクションを発生させた。



図 3.1 加減速対策1の概略図

対策案1は図3.2のような仮想空間を用いている。前向きの加速度 $\alpha_x(t)$ [m/s²] に比例した速さで周辺映像を前後に移動させた。周辺映像の（前後の）移動速度を $v_f(t)$ [L/m] とすると、 $\alpha_x(t)$ と $v_f(t)$ の関係式は(3.1)で表される。

$$v_f(t) = -k_f \times \alpha_x(t) \quad (k_f : \text{比例係数}) \quad (3.1)$$

また、加速時は手前に映像が迫っている感覚を与えるため背景を伸長（図3.3）、減速時は遠方に映像が遠ざかる感覚を与えるために背景を伸縮させた（図3.4）。映像の伸縮度合い $r(t)$ は、式(3.1)の様に車の加速度に比例させた。

$$r(t) = \exp\left(\frac{\alpha_x(t)}{k_r}\right) \quad (k_r : \text{比例係数}) \quad (3.2)$$

比例係数は予備実験により k_f は 0.24, k_r は 3.0 と定めた。

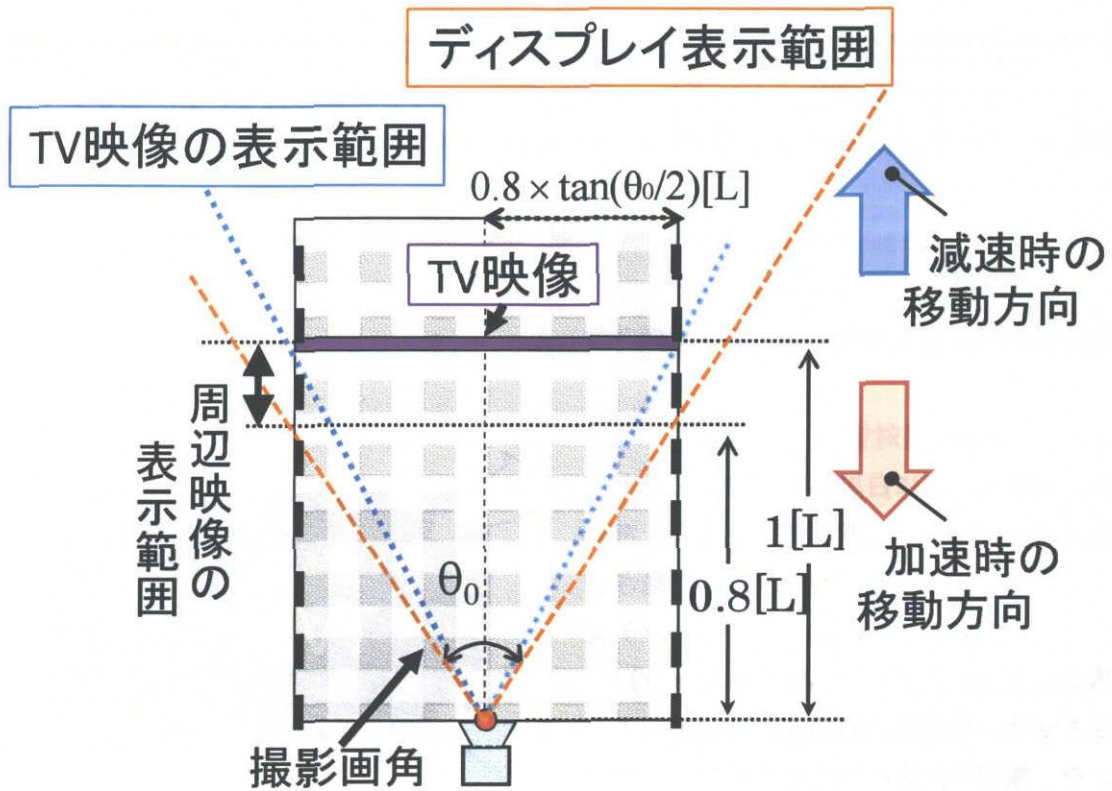


図 3.2 対策1の対策モデルを上から見た図



図 3.3 加速時の映像



図 3.4 減速時の映像

3.1.2 加減速対策 2

加減速対策案 2 は前後へ流れる背景映像を見せることでリニアベクションを与える手法である。加速時は背景映像を視点に近づけることで前向きのリニアベクションを、減速時は背景映像を視点から遠ざけることで後ろ向きの



図 3.5 加減速対策 2 の概略図

リニアベクションを発生させた。前向きの加速度 $\alpha_x(t)$ [m/s²] に比例する速さで周辺映像を移動させた。

背景の前後の移動速度を $v_f(t)$ [L/m] とすると、 $\alpha_x(t)$ と $v_f(t)$ の関係式は (3.3) で表される。比例係数 k_f は予備実験の結果、0.10 と定めた。

$$v_f(t) = -k_f \times \alpha_x(t) \quad (k_f : \text{比例係数}) \quad (3.3)$$

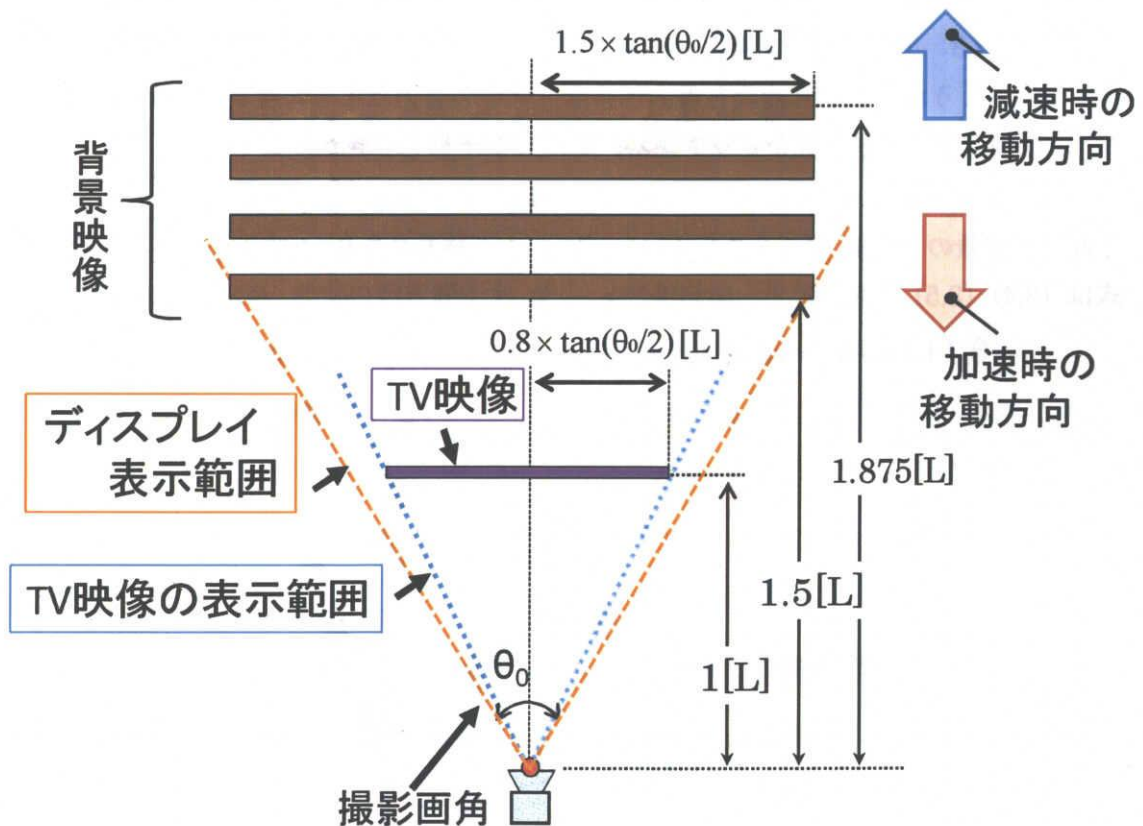


図 3.6 対策 2 の仮想空間を上から見た図

3.1.3 加減速対策 3

加減速対策案 3 は車の加減速感覚を傾斜感覚で与える手法である。加速度が持続するとき、前向き加速度と重力加速度の合ベクトルの方向を重力加速度方向と知覚し、身体が傾斜しているように感じる、と考えられる (図 3.7)。そこで車の加減速に合わせて周辺映像を Pitch 傾斜させた。また、加速時には背景映像を下向きに、減速時には上向きに移動させた (図 3.8, 3.9)。図 3.10 のような仮想空間を用いて映像表示をした。

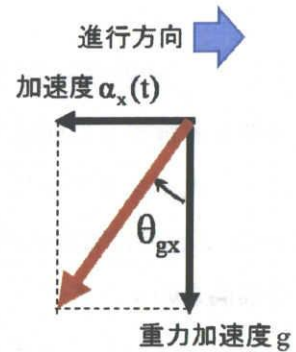


図 3.7 加速時の合成ベクトルの説明図



図 3.8 加速時の対策案 3 の映像



図 3.9 減速時の対策 3 の映像

図 3.7 のような前向き加速度と重力加速度方向との合力による角度 θ_{gx} [rad] を算出し、 θ_{gx} に比例させて背景映像をピッチ傾斜、および上下移動させた。

$$\tan \theta_{gx}(t) = \alpha_x(t) / g \quad \text{より} \quad \theta_{gx}(t) = \tan^{-1}(\alpha_x(t) / g)$$

となり、背景の Pitch 傾斜角を $\theta_p(t)$ [rad] , 上下移動角を $\theta_s(t)$ [rad] とするとその関係式は (3.4) (3.5) で表される。比例係数 k_p , k_s は予備実験の結果、0.58, 0.69 と定めた。

$$\theta_p(t) = -k_p \times \tan^{-1}(\theta_{gx}(t)) \quad (k_p : \text{比例係数}) \quad (3.4)$$

$$\theta_s(t) = -k_s \times \tan^{-1}(\theta_{gx}(t)) \quad (k_s : \text{比例係数}) \quad (3.5)$$

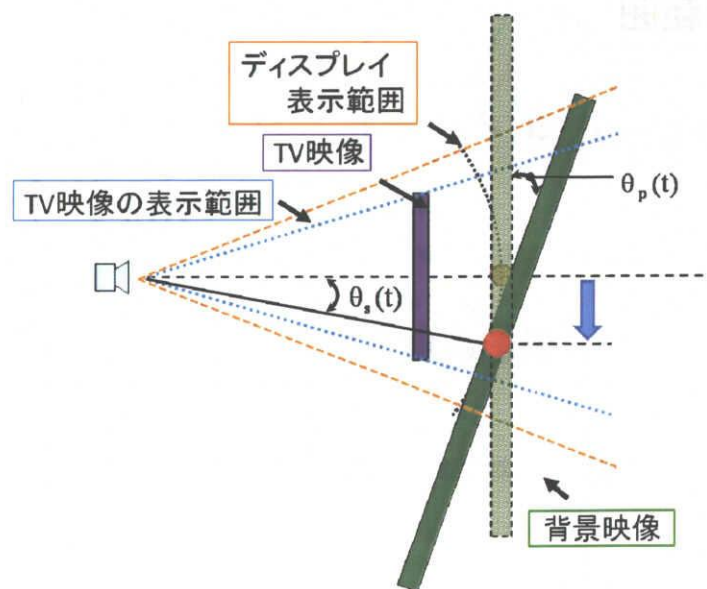


図 3.10 加減速対策 3 の仮想空間を横から見た図 (加速時)

3.2 実車実験

加減速対策の効果を検証するために3種類の実車実験を行った。

3.2.1 加減速対策実験 1

加減速対策1の車酔い抑制効果の検証をするため、実験1を行った。実験走路は実験コース1の山道を使用した。

3.2.1.1 実験環境

被験者は健康な20前後の男性39名、女性14名の計53名を用いて実車実験を行った。実験車は、2.2.1で説明をした実験車1の10人乗りのハイエースを用いた。

3.2.1.2 刺激条件

視覚刺激の条件は

- [1] 加減速対策1を施したTV視聴
- [2] 車酔い対策を施さないTV視聴
- [3] 何も視聴せずに普通乗車

の3つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表1に示す。

表1 実験1の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
加減速対策1	41
TV視聴	49
普通乗車	44
合計	134

3.2.2 加減速対策実験 2

加減速対策2, および3の車酔い抑制効果の検証をするため、加減速対策実験2を行った。実験走路は2.2.2で説明した実験コース2の直線道路を使用した。

3.3.2.1 実験環境

被験者は健康な20前後の男性33名、女性15名の計48名を用いて実車実験を行った。実験車は、2.2.1で説明をした実験車1の10人乗りのハイエースを用いた。

3.3.2.2 刺激条件

視覚刺激の条件は

- [1] 加減速対策 2 を施した TV 視聴
- [2] 加減速対策 3 を施した TV 視聴
- [3] 車酔い対策を施さない TV 視聴
- [4] 何も視聴せずに普通乗車

の 4 つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表 2 に示す。

表 2 実験 2 の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
加減速対策 2	46
加減速対策 3	47
TV 視聴	46
普通乗車	44
合計	183

3.3 実験結果

考案した 3 種類の加減速対策の効果を検証するために行った実験結果を示す。実験結果は 2.3 不快感の解析で説明したように、個人ごとの感受性に差があることを考慮し、まず各対策の試行数と個人ごとの感受性の高さに対応した補正を加えた。その後、範疇判断の法則に Thurstone のケースⅢを適用し、評定尺度から距離尺度値に変換した結果の不快感強度の時間推移をグラフに示した。また、実験条件ごとに走行中の不快感強度の時間推移の回帰直線の傾きと、改善率を示す。

3.3.1 加減速対策実験 1 の結果

図 3.11 は加減速対策実験 1 の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線、点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。3 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まった。加減速対策 1 は、TV 視聴時にと比べて不快感を抑制した。表 4 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。改善率は 26.2%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の順位和検定 (両側検定) で検定した結果、加減速対策 1 と TV 視聴との条件間に有意な差は見られなかった ($p > 0.05$)。

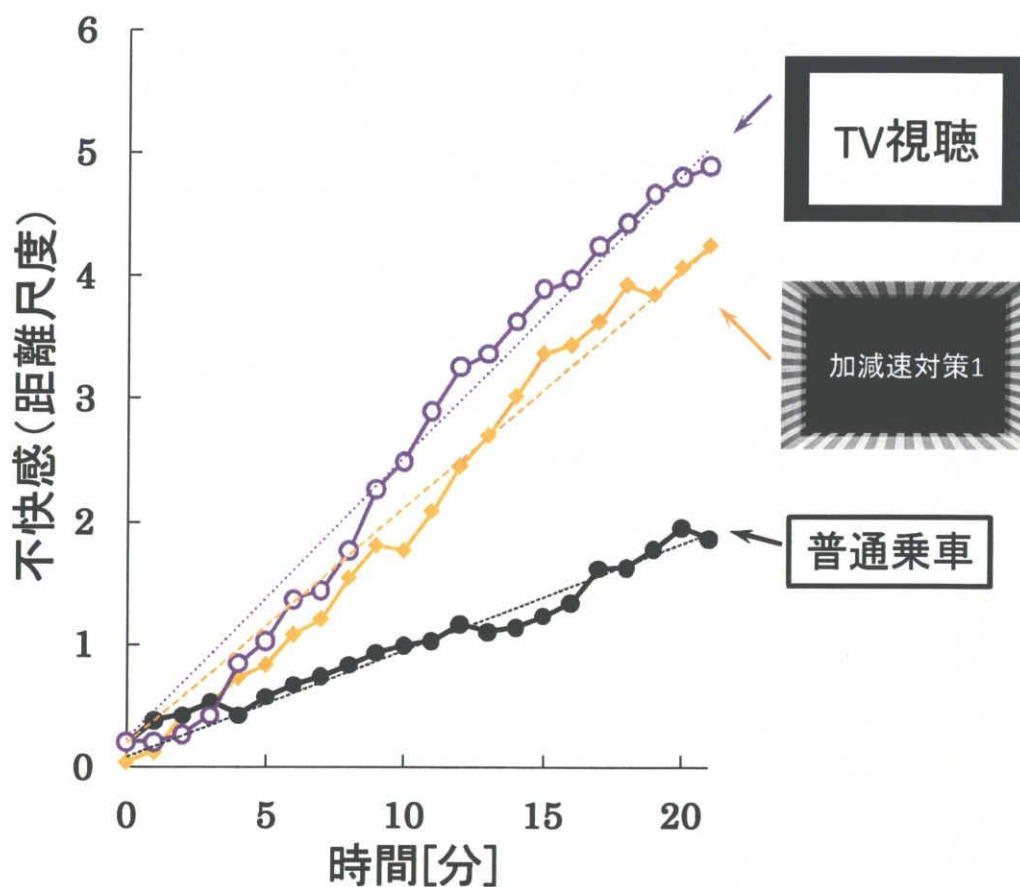


図 3.11 加減速対策実験 1 の車酔い不快感の時間推移

表 4 加減速対策実験 1 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
加減速対策 1	0.206	26.2
TV視聴	0.246	—
普通乗車	0.092	—

3.3.2 加減速対策実験2の結果

図 3.12 は加減速対策実験 2 の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線，点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。4 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。加減速対策 2, 3 は，TV 視聴時にと比べると不快感は抑制されていた。表 5 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。加減速対策 2, 3 の改善率 21.3%，67.1%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の順位和検定 (両側検定) で検定した結果、加減速対策 2 では TV 視聴条件に比べて $p < 0.05$ で有意な差が見られたが、加減速対策 3 では $p > 0.05$ で有意な差は見られなかった。

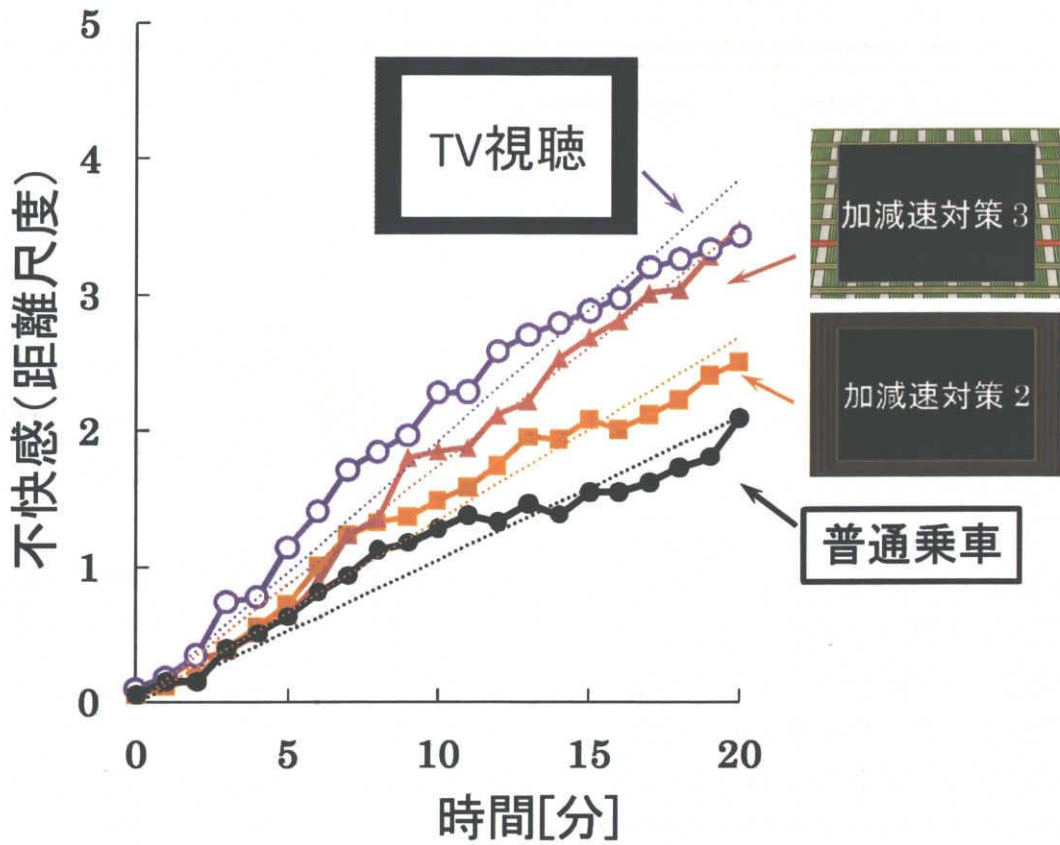


図 3.12 加減速対策実験 2 の車酔い不快感の時間推移

表 5 加減速対策実験 2 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
加減速対策 2	0.134	67.1
加減速対策 3	0.174	21.3
TV視聴	0.193	—
普通乗車	0.105	—

第 4 章 右左折時に生じる車酔いに対する対策

第 4 章では右左折時に生じる車酔いを抑制する対策案と、実車実験の結果から対策案の有効性を検討した。

4.1 対策案

右左折時に生じる車酔い抑制対策案を 6 種類考案した。

4.1.1 カーブ対策 1

カーブ対策 1 は車がカーブする時に生じる Yaw 回転に対処した呈示法である。画面を水平方向の中心を軸にして映像が車の挙動に合わせて鉛直軸回転 (vertical axis rotation) しているかのように見せることで、車が Yaw 回転している情報を視覚に与えた。

このような映像を表示するために図 4.2 のような仮想空間を用いた。これは仮想空間を上から見た図で車の Yaw 角速度に応じてカメラを回転移動させている。このカメラの動きを (4.1) 式に示す。 ω は Yaw 角速度 [deg/s], θ_0 はカメラの撮影画角 [deg], θ_{\max} はカメラの最大回転角 [deg], $\theta_r(t)$ はカメラの回転角度 [deg], k は時定数を示す。

$$\theta_r(t) = \begin{cases} \theta_{\max} \times (1 - e^{-\frac{\omega(t)}{k}})^3 : (\omega \geq 0) \\ -\theta_{\max} \times (1 - e^{-\frac{\omega(t)}{k}})^3 : (\omega < 0) \end{cases} \quad \dots (4.1)$$

時定数 k は予備実験を行った結果、11.0 と定めた。(4.1) の式のように Yaw 角速度 $\omega(t)$ に応じてカメラ位置を回転移動させることで、図 4.1 のように TV 映像が回転しているように見える (左カーブ時)。



図 4.1 カーブ対策 1 の映像例

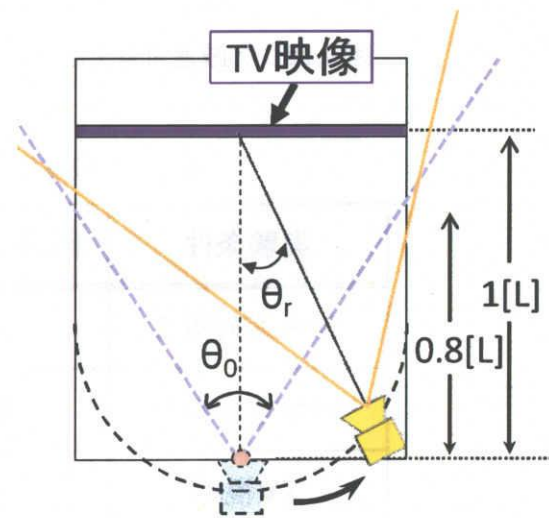


図 4.2 カーブ対策 1 の仮想空間を上から見た図 (左カーブ時)

4.1.2 カーブ対策2

車がカーブをする時には、Yaw 角速度とともに遠心加速度も生じている。そこでカーブ対策2は、Yaw 角速度に対処したカーブ対策1に加えて、カーブ時に生じる遠心加速度（遠心力）にも対処させた。

TV 映像の周辺に白黒格子縞の映像を上下左右の4面にトンネル状の映像を表示する仮想空間を用いた（図4.4）。遠心加速度に比例させて上下のトンネル部分の位置を左右に移動させることで、視覚に遠心加速度の情報を与えた。遠心方向の加速度を積分し、遠心方向の速度を算出している。式(4.2)は、1フレーム当たりのトンネル位置の左右への移動速度 $V_y(t)$ [L/s] を遠心方向の加速度 $\alpha_y(t)$ [L/s] で比例させて計算している。比例係数 k_y は予備実験の結果 0.012 と決定した。

$$v_y(t) = -k_y \times \alpha_y(t) \quad (4.2)$$

図4.4は車が左にカーブをする時の様子を示している。車が左にカーブをする時は周辺映像の模様を右に移動させ、右にカーブをする時には模様を左に移動させた。



図4.3 カーブ対策2の映像例

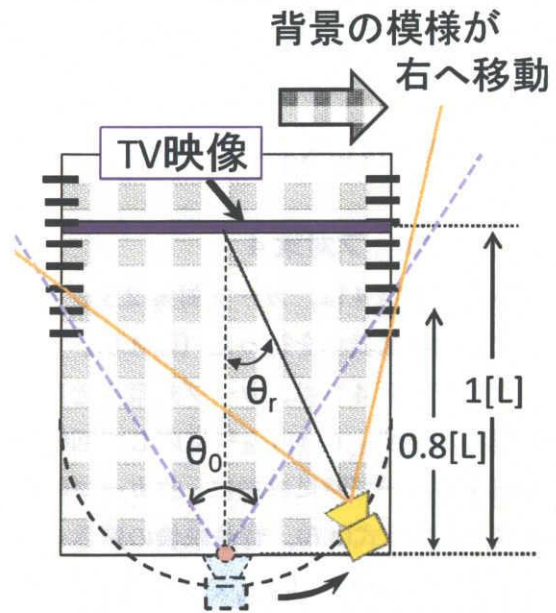


図4.4 カーブ対策2の仮想空間を上から見た図（左カーブ時）

4.1.3 カーブ対策3

カーブ対策3は、カーブ対策2と同様に車のYaw 角速度、遠心力の情報を視覚に与えるような映像表示を行った（図4.5）。

カーブ対策2では図4.4のように仮想空間のカメラを回転移動させていたが、カーブ対策3では図4.6のように仮想空間のカメラは固定して、TV 映像表示部をYaw 角速度 ω [rad/s] に応じて回転させた。式(4.3)はTV 映像表示部の回転角度 $\theta_r(t)$ を表す。

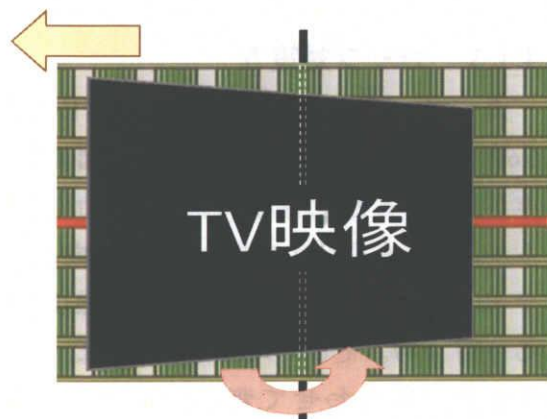


図4.5 カーブ対策3の概略図

$$\theta_r(t) = -k_{yaw\theta} \times \omega(t)$$

($k_{yaw\theta}$: 比例係数) …(4.3)

またカーブ対策 2 と同様に遠心加速度 $\alpha_y(t)$ [L/s^2] に応じて背景映像を右カーブ時には左に、左カーブ時には左に速さ $v_{cen}(t)$ で移動させた(4.4式)。

$$v_{cen}(t) = -k_{cen} \times \alpha_y(t) \text{ [L/s}^2\text{]}$$

(k_{cen} : 比例係数) …(4.4)

比例係数は予備実験を行い、 $k_{yaw\theta}$ は 0.4418, k_{cen} は 0.0062 に決定した。

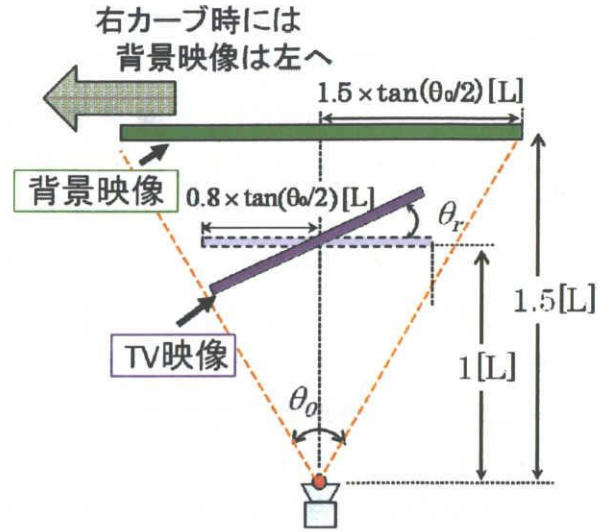


図 4.6 カーブ対策 3 の仮想空間を上から見た図

4.1.4 カーブ対策 4

カーブ対策 4 は、カーブ対策 2,3 と同様に車の Yaw 角速度、遠心力の情報を視覚に与えるような映像表示を行った (図 4.5)。

カーブ対策 4 では、カーブ対策 3 と同様に仮想空間のカメラは固定して、TV 映像表示部を遠心加速度 $\alpha_y(t)$ [L/s^2] に応じて回転させた。また Yaw 角速度 ω [rad/s] に応じて背景映像を右カーブ時には左に、左カーブ時には左に速さ $v_{yaw}(t)$ で移動させた。TV 映像の回転角 $\theta_r(t)$ は式(4.5)、背景映像の速さ $v_{yaw}(t)$ は式(4.6)で求めた。

$$\theta_r(t) = -k_{cen\theta} \times \tan^{-1}(\alpha_y(t)/g) \quad (k_{cen\theta} : \text{比例係数}) \quad \dots(4.5)$$

$$v_{yaw}(t) = -k_{yaw} \times \omega(t) \quad (k_{yaw} : \text{比例係数}) \quad \dots(4.6)$$

比例係数は予備実験を行い、 $k_{cen\theta}$ は 0.684, k_{yaw} は 0.05513 に決定した。

4.1.5 カーブ対策 5

カーブ対策 5 は遠心加速度に応じて背景映像を Roll 方向に傾斜させる手法である(図 4.7)。遠心加速度が持続するとき、遠心加速度と重力加速度の合ベクトルの方向を見かけの重力加速度方向と知覚し、身体が Roll 方向に傾斜しているように感じると考えられる (図 4.8)。そこで式(4.7)のように、車の遠心加速度 $\alpha_y(t)$ に合わせて背景映像をロール方向に $\theta_{roll}(t)$ だけ、右カーブ時には右に、左カーブ時には左に傾斜させた。

$$\theta_{roll}(t) = -k_{roll} \times \tan^{-1}(\alpha_y(t)/g) \quad (k_{roll} : \text{比例係数}) \quad \dots (4.7)$$

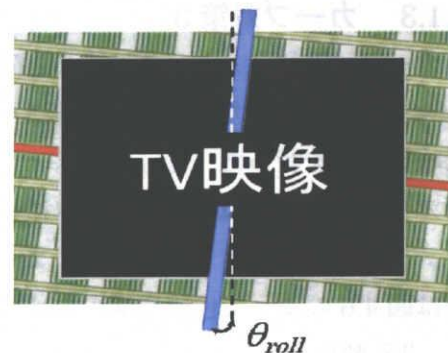


図 4.7 カーブ対策 5 の概略図

また、カーブ対策4と同様に、Yaw 角速度に応じて背景映像を左右に移動させることで、視覚に Yaw 角速度の情報を与えた。予備実験の結果、比例係数 k_{roll} は、0.3786 に決定した。

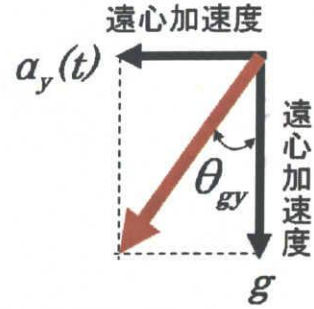


図 4.8 カーブ時の合成ベクトルの説明図

4.1.6 カーブ対策6

カーブ対策6は、Yaw 角速度に応じて背景映像を左右に移動させることで視覚に回転しているという自己運動感覚を与えるような対策である(図4.9)。これまでの対策と異なる点は、背景映像を丸身を帯びた表示にした点と、車の動きに対して比例した動きではなく、非線形な動きで背景映像を移動させる点である。



図 4.9 カーブ対策6の概要図

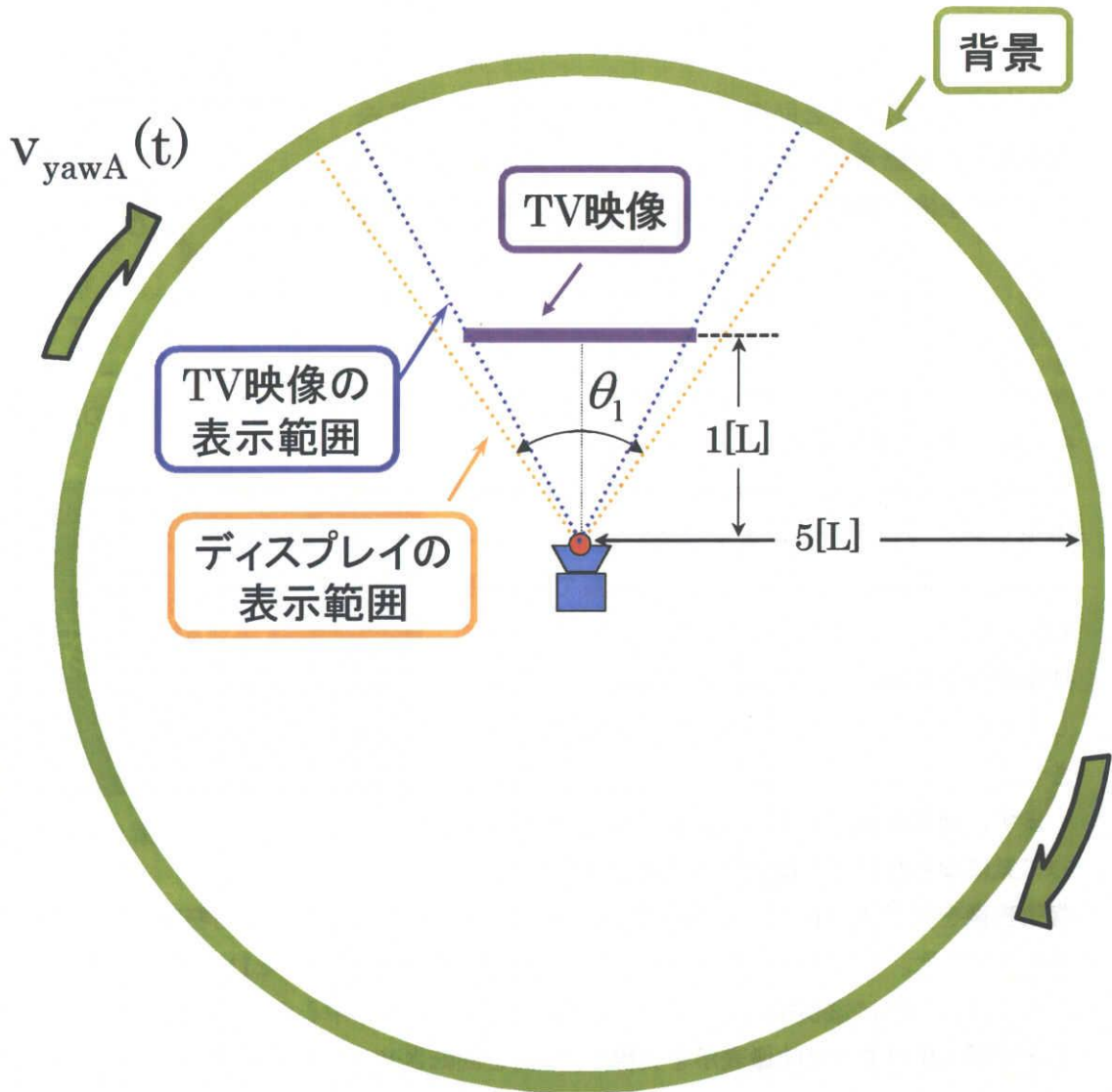
まず、背景映像の様子は以前より暗く、TV 視聴していて気にならないようなテキストチャに変更した。加えて、背景映像を奥行きのある、丸みを帯びた表示にすることで、視覚に回転感覚を与えやすくなると考えた。映像を表示するために用いた仮想空間を図4.10、4.11に示す。図4.11にあるように、円筒に縦横縞のテキストチャを貼り付け、円筒の中心から仮想カメラで撮影することで図4.9のような映像表示を実現し、円筒を回転させることで背景映像を左右に移動しているように表示している。

これまでの対策は Yaw 角速度に比例した速さで背景映像を左右に動かしていた。カーブ対策6では、背景映像の動く速さを決めるパラメータは、回転装置を用いた室内の予備実験を行った。回転装置に被験者を座らせ、Yaw 角速度 5, 10, 15, 20, 25[deg/sec]の5条件の回転を与え、それぞれの Yaw 回転の速さごとに平衡感覚と自己運動感覚が一致する適切な背景映像の Yaw 角速度を求めた(付録1.2参照)。そして、求めた点から最小二乗法を用いて指数関数に近似した。また、Yaw 回転の角速度 $\omega(t)$ が微小なときは背景映像の回転が小さくなるように処理をした、背景映像の角速度 $v_{yawA}(t)$ [rad/s]を求める式(4.8)を示す。この式に応じて円筒を回転させた。

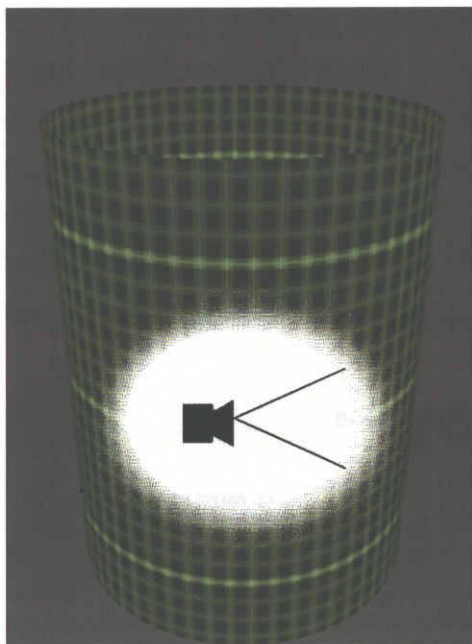
$$v_{yawA}(t) = (1 - \exp^{-k_1 \times \omega(t)^2}) \times k_{yawA} \times \omega(t)^{k_{yawB}}$$

(k_1, k_{yawA}, k_{yawB} : 比例係数) … (4.8)

比例係数 k_1, k_{yawA}, k_{yawB} は予備実験の結果、400, 0.5, 0.7 に定めた。



上：図 4.10
カーブ対策 6 の仮想空間を上から見た概略図



左：図 4.11
カーブ対策 6 の仮想空間を横から見た図
(仮想カメラはイメージ図)

4.2 実車実験

右左折時に生じる車酔い対策の効果を検証するために3種類の実車実験を行った。

4.2.1 カーブ対策実験 1

カーブ対策 1, 及び 2 の車酔い抑制効果の検証をするため, カーブ対策実験 1 を行った。実験走路は 2.2.2 で説明した実験コース 1 のカーブの多い山道を使用した。

4.2.1.1 実験環境

被験者は健康な 20 前後の 65 名を用いて実車実験を行った。実験車は, 2.2.1 で説明をした実験車 1 の 10 人乗りのハイエースを用いた。

4.2.1.2 刺激条件

視覚刺激の条件は,

- [1] カーブ対策 1 を施した TV 視聴
- [2] カーブ対策 2 を施した TV 視聴
- [3] 車酔い対策を施さない TV 視聴
- [4] 何も視聴せずに普通乗車

の 4 つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表 3 に示す。

表 3 カーブ対策実験 3 の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
カーブ対策 1	41
カーブ対策 2	37
TV 視聴	49
普通乗車	44
合計	171

4.2.2 カーブ対策実験 2

カーブ対策 3, 4, 5 の車酔い抑制効果の検証をするため, カーブ対策実験 2 を行った。実験走路は 2.2.2 で説明した実験コース 1 の山道を使用した。

4.2.2.1 実験環境

被験者は健康な 20 前後の男性 32 人，女性 10 人の計 42 人を用いて実車実験を行った。実験車は，2.2.1 で説明をした実験車 1 の 10 人乗りのハイエースを用いた。

4.2.2.2 刺激条件

視覚刺激の条件は，

- [1] カーブ対策 3 を施した TV 視聴
- [2] カーブ対策 4 を施した TV 視聴
- [3] カーブ対策 5 を施した TV 視聴
- [4] 車酔い対策を施さない TV 視聴
- [5] 何も視聴せずに普通乗車

の 5 つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表 4 に示す。

表 4 カーブ対策実験 1 の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
カーブ対策 3	27
カーブ対策 4	29
カーブ対策 5	28
TV 視聴	28
普通乗車	24
合計	136

4.2.3 カーブ対策実験 3

4.2.3.1 実験環境

被験者は健康な 20 前後の 76 名を用いて実車実験を行った。実験車は，2.2.1 で説明をした実験車 2 の 8 人乗りのアルファードを用いた。

4.2.3.2 刺激条件

視覚刺激の条件は，

- [1] カーブ対策 6 を施した TV 視聴
- [2] 車酔い対策を施さない TV 視聴
- [3] 何も視聴せずに普通乗車

の 3 つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表 5 に示す。

表5 カーブ対策実験3の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
カーブ対策6	31
TV 視聴	70
普通乗車	72
合計	173

4.3 実験結果

4.3.1 カーブ対策実験1

図4.9はカーブ対策実験1の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線、点は1分毎の不快感の平均値を示す。4条件ともに不快感は21分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。カーブ対策2は、TV視聴時と比べると不快感は抑制されていたが、カーブ対策1はTV視聴時と不快感はほぼ等しく、車酔いを抑制することはできなかった。表6は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。カーブ対策1,2の改善率はそれぞれ1.3%, 21.6%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和をAUC法(Area Under Curve Method)で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動にWilcoxonの順位和検定(両側検定)を行った結果、カーブ対策1,2はTV視聴との条件間に有意な差は見られなかった($p>0.05$)。

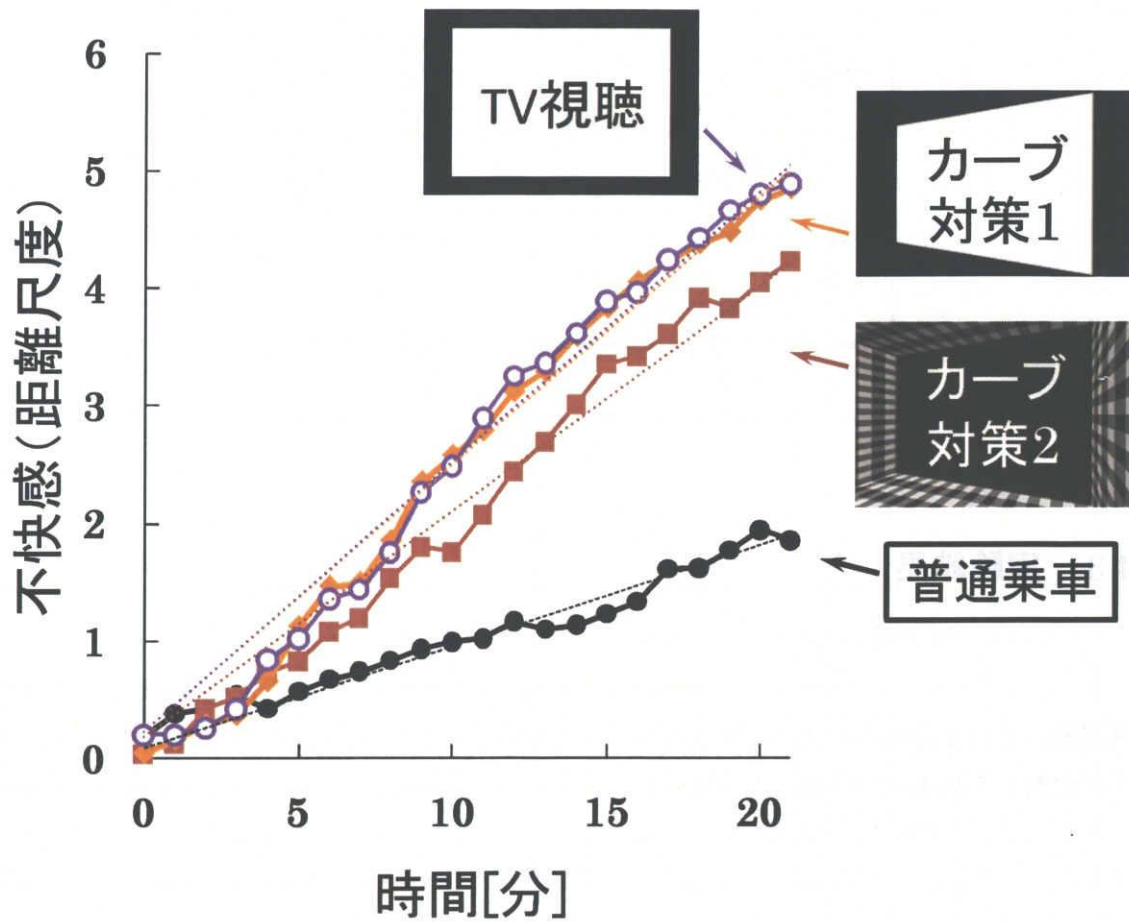


図 4.9 カーブ対策実験 1 の車酔い不快感の時間推移

表 6 カーブ対策実験 1 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
カーブ対策 1	0.244	1.3
カーブ対策 2	0.213	21.6
TV視聴	0.246	—
普通乗車	0.092	—

4.3.2 カーブ対策実験 2

図 4.10 はカーブ対策実験 2 の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線、点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。5 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。カーブ対策 3, 4 は、TV 視聴時にと比べると不快感は抑制されていた。表 6 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。カーブ対策 3, 4, 5 の改善率 33.0%, 22.9%, 4.2%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法(Area Under Curve Method)で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動に Wilcoxon の順位和検定(両側検定)を行った結果、3つの対策においてTV視聴条件との間に有意な差は見られなかった($p>0.05$)。

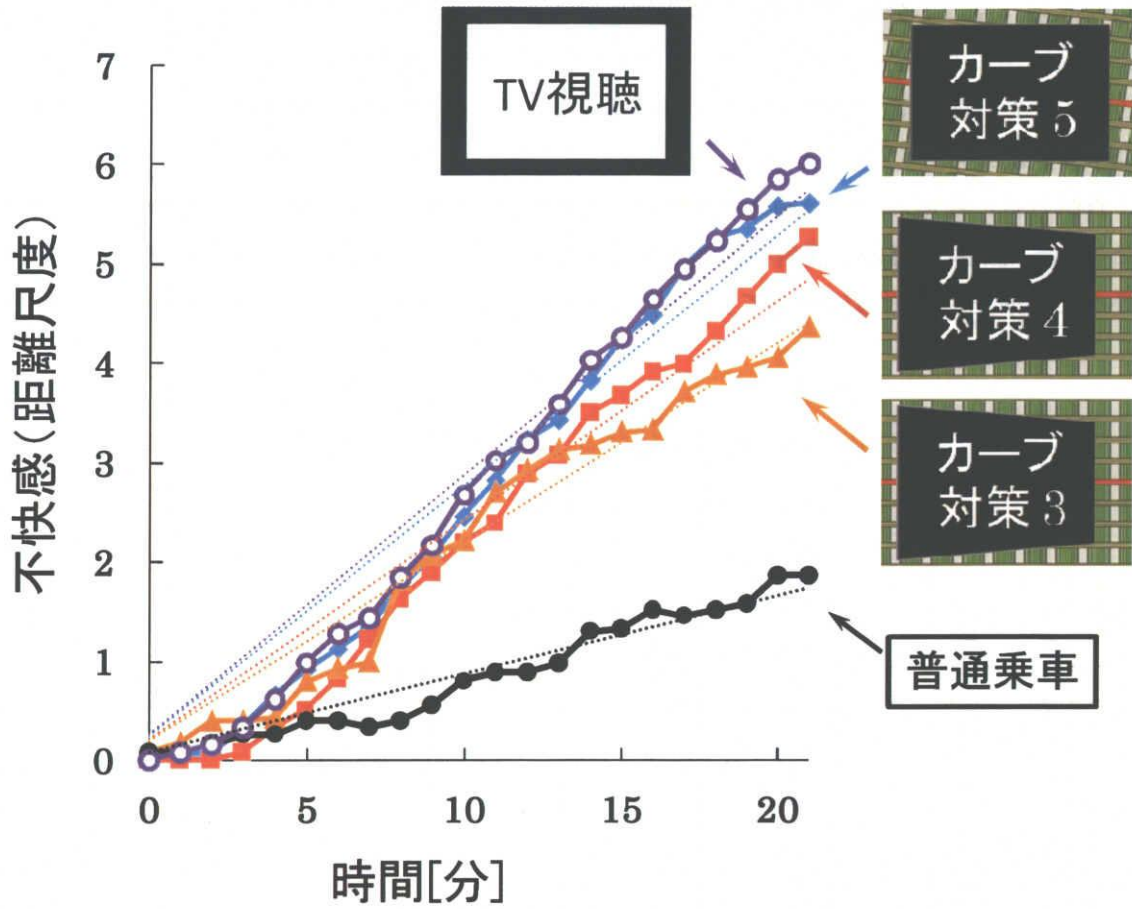


図 4.10 カーブ対策実験 2 の車酔い不快感の時間推移

表 7 カーブ対策実験 2 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
カーブ対策 3	0.241	33.0
カーブ対策 4	0.264	22.9
カーブ対策 5	0.304	4.2
TV視聴	0.314	—
普通乗車	0.094	—

4.3.3 カーブ対策実験3

図 4.11 はカーブ対策実験 3 の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線，点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。3 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。カーブ対策 6 は，TV 視聴時にと比べると不快感は抑制されていた。表 8 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。カーブ対策 6 の改善率は 31.1%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法(Area Under Curve Method)で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動に Wilcoxon の順位和検定（両側検定）を行った結果、カーブ対策 6 は TV 視聴条件との間に有意な差は見られなかった ($p>0.05$)。

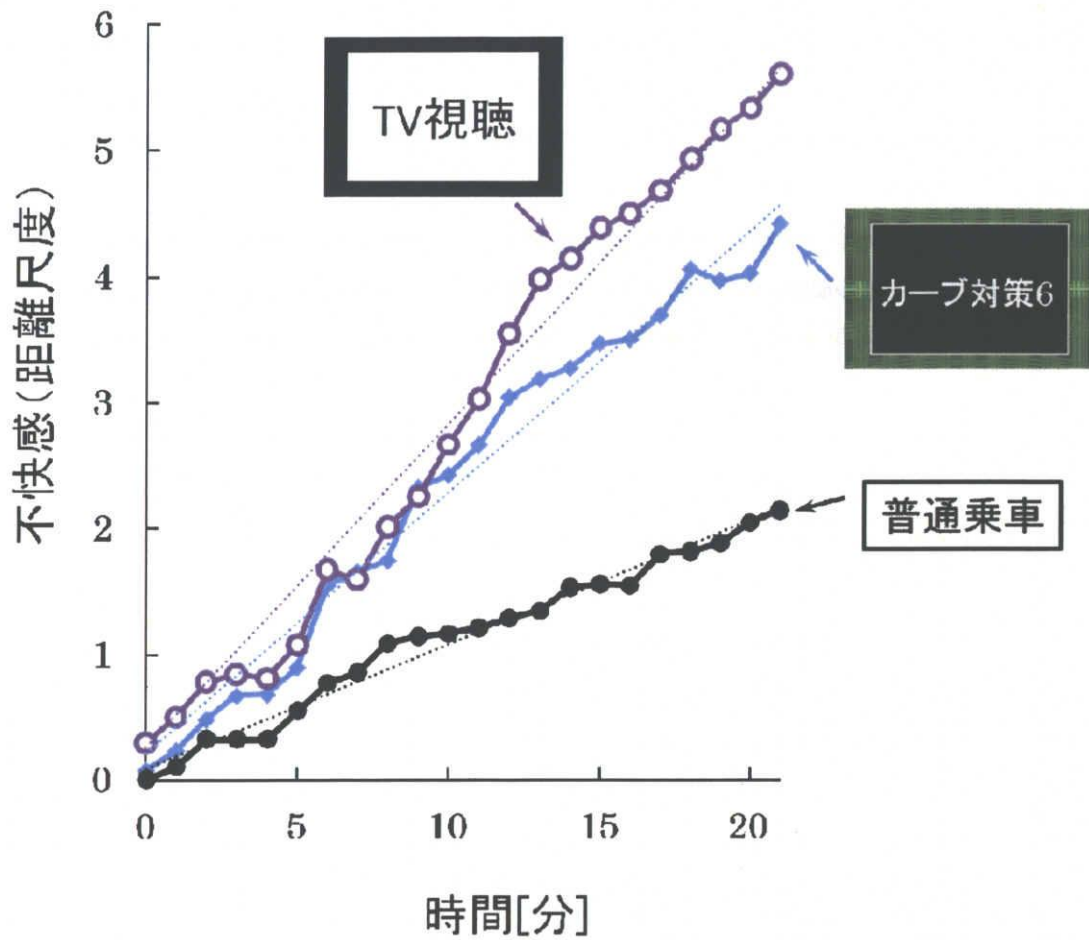


図 4.11 カーブ対策実験 3 の車酔い不快感の時間推移

表 8 カーブ対策実験 3 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
カーブ対策 6	0.214	31.1
TV視聴	0.264	—
普通乗車	0.101	—

第5章 右左折、及び加減速時に生じる車酔いに対する対策

第5章では、第3章加減速対策、および第4章カーブ対策を合わせた複合対策を考案し、実車実験の結果から対策案の有効性を検討した。

5.1 対策案

加減速とカーブ時に生じる車酔い抑制手法の複合対策を考案した。

5.1.1 複合対策1

TV映像の周辺に白黒格子縞の映像を上下左右の4面にトンネル状に表示させた(図5.1)。3.1.1の車の加速度に比例した速さで前後に周辺映像を移動させる加減速対策1と、4.1.2の車のYaw角速度に応じてTV映像を回転させ、遠心加速度に応じて周辺映像を左右に移動させるカーブ対策2を組み合わせた手法が複合対策1である。

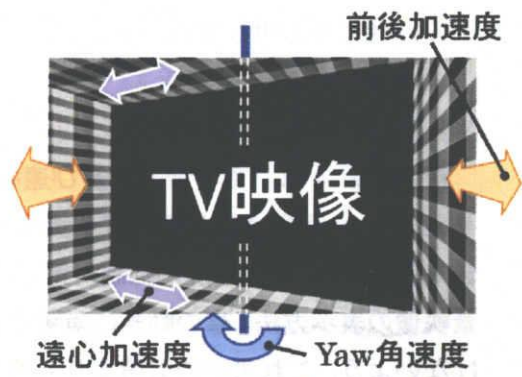


図5.1 複合対策1の概略図

5.1.2 複合対策2

3.1.2の加速度に応じて前後に周辺映像が移動することでリニアベクションを発生させる加減速対策2と、4.1.3のYaw角速度でTV映像を回転、遠心加速度に応じて周辺映像を左右に移動させるカーブ対策3を組み合わせた複合対策2を考案した。加減速対策で用いた背景映像のテクスチャは3.1.2の加減速対策2の時には茶色の枠を用いたが、複合対策2では緑色の枠を用いた。また4.1.3のカーブ対策3では1枚の緑色の板を背景映像のテクスチャに用いたが、カーブ対策用に網目状の背景映像を用いることで、網目の隙間から加速度対策の緑色の枠も視覚に与えることが可能となる。

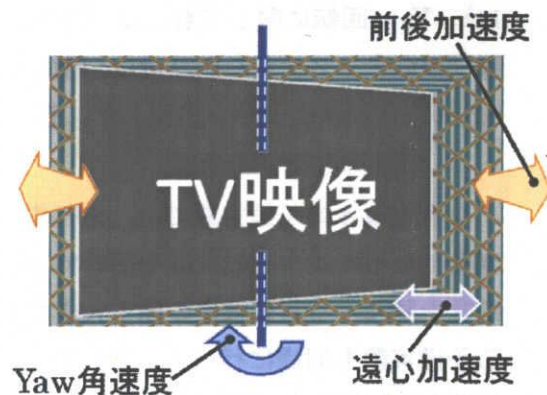


図5.2 複合対策2の概略図

5.1.3 複合対策 3

TV 映像の周辺に 1 枚のテクスチャで、車の加減速、遠心加速、Yaw 回転の情報を視覚に与える手法が複合対策 3 (図 5.3) である。3.1.3 の加速度に応じて周辺映像を Pitch 回転させる加減速対策 3 と、4.1.5 の Yaw 角速度に応じて周辺映像を左右に移動させ、遠心加速度に応じて周辺映像を Roll 回転させるカーブ対策 5 を合成して背景映像を表示している。また、カーブ対策 5 の背景映像のテクスチャは視運動刺激としては明るく、刺激が強すぎる可能性がある。そこでカーブ対策 5 の時よりも明るさを落とした背景映像に変更した。

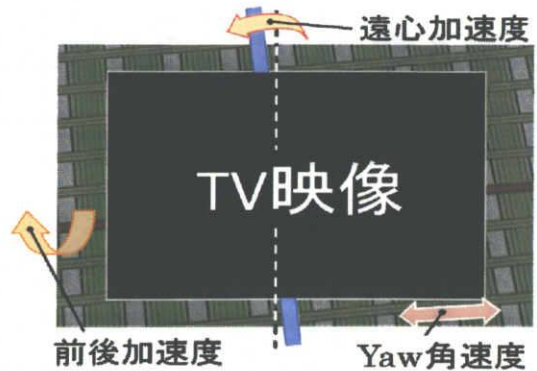


図 5.3 複合対策 3 の概略図

5.1.4 複合対策 4

複合対策 4 は、車の前後、及び遠心加速度に対して Pitch 回転、Roll 回転の傾斜感覚を与え、Yaw 回転に対しては背景映像を左右に移動させることで自己運動感覚を誘発する複合対策 3 と同様の車酔い抑制対策を用いている。異なる点として、背景映像の明るさ、背景映像の表示方法、車の動きに対する背景映像の動かし方がある。背景映像は TV 視聴を妨げないように、これまでの対策よりも明るさを落とし、目立ちすぎないように施した。また、背景映像を奥行きのある、丸みを帯びた表示にすることで、視覚に回転感覚を与えやすくなる考えた。そこで、カーブ対策 6 と同様の仮想空間を用いて映像表示を行った (図 4.10, 11)。Yaw 回転に関しても、カーブ対策 6 で用いた手法と同様に、図 4.11 のような円筒に縦横縞のテクスチャを貼り付け、円筒の中心から仮想カメラで撮影することにより、図 5.4, 5.5 のような映像表示を実現した。そして、円筒を回転させることで背景映像を左右に移動しているように表示した。

複合対策 4 の予備実験では、走行中に予期される範囲で、あらかじめ設定した Yaw 角速度を与える刺激を回転装置を用いて 5 点ずつ与えることで、平衡感覚と一致した自己運動感覚を誘発する背景映像の動く大きさを与えるパラメータを 5 点得た。前後の傾斜を与える予備実験も同様に行った。それぞれの刺激により得られた点から最小二乗法を用いて指数関数に近似した。遠心力に応じた映像の動きはカーブ対策 5 で用いたパラメータを用いて遠心加速度に比例した動きを与えた。また、車の Yaw 角速度、前後・遠心加速度の動きが微小なときは、背景映像の動きもそれぞれ小さくなるように処理をした。

前後加速度に応じて背景映像を Pitch 回転させる $\theta_p(t)$ [rad] を式(5.1)、上下させる $\theta_s(t)$ [rad] を式(5.2)、カーブ対策 5 で用いた遠心加速度に応じて Roll 回転させる $\theta_{roll}(t)$ [rad] を式 (5.3)、カーブ対策 6 で用いた Yaw 角速度に応じて円筒を回転させる $v_{yawA}(t)$ [rad/s] を式(5.4) に示す。前向き加速度と重力加速度方向との合力による角度を θ_{gx} [rad]、遠心加速度との重力加速度方向との合力による角度を θ_{gy} [rad] とし、Yaw 角速度は $\omega(t)$

[rad/s]とした。

$$\theta_p(t) = (1 - \exp^{-k_1 \times \tan^{-1}(\theta_{gx}(t))^2}) \times k_{pitch\theta A} \times \{\tan^{-1}(\theta_{gx}(t))\}^{k_{pitch\theta B}} \quad \dots (5.1)$$

$$\theta_s(t) = (1 - \exp^{-k_1 \times \tan^{-1}(\theta_{gx}(t))^2}) \times k_{pitchA} \times \{\tan^{-1}(\theta_{gx}(t))\}^{k_{pitchB}} \quad \dots(5.2)$$

$$\theta_{roll}(t) = (1 - \exp^{-k_1 \times \tan^{-1}(\theta_{gy}(t))^2}) \times k_{roll\theta} \times \tan^{-1}(\theta_{gy}(t)) \quad \dots(5.3)$$

$$v_{yawA}(t) = (1 - \exp^{-k_1 \times (\omega(t))^2}) \times k_{yawA} \times \{\omega(t)\}^{k_{yawB}} \quad \dots (5.4)$$

比例係数 k_1 , $k_{pitch\theta A}$, $k_{pitch\theta B}$, k_{pitchA} , k_{pitchB} , $k_{roll\theta}$, k_{yawA} , k_{yawB} のそれぞれの値は次に述べる。対策 4-1, 4-2 は背景映像のテクスチャと背景映像の動きを調節するパラメータの値が異なる点以外は, 同じ手法を用いている。



図 5.4 複合対策 4-1 の概略図



図 5.5 複合対策 4-2 の概略図

5.1.4.1 対策 4-1

対策 4-1 は図 5.4 のような映像表示である。上記の式の比例係数は予備実験により $k_1=100$, $k_{pitch\theta A}=0.8$, $k_{pitch\theta B}=0.7$, $k_{pitchA}=0.5$, $k_{pitchB}=0.7$, $k_{roll\theta}=0.38$, $k_{yawA}=0.45$, $k_{yawB}=0.7$ と定めた。

5.1.4.2 対策 4-2

対策 4-2 は図 5.5 のような映像表示である。上記の式の比例係数が対策 4-1 と異なるのは 2 点で, 加減速により背景映像を上下移動にする大きさを小さくするため $k_{pitchA}=0.5$, Yaw 角速度を速くするために $k_{yawA}=0.57$ と定めた。

5.2 実車実験

加減速対策とカーブ対策を合わせた複合対策の車酔い抑制効果を検証するために 3 種類の実車実験を行った。

5.2.1 複合対策実験 1

複合対策 1 の車酔い抑制効果の検証をするため，複合対策実験 1 を行った。実験走路は 2.2.2 で説明した実験コース 1 のカーブの多い山道を使用した。

5.2.1.1 実験環境

被験者は健康な 20 前後の男性 34 名、女性 15 名の計 49 名を用いて実車実験を行った。実験車は，2.2.1 で説明をした実験車 1 の 10 人乗りのハイエースを用いた。

5.2.1.2 刺激条件

視覚刺激の条件は，

- [1] 複合対策 1 を施した TV 視聴
- [2] 車酔い対策を施さない TV 視聴
- [3] 何も視聴せずに普通乗車

の 3 つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表 6 に示す。

表 6 複合対策実験 1 の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
複合対策 1	43
TV 視聴	49
普通乗車	44
合計	136

5.2.2 複合対策実験 2

複合対策 2，及び 3 の車酔い抑制効果の検証をするため，複合対策実験 2 を行った。実験走路は 2.2.2 で説明した実験コース 1 の山道を使用した。

5.2.2.1 実験環境

被験者は健康な 20 前後の男性 24 人，女性 11 人の計 35 人を用いて実車実験を行った。実験車は，2.2.1 で説明をした実験車 1 の 10 人乗りのハイエースを用いた。

5.2.2.2 刺激条件

視覚刺激の条件は、

- [1] 複合対策2を施したTV視聴
- [2] 複合対策3を施したTV視聴
- [3] 車酔い対策を施さないTV視聴
- [4] 何も視聴せずに普通乗車

の4つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表7に示す。

表7 複合対策実験2の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
複合対策2	21
複合対策3	20
TV視聴	23
普通乗車	20
合計	84

5.2.3 複合対策実験3

複合対策4, 5の車酔い抑制効果の検証をするため、複合対策実験3を行った。実験走路は2.2.2で説明した実験コース1のカーブの多い山道を使用した。

5.2.3.1 実験環境

被験者は健康な20前後の76名を用いて実車実験を行った。実験車は、2.2.1で説明をした実験車2の8人乗りのアルファードを用いた。

5.2.3.2 刺激条件

視覚刺激の条件は、

- [1] 複合対策4-1を施したTV視聴
- [2] 複合対策4-2を施したTV視聴
- [3] 複合対策4-1の背景映像の動きを反対に施したTV視聴
- [4] 複合対策4-1の背景映像の動きの大きさを2倍に施したTV視聴
- [5] 車酔い対策を施さないTV視聴
- [6] 何も視聴せずに普通乗車

の5つの条件で実験を行った。条件ごとの試行数を表8に示す。

表 8 複合対策実験 3 の条件毎の試行数

乗車条件	試行数
複合対策 4-1	42
複合対策 4-2	30
動き：反対	39
動き：2倍	35
TV 視聴	62
普通乗車	71
合計	279

5.3 実験結果

5.3.1. 複合対策実験 1

図 5.4 は複合対策実験 1 の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線，点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。3 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。複合対策 1 は，TV 視聴時にと比べると不快感は抑制されていた。表 9 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。改善率は 25.6%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の順位和検定 (両側検定) で検定した結果、複合対策 1 は TV 視聴との条件間に、有意な差は見られなかった ($p>0.05$)。

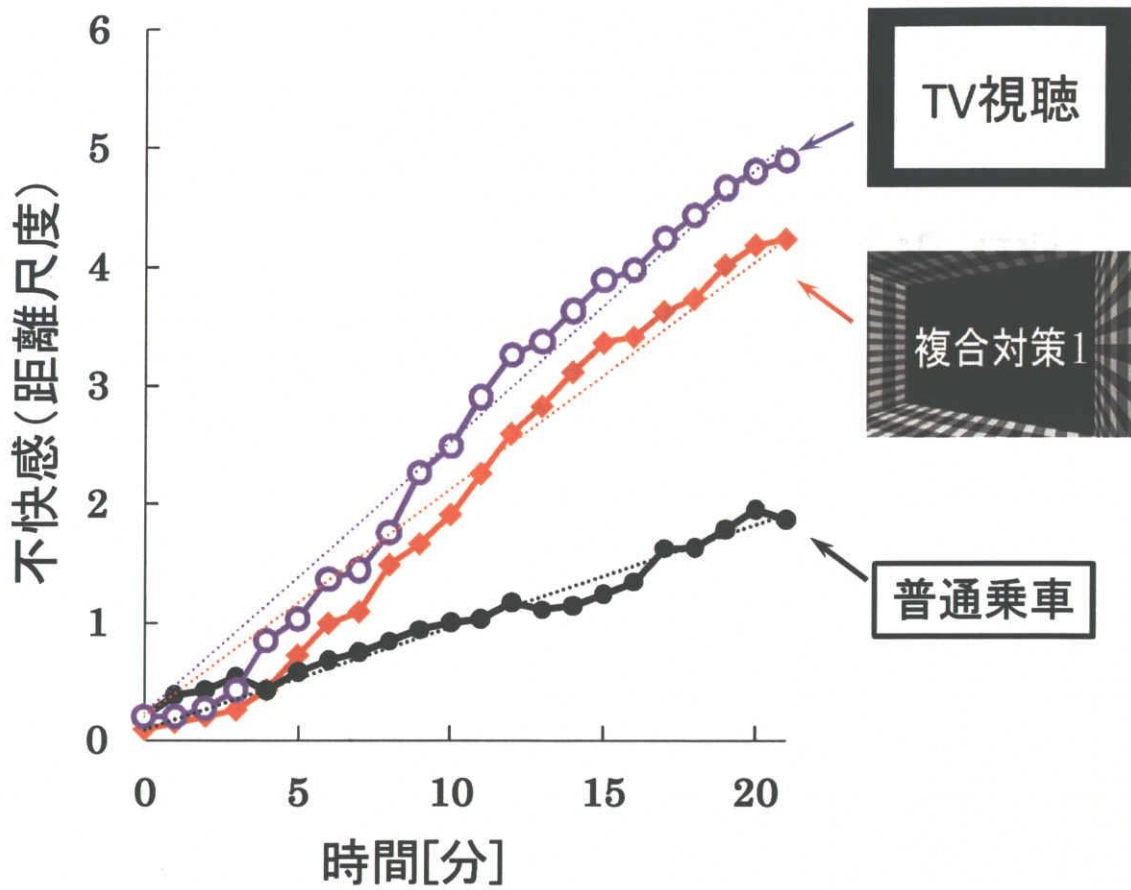


図 5.4 複合対策実験 1 の車酔い不快感の時間推移

表 9 複合対策実験 1 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
複合対策 1	0.207	25.6
TV視聴	0.246	—
普通乗車	0.092	—

5.3.2. 複合対策実験 2

図 5.5 は複合対策実験 2 の不快感の平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線, 点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。4 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。複合対策 2, 3 は, TV 視聴時にと比べると不快感は抑制されていた。表 10 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。複合対策 2, 3 の改善率はそれぞれ 32.3%, 73.6%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の順位和検定 (両側検定) で検定した結果、複合対策 3 は, TV 視聴条件との間に $p < 0.05$ で有意な差が見られた。しかし、複合対策 2 と TV 視聴条件との間に有意な差は見られなかった ($p > 0.05$)。

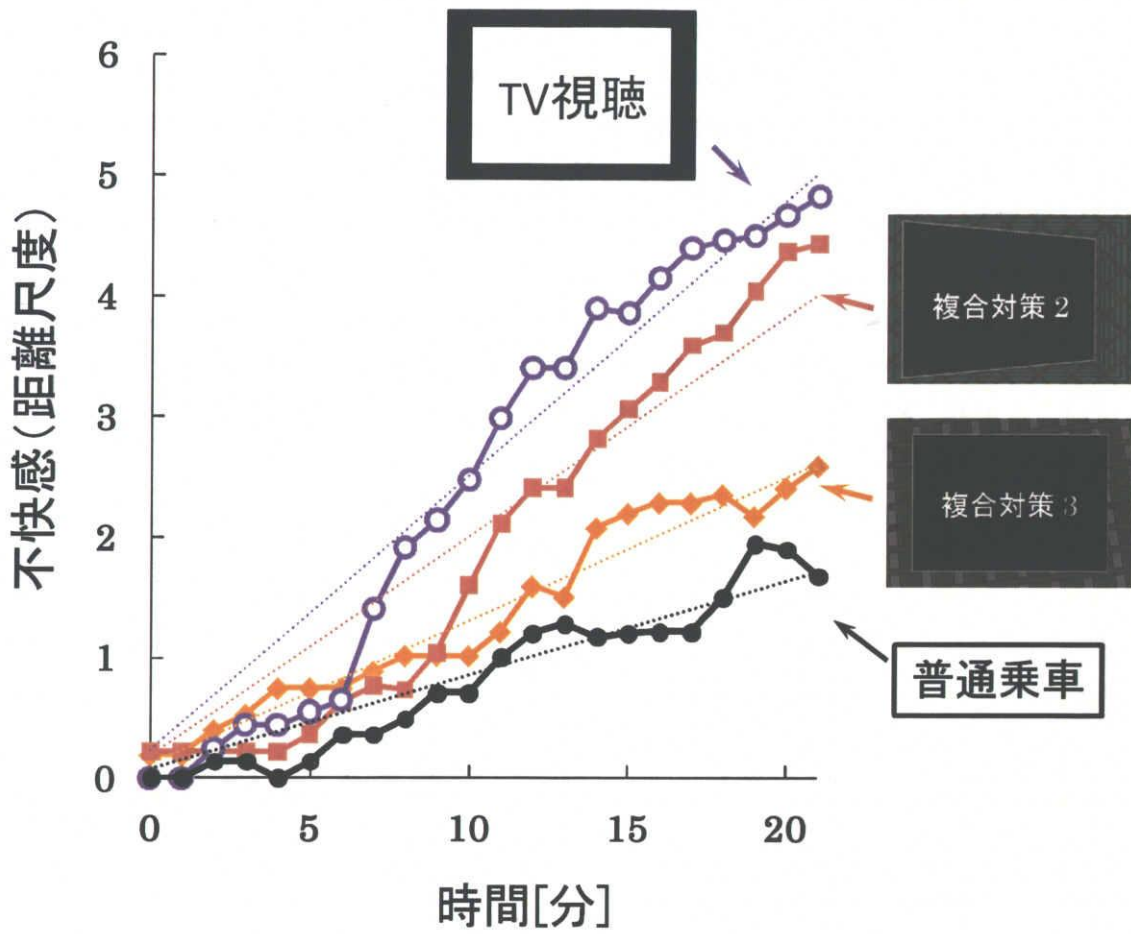


図 5.5 複合対策実験 2 の車酔い不快感の時間推移

表 10 複合対策実験 2 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
複合対策 2	0.216	32.3
複合対策 3	0.142	73.6
TV視聴	0.275	—
普通乗車	0.094	—

5.3.3. 複合対策実験 3

図 5.6 は複合対策実験 3 の不快感平均強度の時間推移を示す。図の点線は条件毎の回帰直線、点は 1 分毎の不快感の平均値を示す。6 条件ともに不快感は 21 分間の乗車時間にほぼ比例して高まっていた。複合対策 4-1, 4-2 は、TV 視聴時にと比べると不快感はわずかに抑制されていたが、顕著な抑制効果は確認されなかった。対策映像 4-1 の対策とは反対向きに映像が動く逆方向の条件、また 2 倍の動きをする条件においても、TV 視聴時に比べ、わずかに車酔いが抑制されていた。表 11 は実験条件毎の回帰直線と改善率を示す。複合対策 4-1, 4-2 の改善率 11.5%, 15.6%, 逆方向, 2 倍の大きさでは 25.9%, 20.9%であった。

各試行毎に評定尺度での動揺病不快感の総和を AUC 法 (Area Under Curve Method) で算出し、各乗車条件毎の動揺病不快感の経時的変動を Wilcoxon の順位和検定 (両側検定) で検定した結果、複合対策 4-1, 4-2, 逆方向, 2 倍の動きをする実験条件と TV 視聴条件との間に有意な差は見られなかった ($p>0.05$)。

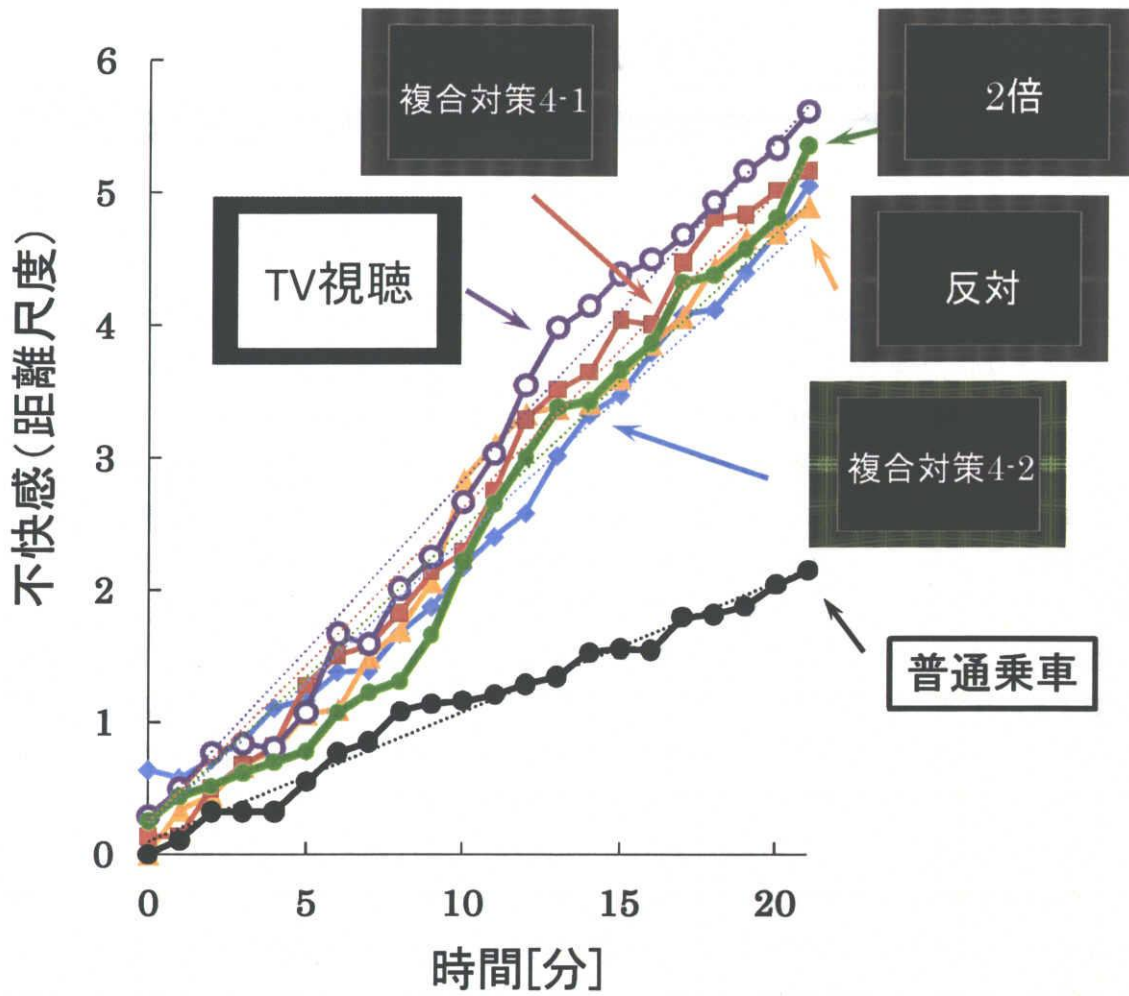


図 5.6 複合対策実験 3 の車酔い不快感の時間推移

表 11 複合対策実験 3 の改善効果

実験条件	回帰直線の傾き	改善率[%]
複合対策4-1	0.246	11.5
複合対策4-2	0.234	18.7
動き: 反対	0.222	25.9
動き: 2倍	0.230	20.9
TV視聴	0.264	—
普通乗車	0.101	—

第6章 考察

6.1 加減速対策

加減速対策1は26.2%、加減速対策2は67.1%、加減速対策3は21.3%、それぞれの対策で車酔い抑制効果が得られた。これらより、視覚に車の前後加速度の情報を与えることにより、感覚情報の矛盾を減少させ、車酔いを抑制することができた。

加減速対策実験では、対策案1は実験コース1のカーブの多い山道で行ったが、対策案2、3では実験コース2の直線の長く続く道路で行った。実験コース1のカーブの多い山道を走行する際は、2章の図2.10、2.11にあるようなYaw角速度や遠心加速度が生じていた。実験コース2の直線が長く続くコースを走行する際は、Yaw角速度、遠心力が生じないように注意して運転を行い、アクセルやブレーキ操作による前後加速の刺激を受けるが、Yaw回転や遠心加速の刺激はわずかである。しかし、カーブの多い山道を走行する際は、アクセルやブレーキに加え、ハンドル操作によるYaw回転や遠心加速の刺激も受けることになる。これらより、カーブの多い山道を走行中にTV視聴することで、車酔いを発症しやすくなることが言える。

加減速対策2、3では実験コース2の加減速が長く続くコースで実験を行い、予備実験も同じコースで行った。走行中には、減速時の加速度のほうが加速時の速度より大きかった。予備実験(付録1.1)では、加減速を知覚した平衡感覚と対策映像により生じる自己運動感覚が一致するような背景映像の動きの大きさを調節する際、加速時よりも減速時に周辺映像の動きを調節する傾向があった。それにより、対策映像は減速時には、車の動きと一致した自己運動感覚を誘発する周辺映像の動きをしたが、加速時には適切な自己運動感覚が生じず、感覚情報の矛盾を打ち消すことができなかつた可能性がある。また、加減速対策3は、周辺映像が明るすぎることで、視覚刺激が強くなりすぎ、車酔い抑制効果が上がらなかつた可能性も考えられる。

6.2 カーブ対策

カーブ対策実験では、カーブ対策2、3、4、6に関しては、それぞれの対策で車酔い抑制効果が得られた。これらより、視覚に車のYaw角速度、遠心加速度の情報を与えることにより、感覚情報の矛盾が打ち消され、車酔いを抑制することができたと言える。しかし、他の対策ではあまり効果が見られなかつた。

カーブ対策1に関して、顕著な車酔い抑制効果は得られなかったが、森本らの報告では同様の対策を用いて70%を超える車酔い抑制効果を得ている。今回、抑制効果が得られなかった原因として、TV映像の外側に枠を用いなかったことがあげられる。森本らの対策ではTV映像表示部を灰色の線で囲うことで、TV映像の周りに枠があるような映像を表示している。この枠を用いることで、TV映像の回転が視覚にはっきりと知覚されるため、自己運動感覚も誘発しやすかったと考える。カーブ対策1では枠がないためTV映像とそれ以外の部分の境界が曖昧になり、TV映像の回転が視覚に伝わらず、車酔いを抑制できなかった可能性がある。

カーブ対策2は周辺映像にトンネル状の白黒模様の柄を用いた。この映像表示は視点の近くに周辺映像、遠くにTV映像が表示されている(3章の図4.4参照)。前景よりも後景に視覚刺激を与えたほうが視覚誘導性自己運動感覚を誘発させやすい^[11]ことが知られており、カーブ対策1, 2では車の動きの情報を与えるための視覚刺激を前景に配置したため、最適な自己運動感覚を誘発できなかったと考えられる。

カーブ対策3, 4では、車のカーブ時にはYaw角速度とともに遠心力が発生するため、Yaw角速度に加えて遠心加速度を視覚刺激に取り入れたが、改善率は3割前後であった。その原因として、遠心加速度とYaw角速度の関係は遠心加速度を $a[m/s^2]$ 、カーブの回転半径を $r[m]$ 、Yaw角速度を $\omega[rad/s]$ とすると $a=r\omega^2$ であり、遠心加速度はYaw角速度の2乗に比例するため、わずかなYaw角速度の変化が遠心加速度に影響を及ぼした可能性が考えられる。

また、カーブ対策3, 4, 5で用いた背景映像は加減速対策3の考察でも述べたように、明るすぎて視覚刺激が強くなりすぎたために車酔い抑制効果が上がらなかった可能性がある。

上記の対策ではYaw角速度、遠心加速度に比例させた速度で周辺映像を表示したが、カーブ対策6では、Yaw角速度、遠心加速度に対して非線形な速度で周辺映像を移動させた。車酔い抑制効果は得られたが、先行研究を超えるような結果は得られなかった。原因として、周辺映像の模様と予備実験で得られた値が考えられる。カーブ対策6で用いた周辺映像の緑色の縞模様が左右に移動する際、縞模様の細い部分が波打つように見え、車酔い抑制効果が上がらなかった可能性がある。また、カーブ対策6では周辺映像に奥行きのある映像表示をしている。これは円筒の中心に設置したカメラから円筒の内面図に緑色の模様を見ているような映像を表示している(付録1.2参照)。このカメラの画角を増加させると周辺映像の奥行きが増し、より丸みを帯びた周辺映像になるが、画角を小さくすることで丸みのない平らな周辺映像になる。この画角を求める予備実験では、回転装置を用いて5種類のYaw角速度を与え、適切な画角を求めたが、実車ではYaw角速度だけでなく回転装置では得られない強い遠心力も受けるため、回転装置での視聴では適切な回転感覚を与えていた周辺映像が、走行中の車内での視聴では、周辺映像の視覚刺激が適切な自己運動感覚を誘発できなかった可能性が考えられる。

6.3 複合対策

車の加減速、カーブ時の複合対策実験では、複合対策1, 2, 3, 4-1, 4-2の全てにおいて、車酔い抑制効果が得られた。これらより、視覚に車の前後、遠心加速度、Yaw角速度の情報を与えることにより、感覚の矛盾を減少させ、車酔いを抑制することができた。

複合対策3は、加減速対策3とカーブ対策5を合わせた手法で、7割を超える車酔い抑制効果を得た。それぞれ単独の対策では顕著な改善効果は得られなかったが、この2つの対策を合わせることで相乗効果を起こし、車酔いを抑制することができたと思われる。また、背景映像の明るさを落としたことで、最適な視覚刺激を与えることができた可能性もあげられる。

逆に顕著な車酔い抑制効果を得た加減速対策3とカーブ対策3を合わせた複合対策2では、車酔い抑制効果は30%程度で、複合対策3を大きく下回る結果となった。複合対策案3は視覚から3種類の運動ベクトル（前後加速度、遠心加速度、Yaw角速度）を1枚の背景映像で与えた。一方、複合対策案2は映像を回転させ、さらに2種類の運動ベクトルをそれぞれ別の背景映像の組み合わせで表現した。そのため、3種類の個別の背景映像が重なり合い複雑な動きに感じられたことで視覚からの刺激が強くなり、平衡感覚との感覚情報が一致しなかったと考えられる。

複合対策1では、トンネル状の白黒模様の柄を用いた。これまでの考察でも述べたが、この映像表示は視点の近くに周辺映像、遠くにTV映像が表示されているが、前景よりも後景に視覚刺激を与えたほうが視覚誘導性自己運動感覚を誘発させやすい、という点から複合対策1では最適な自己運動感覚が発生しなかったと考えられる。

これまでの実験で背景映像の明るさを上げすぎるとTV視聴の妨げになり、かつ視覚刺激も強くなりすぎたため、複合対策4-1, 4-2に関しては、明るさを落とした背景映像を用いた。しかし、結果は複合対策4-1, 4-2ともに顕著な車酔い抑制効果を得ることができなかった。対策4-1, 4-2、背景映像が逆向きの動き、背景映像が2倍の動き、TV視聴時の5つの条件で実験を行った不快感の推移が類似していることから、視覚に自己運動感覚を誘発することができなかった可能性があげられる。自己運動感覚が生じているならば、対策の逆向きに背景映像を動かすと、平衡感覚情報と視覚情報の矛盾がさらに悪化し、TV視聴時の不快感よりも重度な車酔いを招くはずである。適切な自己運動感覚を誘発できなかった原因として、背景の明るさを落としすぎて、視覚刺激が弱まった可能性があげられる。

また、対策4-1, 4-2では奥行のある、丸みを帯びた背景映像にしたが、この奥行のある映像はカメラの画角を大きくすることで丸みを増し、画角を小さくすることでより平らな背景映像となる。今回の対策は予備実験により、画角を45[deg]に定めたが、森本らの研究では白黒模様のテクスチャを張った円筒の中心からカメラで撮影し、Yaw角速度に応じて背景映像を移動させることで70%を超える車酔い抑制効果を得ている。図6.1はその対策の

映像表示図で、画角は60[deg]であった。図6.1では画角が対策4-1, 4-2よりも大きい、わずかに丸みを感じる程度であった。対策4-1, 2は、背景映像に横線が含まれているため丸みを感じやすい映像となり、改善効果を得た図6.1の映像とは大きく異なる。この背景映像は、回転装置を用いた予備実験で、様々なYaw角速度の回転を被験者に与え、その際に画角を変えて視聴させ、最適な値として得られた画角を用いて表示した。しかし、顕著な車酔い抑制効果を得ることはできなかった。複合対策4は車のYaw角速度に応じて回転する円筒の中心から撮影しているが、車載TVのような小さなディスプレイでは円筒の一部しか表示されないため、円筒の中心にいる感覚を与えられなかった可能性があげられる。また、実車でカーブ走行時に発生する遠心力が回転装置では発生しないことから、予備実験でも実車を使って走行中に比例係数を決定するほうが望ましいと思われる。これは画角に関する予備実験だけでなく、Yaw角速度、前後、遠心加速度に関する予備実験においても同様であると思われる。



図 6.1 森本らの対策映像

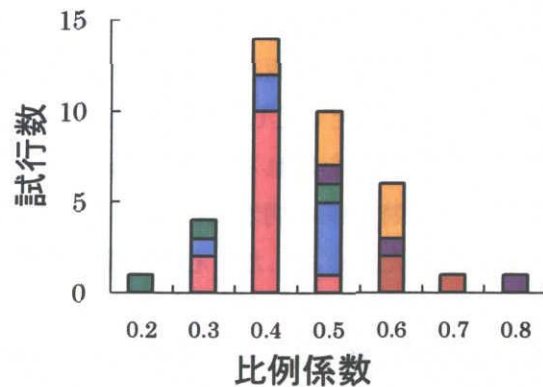


図 6.2 予備実験での比例係数の個人差

6.4 今後の課題とまとめ

今後の課題として、平衡感覚と一致する自己運動感覚を誘発する対策の周辺映像の動きの大きさには個人差がある。図6.2は、平衡感覚と自己運動感覚が一致した際の対策映像のパラメータの値をヒストグラムでグラフ化し、被験者ごとにグラフの色を変えて表した。グラフより個人により適切だと感じる値に差があることが分かる。そのため個人によって動きの大きさを最適化することができる手法が求められる。また、本研究では、対策の背景映像のテクスチャを変えて実験を行ったが、背景の明るさや形状の影響で、適切な視覚刺激を与えることができなかったため、自己運動感覚が誘発されず、車酔いを抑制できなかった可能性がある。TV視聴の妨げにならず、かつ適切な自己運動感覚を誘発することができる効果的なテクスチャの作成が求められる。

本研究では、視覚に車の動きに応じた視覚刺激を与え、視覚情報と平衡感覚情報の矛盾を減少させることで、TV視聴時に生じる車酔いの70%以上を抑制するという効果が得られたが、前述した課題を解決することで100%を超える車酔い抑制効果を得ることが期待される。

謝辞

本研究を行うに当たって、有益なご指導、助言を頂いた井須尚紀教授には深く感謝致します。井須教授には、部活動と研究の両立を認めていただき、充実した大学生活を送らせていただきました。さらに企業との共同研究を通じて、大変貴重な経験をさせていただきました。心から感謝致します。また、本論文の執筆にともない、有益なご指導を頂きました、河合敦夫准教授、児玉哲司准教授、榊井文人助手、ならびに田中事務官に心より感謝いたします。

多大な不快感が伴うにもかかわらず貴重な時間を割いて実験にご協力いただきました被験者の方々、そして不快感と闘いながらも共に実験を行った、森本明宏氏、日高教孝氏、朴丹氏、小山哲弘氏、中西窓花氏、杉浦友香氏、堂西幸紀子、浜田悠生氏に深く感謝いたします。さらには研究で忙しい中、嫌な顔せず予備実験の被験者としてご協力いただき、さらにはこの三年間を忘れられない思い出としてくれた研究室の先輩、同輩にも心より感謝いたします。特に森本明宏氏には、研究だけでなく就職活動、大学生活においても多大なるご支援をいただきました。心から深く感謝致します。

最後に、大学院まで進学させて頂き、様々な面でいつも支えてくれた両親、家族に心から感謝します。

参考文献

- [1] 森本明宏, 朴丹, 井須尚紀; 乗車中の TV 注視による車酔い不快感の増加, 宇宙航空環境医学, pp42, pp145, 2005
- [2] Reason, J.T. and Brand, J.J.: Motion Sickness. Academic Press, London, 1975.
- [3] 安藤, 渡邊, 杉本, 前田: 前庭感覚インタフェース技術の理論と応用, 情報処理学会論文誌, 48, pp.1326-1335, 2007.
- [4] Griffin, M.J. and Newman, M.M.: Visual field effects on motion sickness in cars. Aviat Space Environ Med.; 75, pp.739-748, 2004.
- [5] 加藤, 北崎: 後席用ディスプレイ注視時の車酔い発生メカニズムの一考察, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.50-05, pp.7-10, 2005
- [6] 加藤, 北崎: 車載ディスプレイ注視時の車酔いに対する映像の種類の影響, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.83-06, pp.9-12, 2006
- [7] 森本明宏, 井須尚紀: “乗車中 TV 視聴する際の車酔い低減対策”, 宇宙航空環境医学, vol.43, pp.174, 2006
- [8] 丹後俊郎; 新版医学への統計学, 朝倉出版, pp65-68, pp144-147, 1993
- [9] 難波精一郎, 桑原園子; 音と評価のための心理学的測定法, コロナ社, pp76-79, 1998
- [10] 田中良久; 心理学的測定法, 東京大学出版会, pp159-160, pp182-184, 1977
- [11] Ohmi, M., Howard, I.P. and Landolt, J.P.: Circularvection as a function of foreground-background relationships, Perception, 16, pp.17-22, 1987

学会発表リスト

- [1] 辻仁志, 森本明宏, 日高教孝, 朴丹, 小山哲弘, 榊井文人, 河合敦夫, 井須尚紀; TV 視聴時の車酔いを低減する映像表示法, 2007 年電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ大会講演論文集, A-20-15, 2007.9.
- [2] 辻仁志, 森本明宏, 井須尚紀; 車載TV視聴時に生じる車酔いの低減対策, 宇宙航空環境医学, 44: 102, 2007.
- [3] 森本明宏, 辻仁志, 中西窓花, 杉浦友香, 堂西幸紀子, 榊井文人, 河合敦夫, 井須尚紀; 加減速に伴う車酔い発症に対処した車載 TV 表示法, 2008 年映像情報メディア学会年次大会, 福岡, 2008.9.
- [4] 中西窓花, 森本明宏, 辻仁志, 堂西幸紀子, 杉浦友香, 榊井文人, 河合敦夫, 井須尚紀; 車酔い対策を施した車載ディスプレイの開発, 2008 年映像情報メディア学会年次大会, 福岡, 2008.9.
- [5] 辻仁志, 葛巻弓, 小川博也, 河合敦夫, 榊井文人, 井須尚紀; 自動車が横揺れする際の乗り心地に視覚が与える影響, 2008 年映像情報メディア学会年次大会, 福岡, 2008.9.
- [6] 辻仁志, 小川 博也, 河合 俊岳, 井須 尚紀; 横揺れ時の乗り心地に視覚が与える影響, 第 54 回日本宇宙航空環境医学会総会, 東京, 2008.11.
- [7] 中西窓花, 森本明宏, 辻仁志, 井須尚紀; 車酔いを抑制する車載ディスプレイの開発, 第 54 回日本宇宙航空環境医学会総会, 東京, 2008.11.

—付録—

1. 予備実験
2. 船酔い抑制対策—2006～2008年度

1. 予備実験

本論文の車酔い対策案は、車載ディスプレイを通じて、車の動きと一致した自己運動感覚を視覚に与えることで、視覚と平衡感覚の矛盾を失くし、車酔いを抑制することが目的である。平衡感覚で知覚される車の動きと、視運動刺激により生じる視覚誘導自己運動感覚を一致させることが重要である。そこで、車酔い対策背景映像の適切な動きを求めるため、実車による予備実験と室内の回転装置を用いた予備実験を行った。

1.1 車両を用いた予備実験

車酔い対策映像の適切な動きを求めるため、実車実験を行い、加減速対策の式(3.3), (3.4), (4.3), (3.5) の比例係数 k_f , k_p , k_s , カーブ対策の式 (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) の比例係数 k_{yaw} , k_{cen} , $k_{cen\theta}$, k_{yaw} , k_{roll} を求めた。

1.1.1 実験環境

被験者は健康な 20 前後の男女 8 名を用いて実車による予備実験を行った。実験車は、2.2.1 で説明をした実験車 1 の 10 人乗りのハイエースを用いた。実験コースは、加減速対策は 2.2.2 で説明した実験コース 2 の直線道路、カーブ対策では実験コース 1 のカーブの多い山道を用いた。

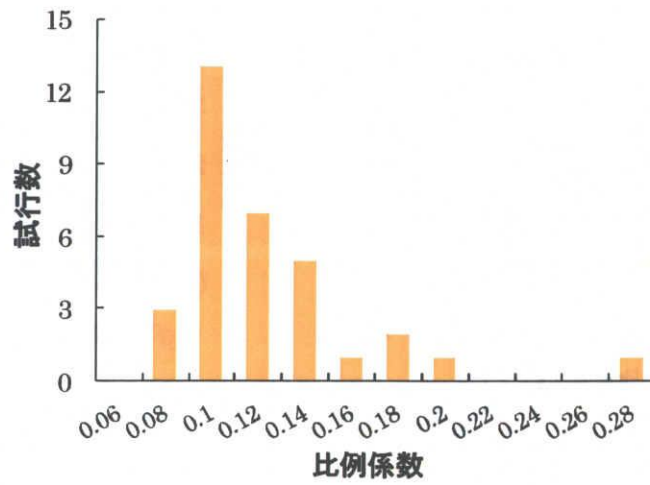
1.1.2 実験方法と結果

走行中にそれぞれの対策映像を視聴しながら、平衡感覚で知覚される車の動きと、視運動刺激により生じる視覚誘導自己運動感覚が一致するまで、背景映像の動き（比例係数）を被験者にポテンシオメーター(図 s-1)で調整させた。調整終了後にポテンシオメーターの値を記録し、これを繰返した。その際、ポテンシオメーターの値はあらかじめ設定された最小値、または最大値に合わせてから試行を行った。

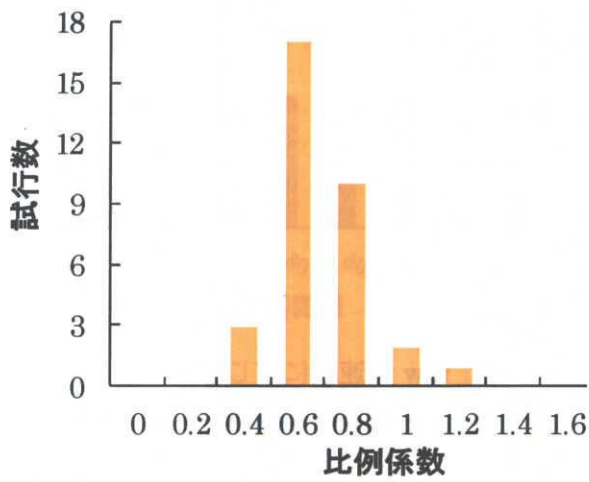
試行数は比例係数 k_f , k_p , k_s に関してはすべて 33 回、比例係数 $k_{yaw\theta}$, k_{cen} , $k_{cen\theta}$, k_{yaw} , k_{roll} は 37, 17, 15, 38, 48 回であった。これらの条件ごとに得られた値の平均値、もしくは中央値を用いて比例係数を定めた。図 s-2 に加減速対策、図 s-3 カーブ対策の予備実験の結果をヒストグラムで示す。



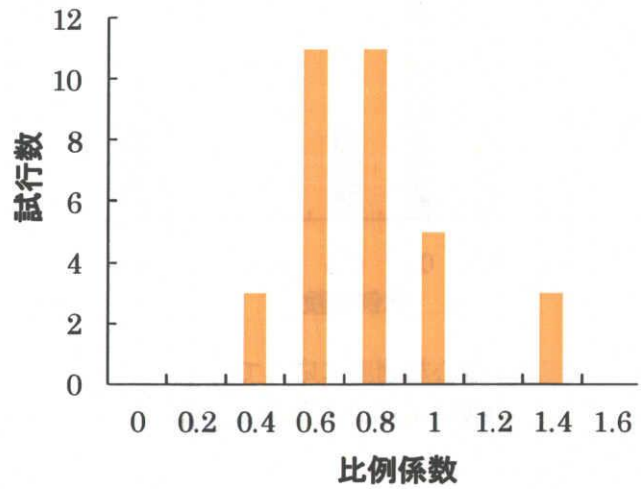
図 s1-1 ポテンシオメーター



a) 加減速に比例して前後する比例係数 k_f

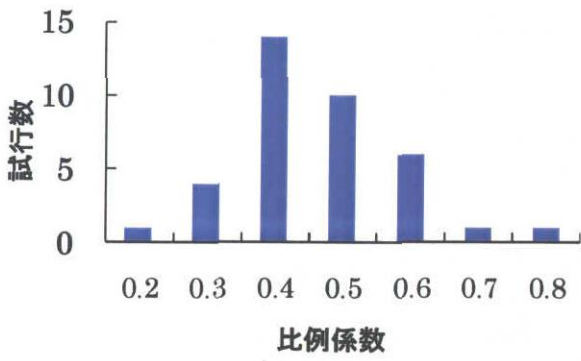


b) Pitch 角に比例して回転する
比例係数 k_p

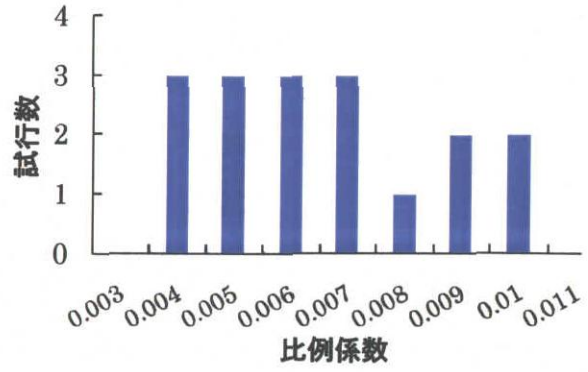


c) Pitch 角に比例して上下する
比例係数 k_s

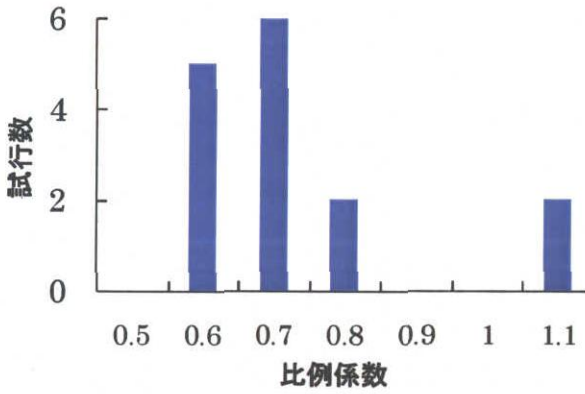
図 s1-2 加減速対策の予備実験のヒストグラム



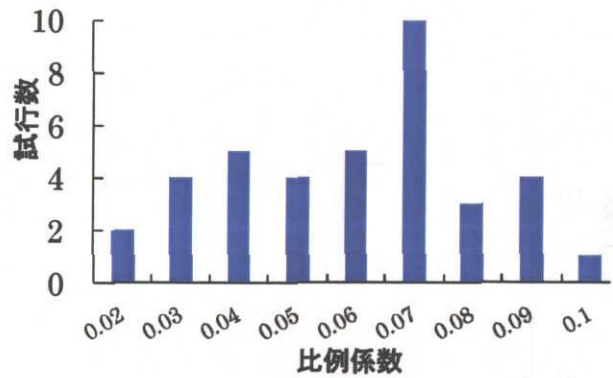
a) Yaw 角速度に応じて
回転させる比例係数 $k_{yaw\theta}$



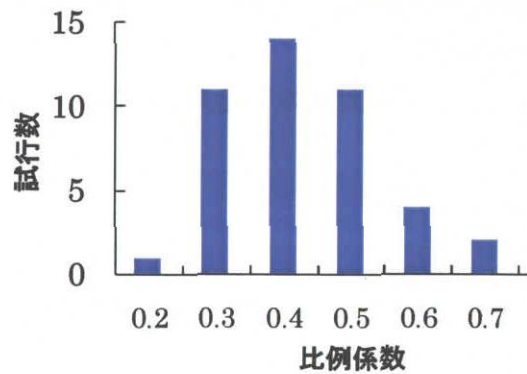
b) 遠心加速度に応じて
左右に移動させる k_{cen}



c) 遠心加速度に応じて
回転させる比例係数 $k_{cen\theta}$



d) Yaw 角速度に応じて
左右に移動させる k_{yaw}



e) 遠心加速度に比例して傾斜させる比例係数 k_{roll}

図 s1-3 カーブ対策の予備実験のヒストグラム

1.2 回転装置(コリオリマシン)を用いた予備実験

室内の回転装置(図 s-4)を用いて、車酔い対策映像を表示する仮想空間上のカメラの最適な撮影画角、及び平衡感覚で知覚される車の動きと、視運動刺激により生じる視覚誘導自己運動感覚を一致させる背景映像の最適な動きの大きさを求めるため、恒常法と呼ばれる心理学実験を行った。室内の回転装置は遠心加速度を与えることは難しいため、Yaw 角速度と前後加速度に応じた背景映像の最適な動きを求めた。

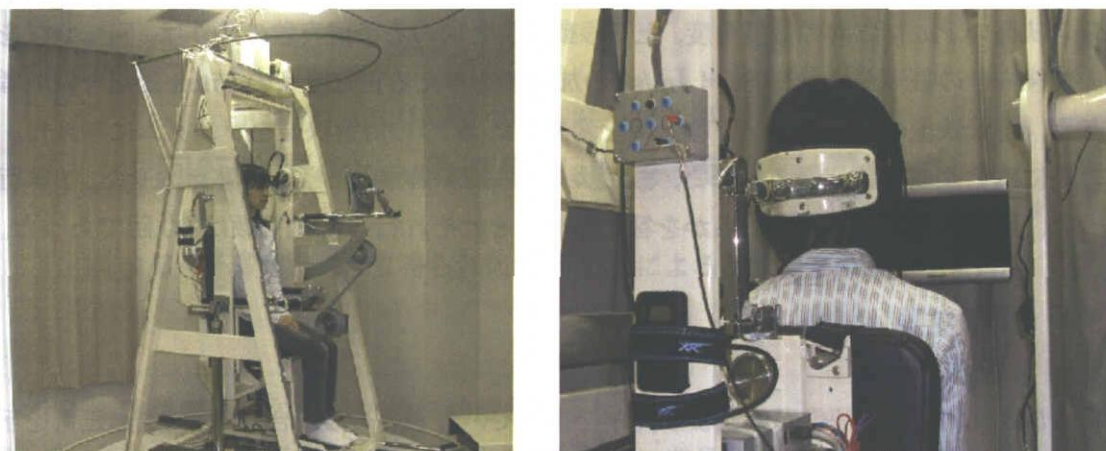


図 s1-4 回転装置

1.2.1 実験環境

被験者は撮影画角を定める予備実験では健康男女 10 名、Yaw 角速度に応じた背景映像の移動速度を定める予備実験は 10 名、前後加速度に応じた背景映像の動く大きさを定める予備事件は 14 名で、室内の回転装置を用いて、実験を行った。被験者から約 60cm の距離に車載 TV を設置した。

1.2.2 実験方法

被験者を回転装置(図 s-4, s-5)に座らせ、走行中に予期される範囲で、あらかじめ設定した Yaw 角速度、前後加速度になる正弦波状の回転刺激を与えることで、平衡感覚と一致した自己運動感覚を誘発する背景映像の動きの大きさを与えるパラメータを得た。

1.2.2.1 撮影画角

撮影画角を求める予備実験の条件は、回転装置を用いて決められた正弦波状の Yaw 回転を被験者に与え、撮影画角を 30, 40, 50, 60[deg]に変更した対策映像をランダムに与え、試行後に背景映像が感覚よりも丸みを帯びているかどうかを答えさせた。試行数は 30 回であった。

1.2.2.2 Yaw 角速度に応じた移動速度

背景映像の Yaw 角速度を求める予備実験の条件は、回転装置を用いて 5, 10, 15、20, 25[deg]の正弦波状の Yaw 回転を被験者に与え、背景映像の角速度を変更した 5 つの対策映像をランダムに与えた。試行後に感覚より背景映像の回転が速いかどうかを答えさせた。試行数は 30 回であった。

1.2.2.3 前後加速度に応じた傾斜角度と上下移動角

背景映像の Pitch 方向の傾斜角度、上下移動角度を求める予備実験の条件は、回転装置を用いて後向きの振幅が 1, 2, 3, 4 [m/s²]の加速度を与える正弦波状の Pitch 回転を被験者に与え、背景映像の傾斜角、上下移動角を変更した 5 つの対策映像をランダムに与えた。試行後に感覚より背景映像が大きい、または上下移動が大きいどうかを答えさせた。1 試行につき、傾斜角か上下角のどちらかを答えさせ、それぞれ行った試行数は 30 回であった。

1.2.3 実験結果

1.2.3.1 撮影画角

図 s-5 は縦軸に背景映像が感覚より丸みを帯びていると感じた割合、横軸に撮影画角を示す。この得られた値に Muller-Urban 法を用いて荷重を行い、最小二乗法により推定値を求めた。その結果、最適な画角を 46.0[deg]と定めた。

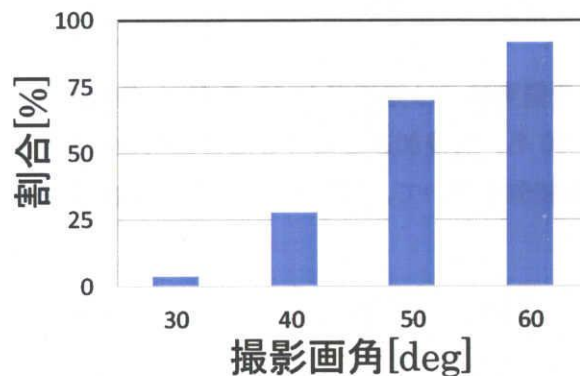


図 s1-5 背景映像が感覚より丸みを帯びていると感じたヒストグラム

1.2.3.2 Yaw 角速度に応じた移動速度

図 s-6 は横軸に回転装置で与えた Yaw 角速度、縦軸に背景映像の Yaw 角速度、また 5 つの点は刺激条件毎に得られた値に Muller-Urban 法を用いて荷重を行い、最小二乗法により刺激条件毎に推定した値である。曲線は得られた 5 つの推定値を用い、指数関数に回帰したものである。

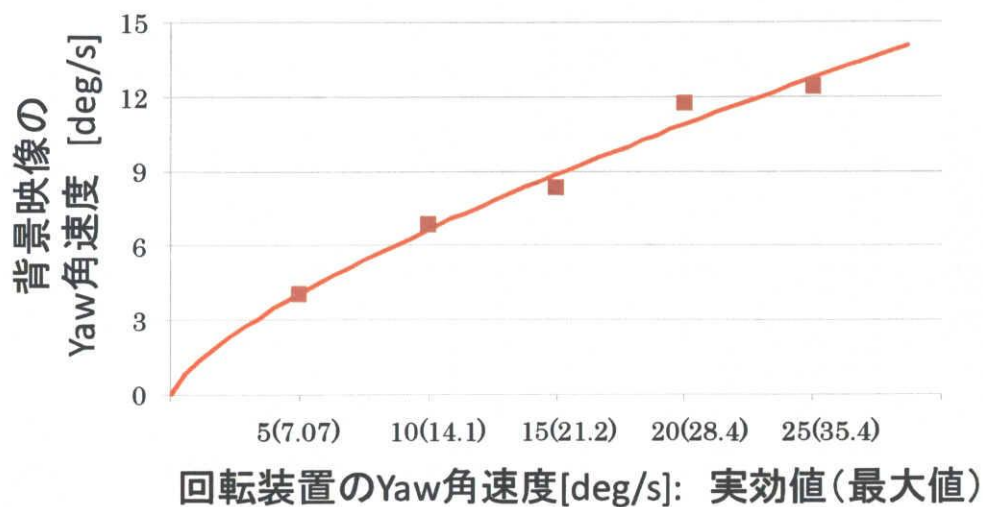


図 s1-6 予備実験により得られた Yaw 回転による背景映像の最適な角速度

1.2.3.3 前後加速度に応じた傾斜角度と上下移動角

図 s-7 は横軸に回転装置で与えた Yaw 角速度，縦軸に背景映像の Yaw 角速度，また 5 つの点は刺激条件毎に得られた値に Muller-Urban 法を用いて荷重を行い，最小二乗法により刺激条件毎に推定した値である。曲線は得られた 5 つの推定値を用い，指数関数に回帰したものである。同様に上下移動角も求めた（図 s-7）。

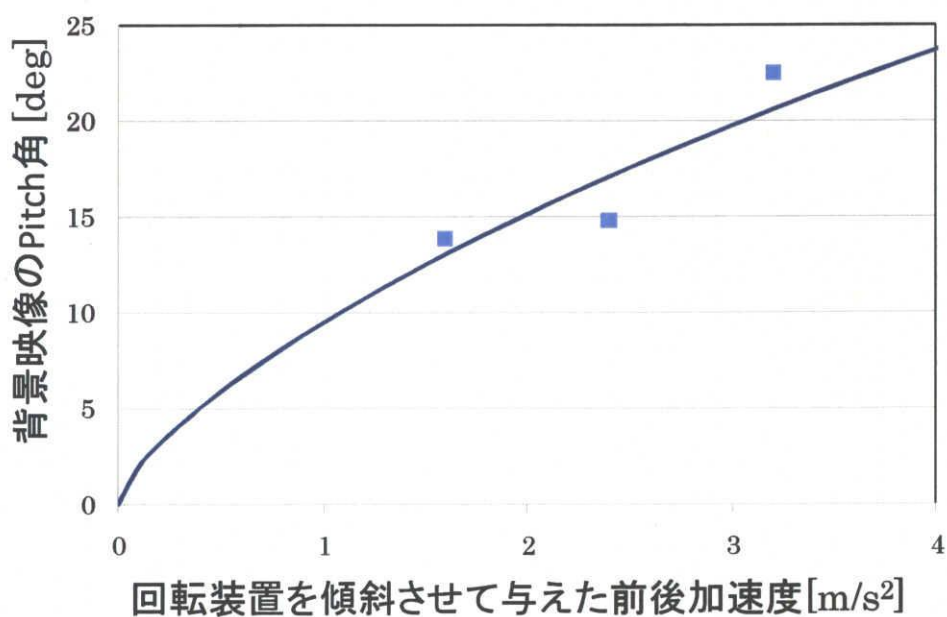


図 s1-7 予備実験により得られた前後加速度による背景映像の最適な Pitch 角

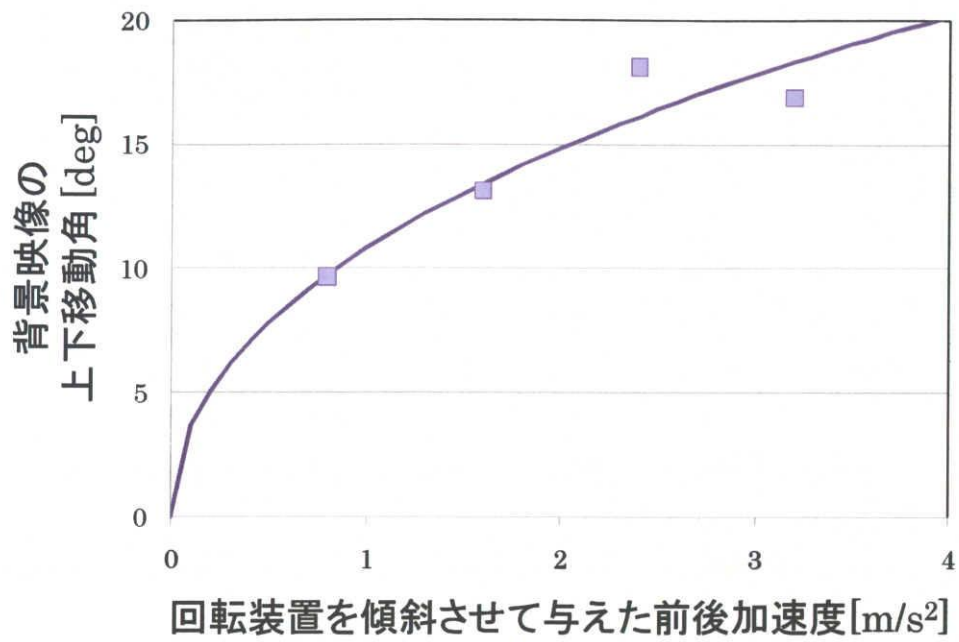


図 s1-8 予備実験により得られた前後加速度による背景映像の最適な上下移動角

2. 船酔い抑制対策

2.1 2006 年度

日程：2006/6/5～6/7 伊勢湾および熊野灘周辺

対策：

- 鉛直方向の加速度 $a_y(t)$ に応じて背景映像を速さ $V_{up}(t)$ で上下移動させる。
- 船の Roll 角 $\alpha(t)$ [rad] に応じて、主映像の角度を θ_{roll} [rad] Roll 回転させる。
- 船の Roll 角 $\alpha(t)$ [rad] に応じて、背景映像の角度を θ_{roll} [rad] Roll 回転させる。
- 船の Pitch 角 $\alpha(t)$ [rad] に応じて、主映像の角度を θ_{pitch} [rad] Pitch 回転させる。

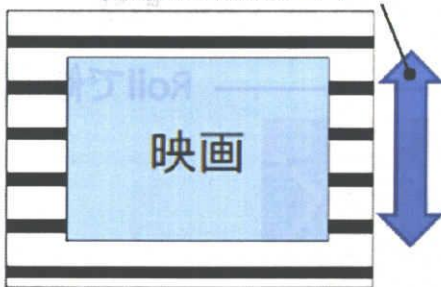
上記の値は下記の式で求める。また比例係数 K は実験中に調整した。

$$V_{up}(t) = k_{up} \times a_y(t)$$

$$\theta_{roll}(t) = k_{roll} \times \alpha(t)$$

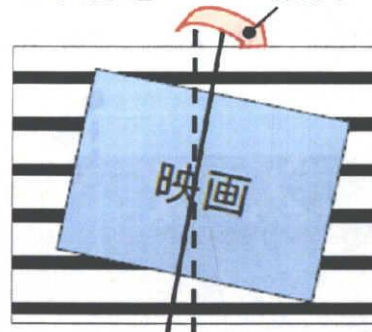
$$\theta_{pitch}(t) = k_{pitch} \times \beta(t)$$

船の鉛直方向の加速度で
背景映像を上下



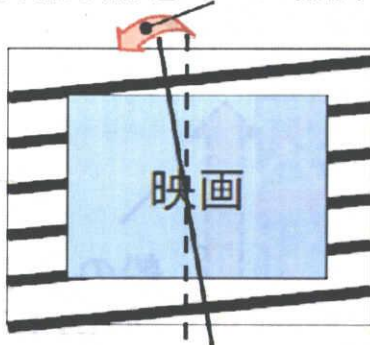
a) 加速度に応じて背景映像を上下

船のロール回転に応じて
主映像をロール傾斜



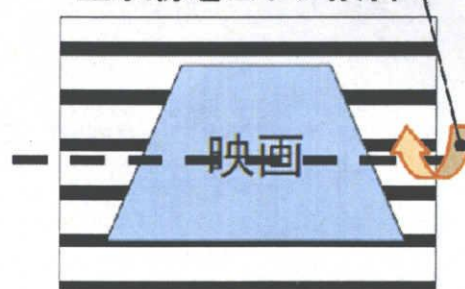
b) ロール回転に応じて主映像をロール傾斜

船のロール回転に応じて
背景映像をロール傾斜



c) ロール回転に応じて背景映像をロール傾斜

船のピッチ回転に応じて
主映像をピッチ傾斜



d) ピッチ回転に応じて主映像をピッチ傾斜

図 s2-1 2006 年度の船酔い抑制対策

2.2 2007 年度

○日時：2007/5/21～23 伊勢湾および熊野灘周辺

○対策：

- ・船の Roll 角 $\alpha(t)$ [rad]に応じて，背景映像の角度を θ_{roll} [rad]Roll 回転させる。
 - ・船の Pitch 角 $\alpha(t)$ [rad]に応じて，背景映像の角度を θ_{pitch} [rad]Pitch 回転，上下移動角度 θ_{pitch_up} [rad]とする。
 - ・船の Yaw 角速度 $\omega(t)$ [m/s²]に応じて，背景映像を角速度 $V_{yaw}(t)$ [L/s]で回転させる。
(船上では Yaw 回転はほとんど生じず，不必要な可能性あり)
 - ・船の上下移動→背景映像を上下移動(プログラム上の問題:積分誤差が拡大→未使用)
- 上記の値を下記の式で表す。

$$\theta_{roll}(t) = k_{roll} \times \alpha(t)$$

$$\theta_{pitch}(t) = k_{pitch} \times \beta(t)$$

$$\theta_{pitch_up}(t) = k_{pitch} \times \beta(t)$$

$$V_{yaw}(t) = k_{yaw} \times \omega(t)$$

比例係数は $K_{roll} : 2.0$, $K_{pitch} : 2.0$, $K_{pitch_up} : 2.0$, $K_{yaw} : 1.0$ で実験を行った。

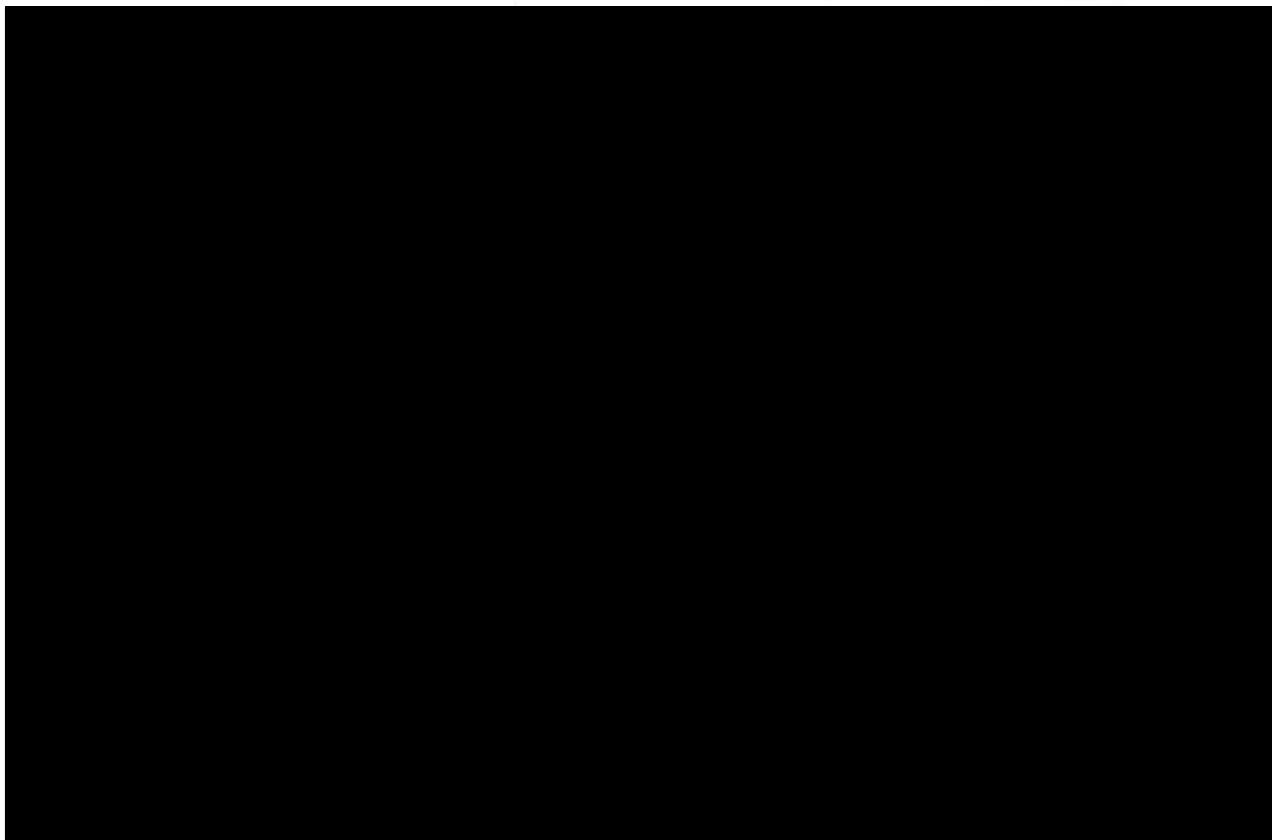


図 s2-2 2007 年度の船酔い抑制対策

2.3 2008 年度

○日時：2008.6.23～27 伊勢湾および熊野灘周辺

○対策：

- ・船の Roll 角 $\alpha(t)$ [rad]に応じて，背景映像の角度を θ_{roll} [rad]Roll 方向に回転させる。
- ・船の Pitch 角 $\alpha(t)$ [rad]に応じて，背景映像の角度を θ_{pitch} [rad]Pitch 方向に回転，上下移動角度 θ_{pitch_up} [rad]とする。
- ・船の上下移動時に生じる鉛直方向の加速度 $a(t)$ [m/s²]に応じて，背景映像を $V_{up}(t)$ [L/s]で上下移動させた。(加算積分で算出)

上記の値を下記の式で表す。

$$\theta_{roll}(t) = k_{roll} \times \alpha(t)$$

$$\theta_{pitch}(t) = k_{pitch} \times \beta(t)$$

$$\theta_{pitch_up}(t) = k_{pitch_up} \times \beta(t)$$

$$V_{up}(t) = k_{up} \times a(t)$$

比例係数は映画視聴中，被験者にボリュームを用いて適切な値に調整させた。

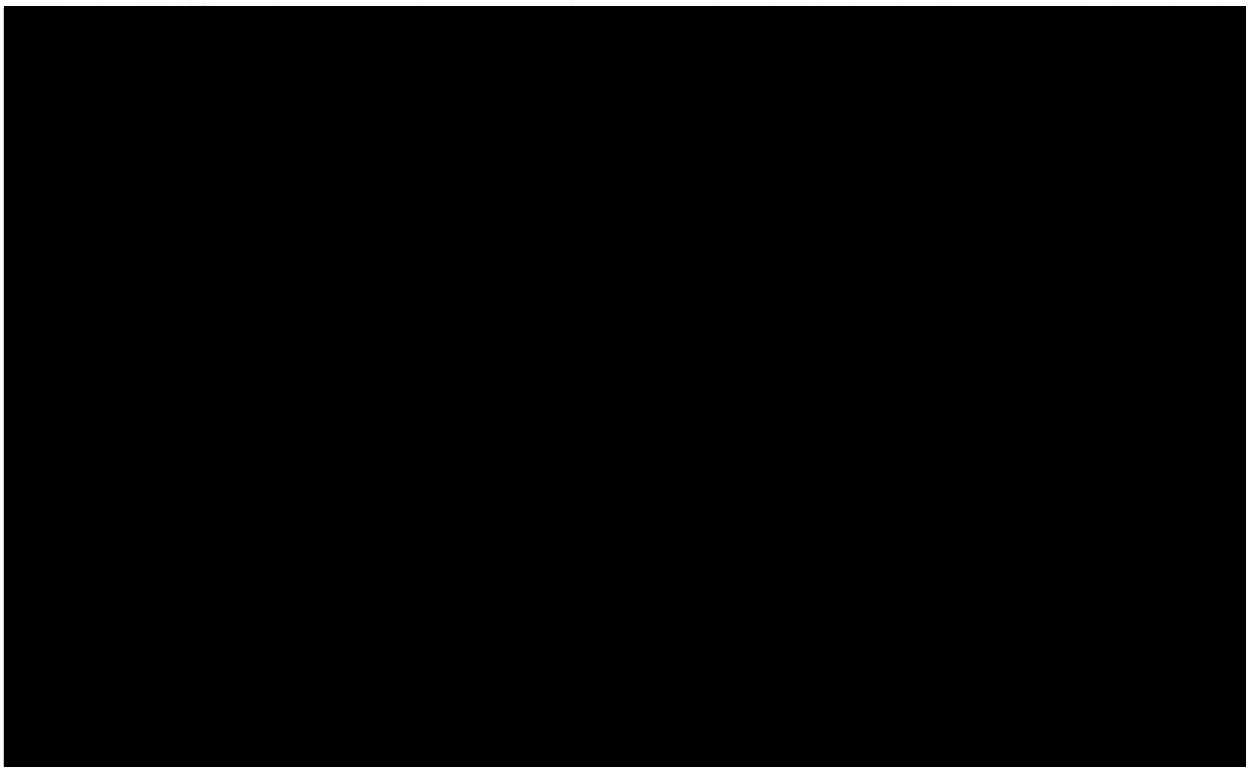


図 s2-3 後景に赤く細い線を配置し，前景を透明化した船酔い抑制対策

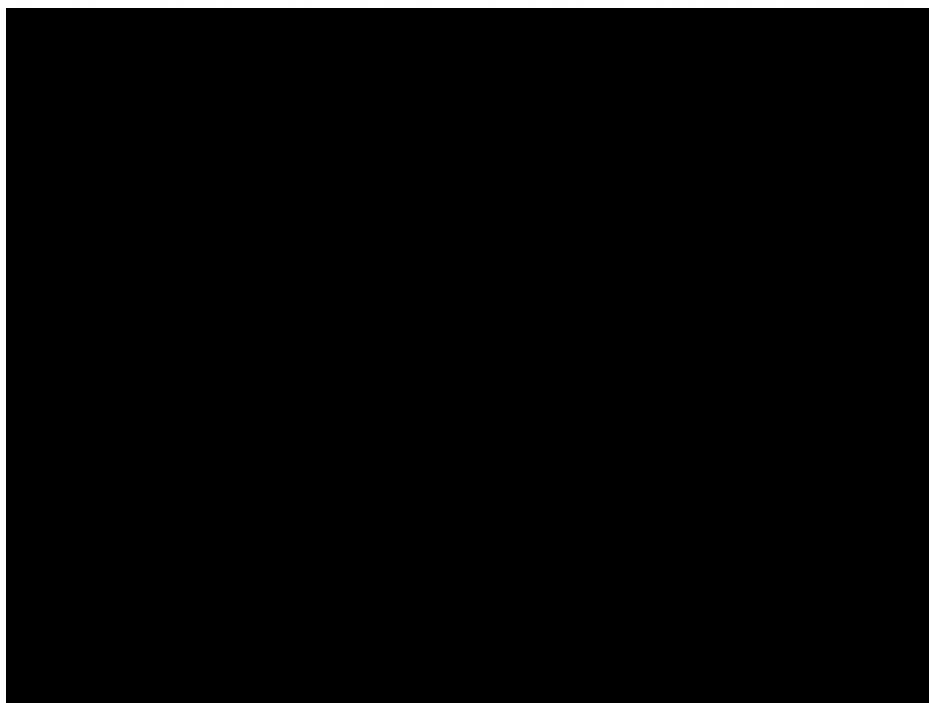


図 s2-4 後景に赤く太い線を配置した船酔い抑制対策

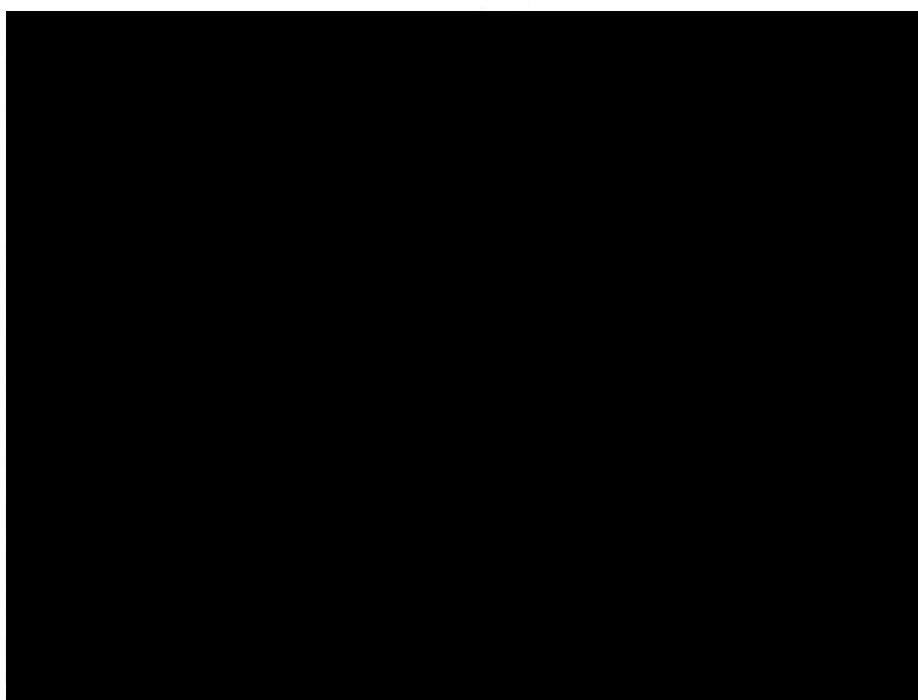


図 s2-5 前景に赤く細い線を配置した船酔い抑制対策