

# 車酔抑制を目指した車載ディスプレイの開発

## ～呼気終末CO<sub>2</sub>分圧の計測による車酔強度の定量化～

平成 18 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

日 高 教 孝

# 修士論文

## 車酔抑制を目指した車載ディスプレイの開発 ～呼気終末 CO<sub>2</sub> 分圧の計測による車酔強度の定量化～



平成 18 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

日高 教孝

## 目次

1. 序論	2
2. 動揺病	3
2-1. 動揺病	
2-2. 動揺病の症状	
2-3. 動揺病の発症機序	
3. 車酔抑制方法	4
3-1. Yaw 回転運動の対策（実験 1）	
(1) 縦縞移動手法	
(2) 台形化手法	
(3) 合成手法	
3-2. Yaw 回転運動，加減速，遠心力の対策（実験 2）	
(1) Yaw 回転，加減速，遠心力（全対策）	
(2) 加減速（加減速）	
(3) Yaw 回転，遠心力（回転複合）	
(4) Yaw 回転（Yaw 回転）	
4. 生体信号	7
4-1. 呼気終末二酸化炭素分圧（ETCO <sub>2</sub> 分圧）	
4-2. ETCO <sub>2</sub> 分圧の減少	
4-3. 呼気二酸化炭素分圧の測定	
5. 実験	8
5-1. 実験 1（Yaw 回転運動）	
5-2. 実験 2（Yaw 回転，加減速，遠心力）	
6. 結果	10
6-1. 相対 ETCO <sub>2</sub> 分圧の求め方	
6-2. 感受性クラスによる分類と補正	
6-3. 実験 1 の結果	
6-4. 実験 2 の結果	
7. 考察	11
結果グラフ	12
付録	17

## 1. 序論

近年カーナビゲーションが非常に普及している。国土交通省の調べでは、貨物・乗用車の保有台数が約 7400 万台に対して、カーナビゲーションの出荷台数が約 2400 万台である<sup>1)</sup>。これは単純に考えると自動車 3 台のうち 1 台はカーナビゲーションを搭載していることになる。また車載ディスプレイの普及により、走行中に映画の視聴が可能になった。しかし、走行中の車内で映像を見た場合に車酔が起こりやすくなることが懸念される。車走行時に映画を視聴した場合、普通に乗車した場合と比べて車酔の強度は約 2 倍に増大する<sup>2)</sup>。

車走行時に映画を視聴した場合、車酔が起こりやすくなることは感覚矛盾説によって説明できる。感覚矛盾説とは、三半規管と耳石器の平衡感覚器、視覚、皮膚や関節などの体性感覚が知覚した運動感覚情報の中で矛盾が生じると動揺病が発生するという説である<sup>3)</sup>。車走行時に映画や本を見たとき、視覚からは身体の移動や回転などの運動感覚情報が得られない。しかし、平衡感覚器では身体の動きを知覚する。そのため、2つの感覚器で知覚した感覚情報の間に矛盾が生じるので車酔を起こしやすいと考える。そこで、平衡感覚と一致した運動感覚情報を視覚から与えて矛盾をなくすことにより、車酔を抑制する。森本らは、加藤らの先行研究<sup>4)</sup>の問題点を指摘した上で、右左折・カーブ時に生じる Yaw 回転運動に対する車酔抑制手法を考案した。この抑制手法は、車載ディスプレイに Yaw 回転の運動情報を付加した映像を映し、この映像を被験者に視聴させることで車酔抑制を図った。実車による走行実験の結果、およそ 7 割の車酔抑制効果を得たことを報告した<sup>5)</sup>。

従来の研究では動揺病対処法の有効性を検証する際に、被験者の主観的な不快感を用いた評価を行ってきたが、客観的な評価指標による評価を行った研究報告については未だ発表されていない。動揺病の症状は様々であり必ずしも不快感だけが評価指標というわけではないため、より信頼性の高い評価を行うためには客観的な評価指標も必要となる。朴丹らはコリオリ刺激を与えたときの呼気二酸化炭素分圧を計測し、終末二酸化炭素分圧 (End Tidal CO<sub>2</sub> Pressure, 以降 ETCO<sub>2</sub> 分圧という) と不快感の関係を調査した。その結果、不快感強度の増大に伴い ETCO<sub>2</sub> が減少するという傾向がみられたことを報告した<sup>6)</sup>。

そこで本研究では、新たな車酔抑制手法の考案と ETCO<sub>2</sub> 分圧により車酔の強度を評価することを目的とした。森本らの実験<sup>5)</sup>を ETCO<sub>2</sub> 分圧により評価し、ETCO<sub>2</sub> 分圧を用いた客観的評価手法の有効性を示した。新たな抑制手法には、Yaw 回転運動に加え、加減速、遠心力への対策を施した。提案した車酔抑制手法を ETCO<sub>2</sub> により評価し、その有効性を検証した。

## 2. 動揺病<sup>7)</sup>

### 2-1. 動揺病

動揺病とは、船酔い・車酔い・空酔などの乗り物酔いのことである。現在はバーチャルリアリティ（VR）を利用した 3D 画像の視聴時におけるシネラマ酔い、宇宙飛行士が体験する宇宙酔いもこの中に包括される。

動揺病の発症メカニズムは未だ明らかにされていないが、有力な説として感覚矛盾説がいわれている。この説では動揺病が発症する原因については説明されているが、外界刺激とそれに伴う動揺病の症状との量的関係については明らかにされていない。

### 2-2. 動揺病の症状

動揺病の症状は、不快感・悪心・頭重・脱力感などの自覚症状や、嘔吐・顔面蒼白・冷汗・あくびなどの他覚症状など、その症状は多彩である<sup>8)</sup>。動揺病発症時にはこれらの症状が現れるのが一般的であるが、個人差があり、ほとんど悪心を自覚せずに嘔吐をきたす者もいれば、悪心のみで嘔吐しない者もいる。

これらの症状の大部分は自律神経系の失調状態のために起こるといわれている。自律神経系とは、生命の維持に必要な器官の諸機能を制御している神経系である。

### 2-3. 動揺病の発症機序

動揺病発症の有力な説は、感覚矛盾説である。われわれは身体的位置移動や回転などの運動感覚情報を、三半規管や耳石器の平衡感覚器、視覚、皮膚や関節などの体性感覚によって知覚しているが、これら感覚情報の間で矛盾が生じると動揺病が発生するというのが感覚矛盾説である<sup>3)</sup>。

### 3. 車酔抑制方法

#### 3-1. Yaw 回転運動の対策（実験 1）

視覚刺激により身体が移動または回転しているような運動感覚，つまり視覚誘導自己運動感覚（以降ベクシオンという）が発生することが知られている．またベクシオンは視覚刺激を中心視より周辺視に，前景より背景に与えたほうが大きく発生するという報告がある<sup>9)</sup>．この報告を参考に車載ディスプレイに映す映像を利用してベクシオンを与える 3 種の対策案を考えた．

##### （1）縦縞移動手法

対策案 1-1（以降「縦縞」という）は，映画の周りに背景画像として白と黒の縦縞を配置し，車両の回転に合わせて縞模様を左右に移動させた．背景の縦縞は，車両の左回転時には右方向に，右回転時には左方向に動く．Yaw 方向の角速度を  $w[\text{deg/s}]$ ，背景画像の移動速度を  $v[\text{deg/s}]$  とすると， $w$  と  $v$  の関係式は (2. 1) 式となる．このときの背景画像の移動速度  $v$  は Yaw 回転時に知覚する回転運動感覚を表しており，予備実験により求めた（「移動速度の決め方」については奥村らの研究を参照<sup>10)</sup>）．

$$v = w * 0.21 \quad (2. 1)$$

なお車両の回転運動は車両に取り付けた角速度センサにより検出した．

##### （2）台形化手法

対策案 1-2（以降「台形化」という）は，映画表示部中心の垂直軸廻りに映画を回転させることでベクシオンを与えた．背景画像には黒画像を配置している．車両の左回転時には映像を右回転し，右回転時には映像を左回転させた．Yaw 方向の角速度を  $w[\text{deg/s}]$ ，映像の回転角を  $\theta [\text{deg}]$  とすると， $w$  と  $\theta$  の関係式は，

$$\theta = w * 0.96 \quad (2. 2)$$

となる．

##### （3）合成手法

対策案 1-3（以降「合成」という）は，対策案 1 の背景画像（縦縞模様）と対策案 2 の前景画像（映画表示部の回転）を合わせた映像を使用した．

実験 1 の映像の表示例を図 1 に示す．

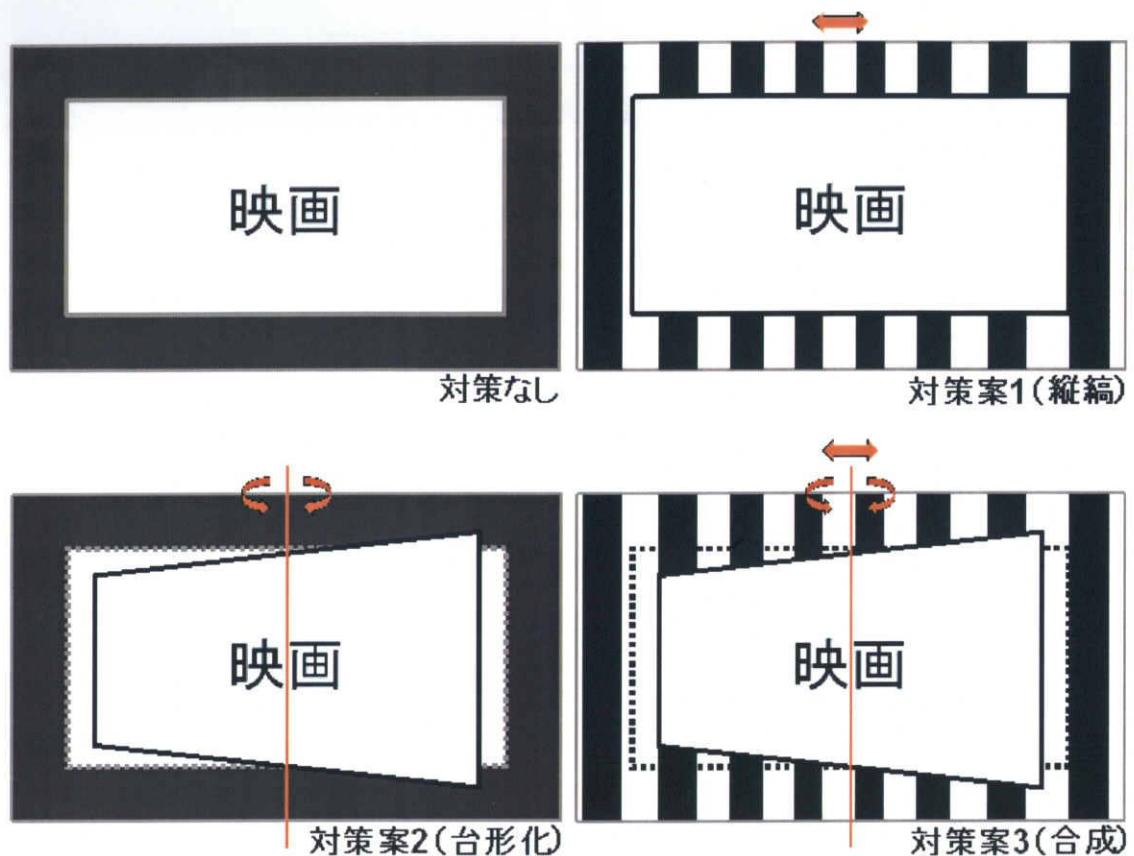


図 1

### 3-2. Yaw 回転運動，加減速，遠心力の対策（実験 2）

実験 1 の Yaw 回転運動の対策に加えて，加減速，遠心力の対策を組み合わせた 4 種の対策案を考えた．映画作成において，トンネルを模した筒状の中心にカメラ位置（映像視点）を定めた．トンネルの壁面には格子状のストライプ模様を使用した．トンネルの伸縮・視点の前後移動によりストライプの前後移動・間隔の拡張を行い，加減速の運動感覚を与えた．車両の Yaw 回転運動に合わせてカメラ位置を移動させ，映画表示部を変形させた．なお映画表示部は，実験 1 の「台形化」のように変形して見える．また天井・床面を左右に移動させて，回転時に生じる遠心力を表現した．（映像作成の詳細を付録 1 に示す）

- (1) 対策案 2-1, Yaw 回転・加減速・遠心力（以降「全対策」という）
- (2) 対策案 2-2, 加減速（以降「加減速」という）
- (3) 対策案 2-3, Yaw 回転・遠心力（以降「回転複合」という）
- (4) 対策案 2-4, Yaw 回転（以降「Yaw 回転」という）

実験 2 の映像の表示例を図 2 に示す．

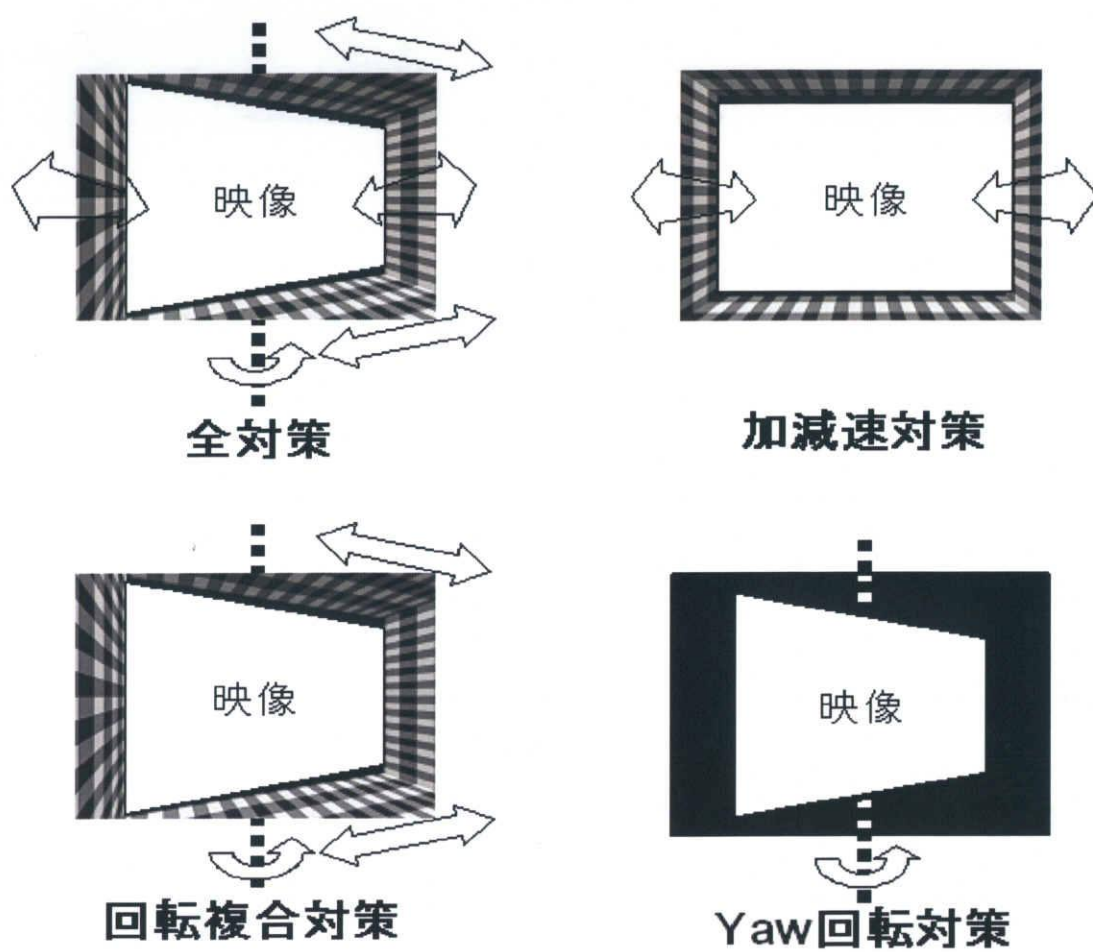


図 2



## 4. 生体信号

### 4-1. 呼気終末二酸化炭素分圧 (ETCO<sub>2</sub> 分圧)

呼吸ごとの CO<sub>2</sub> 分圧は，呼気中に高くなり，呼気終末時に最高値に達する．この終末呼気における CO<sub>2</sub> 分圧の最大値を ETCO<sub>2</sub> 分圧という．健常者の ETCO<sub>2</sub> 分圧は，通常では  $40 \pm 5 \text{ mmHg}$  で変動する．ETCO<sub>2</sub> 分圧の用途は，患者の換気機能評価，人工呼吸の動作確認，心肺停止患者への蘇生処理の効果を評価するために用いられる．CO<sub>2</sub> 分圧の計測器は大小さまざまなで，持ち運びに便利な小型の計測器がある．また CO<sub>2</sub> 分圧の測定は比較的安定して簡単に行える．

### 4-2. ETCO<sub>2</sub> 分圧減少

傍証の研究であるが，動揺病発症時に身体の内部温度（以降深部温という）の低下，また ETCO<sub>2</sub> 分圧が減少するという結果がある．これらの研究結果から，動揺病発症時には代謝が低下し，ガスの交換量が低下していると考ええる．朴丹らは動揺病強度の客観的評価指標を得るために，コリオリ刺激を与えたときの，不快感強度と ETCO<sub>2</sub> の関係について調査した<sup>6)</sup>．その結果，不快感強度の増大に伴い ETCO<sub>2</sub> が減少する傾向があることを報告した（不快感と ETCO<sub>2</sub> の相関グラフを付録 2 に示す）．

### 4-3. 呼気二酸化炭素分圧の計測

呼気二酸化炭素分圧の計測には，ハンドヘルド SpO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> モニタ ポケットケア（製造：オータックス株式会社，販売：日本光電工業株式会社）を使用した．また同社製の CO<sub>2</sub> センサ（TG-121T）とネイザルアダプタ（YG-120T）をモニタに接続した．ネイザルアダプタのチューブから被験者の呼気を採取し，採取した呼気から二酸化炭素分圧を測定した．測定したデータはモニタを通じてパソコンへ送られ，16 進のバイナリデータで保存した．なおデータは 50Hz でサンプリングした．

## 5. 実験

提案した車酔抑制手法の有効性の検証のため、実車を用いた走行実験を行った。対策案を使用したときに生じる車酔強度と比較するため、対策を施さない映像を視聴した場合（「対策なし」）、映画を見ずに乗車した場合（「普通乗車」）についても同様の実験を行った。

### 5-1. 実験 1（Yaw 回転運動）

#### ・映像の種類

映像「縦縞」、「台形化」、「合成」を使用した 3 つの対策案と、「対策なし」、「普通乗車」を合わせた 5 条件について実験を行った。

#### ・表示画面

車載ディスプレイの映像表示部の大きさは横 23.5cm、縦 14.0cm であり、解像度は 800×480 であった。映画表示部の大きさは横 20.5cm、縦 10.5cm であった。また被験者からディスプレイまでの距離は平均 60cm であり、視角は 21° であった。

#### ・被験者

10 歳代後半～20 歳代前半の健康な男女 53 名（男性 39 名、女性 14 名）を被験者とした。

#### ・方法

実験を行うにあたり、あらかじめ被験者には実験の主旨、内容、手順、評価方法、予想される人体への影響などについて十分な説明を行い、書面による同意を得た。確認した項目は、実験中に車酔が発症し不快感が生じる可能性があること、被験者の希望により実験期間中であればいつでも参加の延期、中断ができること、その延期・中断によって不利益を被らないこと、実験中に得た個人データを個人が特定できる形では公表しないことの 4 項目であった。

実験コースには、信号機がなくカーブの多い（Yaw 回転の最大角速度 10～35deg/s：12 箇所）田舎道を選んだ（図 3 参照）。実験では 10 人乗（運転手 1 名、実験者 1～3 名、被験者 1～5 名：内 2 名から生体信号を計測 — 座席等の車内配置の詳細を付録 3 に示す）の車両を使用した。生体信号を計測する被験者には、呼気測定器ネイザルアダプタのチューブを鼻腔に 2～3mm 程度差込み、脈波計測器フィンガーカウを右手人差し指に装着させた。また頭部の動きを計測するために加速度計とジャイロを取り付けたヘッドギアを被らせた。生体信号および頭部運動を走行開始前 5 分間と走行中 21 分間の計 26 分間測定した。走行中に被験者には上記 5 条件内の 1 つの刺激を与え続け、1 分間おきに不快感強度を答えさせた。不快感強度を答えるとき、評定尺度値に 0～10 の整数値を用い、「0」を一切不快でない状態、「10」を動揺病の受忍限界状態として、これら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。

- ・試行数

生体信号計測の全試行回数は 102 回であった。うち「縦縞」は 10 試行、「台形化」は 33 試行、「合成」は 12 試行、「対策なし」は 26 試行、「普通乗車」は 21 試行であった。

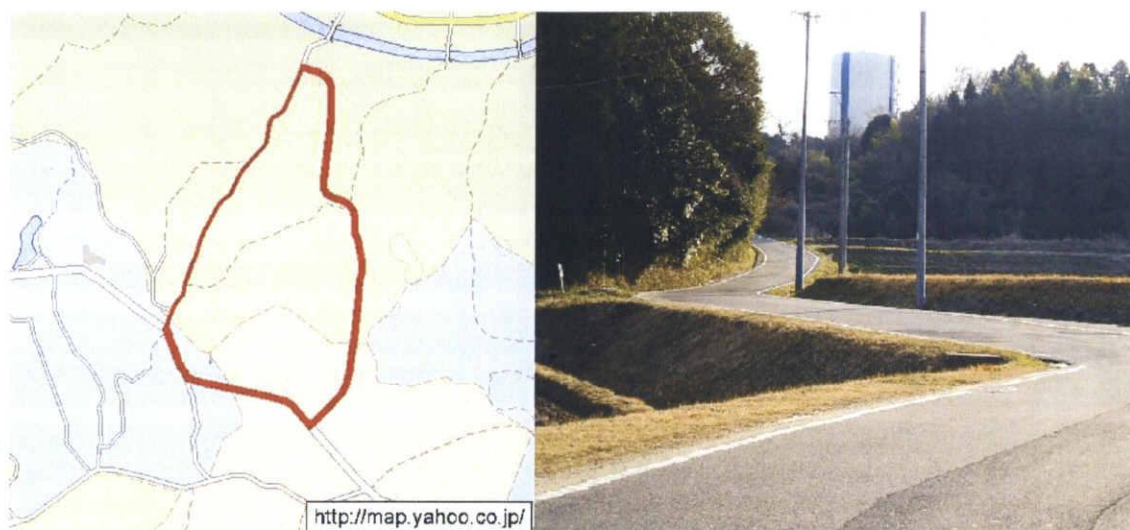


図 3

## 5-2. 実験 2 (Yaw 回転運動, 加減速, 遠心力)

実験 1 から変更がある箇所だけ記す。

- ・映像の種類

映像「全対策」、「加減速」、「回転複合」、「Yaw 回転」を使用した 4 つの対策案と、「対策なし」、「普通乗車」を合わせた 6 条件について実験を行った。

- ・被験者

10 歳代後半～20 歳代前半の健康な男女 68 名 (男性 47 名, 女性 21 名) を被験者とした。

- ・実験方法

生体信号を計測する被験者には、呼気測定器ネイザルアダプタのチューブを鼻腔に差込み、心拍を計測するセンサを右鎖骨に 1 箇所、左わき腹に 2 箇所貼り付けた。実験 1 では脈波計測器および頭部運動計測用のヘッドギアを装着させたが、この実験では使用しなかった。生体信号計測は実験場所に到着するまでの移動中およそ 15 分間、走行開始前の停車中 10 分間、そして走行中の 21 分間を連続して行った。

- ・試行数

生体信号計測の全試行回数は 171 回であった。うち「全対策」は 36 試行、「加減速」は 26 試行、「回転複合」は 21 試行、「Yaw 回転」は 27 試行、「対策なし」は 32 試行、「普通乗車」は 29 試行であった。

## 6. 結果

### 6-1. 相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の求め方

計測した呼気 CO<sub>2</sub> 分圧のデータより、一呼吸ごとの最大値 ETCO<sub>2</sub> 分圧を求めた。得られた ETCO<sub>2</sub> 分圧データにおいて呼吸の乱れ等による異常な点を除去したのち、3 次のスプライン補間を行い、5 秒間隔でリサンプルした。走行中の ETCO<sub>2</sub> 分圧を走行前 (実験 1・10～300[sec], 実験 2・600[sec]) の平均値で除し、相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の時間推移を求めた。(フローチャートを付録 4 に記す) 各時刻 (1 分単位) において前後 30 秒間のデータを平均し、その時刻における相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の代表値とした。

### 6-2. 感受性クラスによる分類と補正

各被験者を 3 つの感受性クラス High, Middle, Low に分類した。感受性クラスとは車酔いの生じ易さを表す指標である。被験者が口頭した不快感を直線回帰し、その傾きを求めた。被験者ごとに傾きを平均し、データ数がほぼ均等になるように感受性クラスを定めた。各刺激条件において感受性クラスにより各試行を分類したのち、各クラス内で相対 ETCO<sub>2</sub> を平均した。各刺激条件において感受性クラスの試行数の比が均等となるように補正を加えた。

### 6-3. 実験 1 の結果

「対策なし」の条件について各試行の相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧と不快感の時間推移を結果 1 に示す。感受性別に分類し刺激条件毎に平均した相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧と不快感の平均値の時間推移を結果 2 に示す。感受性クラスと相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の関係について、不快感強度が高い傾向にある感受性 High のクラスでは相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧が大幅に減少した。感受性が低くなるにつれて、相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の減少も少なくなった。各刺激条件における感受性クラスの試行数の比で補正した結果を結果 3 に示す。各相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の推移を直線回帰し、その傾きを求めた。「対策なし」の場合に比べて「普通乗車」時の傾きまで相対 ETCO<sub>2</sub> の減少が抑えられたときを 100% の車酔い抑制効果としたとき、「縦縞移動」では 65.2%、「台形化」では 87.0%、「合成」では 69.6% の抑制効果となり、それぞれの対策案で ETCO<sub>2</sub> の減少が抑えられた結果が得られた。また相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧と不快感の相関関係を見ると、車酔いの受忍限界状態 (不快感「10」) に至るまでに、相対 ETCO<sub>2</sub> はおよそ 3.5 割減少した (結果 4)。

### 6-4. 実験 2 の結果

各刺激条件において感受性クラスの試行数の比で補正した相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧の時間推移の結果を結果 5、相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧と不快感の相関グラフを結果 6 に示す。実験 1 と同様の手順で車酔い抑制効果を求めたところ、「全対策」においては約 7 割の抑制効果を得たが、「加減速」、「回転複合」、「Yaw 回転」の映像では抑制効果が得られなかった。

## 7. 考察

実験 1 の結果では、提案した 3 種の対策案すべてに約 7, 8 割の車酔抑制効果が得られた。これは被験者の主観的不快感によって評価した場合とほぼ同等の結果であり、3 種の対策案が有効であることが ETCO<sub>2</sub> の測定によっても示された。

実験 2 では、Yaw 回転、加減速、遠心力のすべてへの対策を施した映像では約 7 割の車酔抑制効果が得られたが、他の 3 種の映像では抑制効果が得られなかった。このことは、個々では効果がない対策案でも、組合せることにより平衡感覚で知覚する運動感覚に近いベクションを与えることを示唆している。また実験 1 では効果が得られた Yaw 回転の対策案について、実験 2 では映像枠をつけなかったことが原因と考えられる。映像枠がないために映画と背景の境界が曖昧になり、ベクションの誘起が低減され、感覚情報間の矛盾が大きくなったと考える。他の要因には、車両の Yaw 回転角速度に対する映像の回転角が、実験 1 と 2 では異なったことである。実験 1 では平衡感覚で知覚した運動感覚に近いベクションを与えたが、実験 2 では平衡感覚とは異なる感覚を与えたことが考えられる。

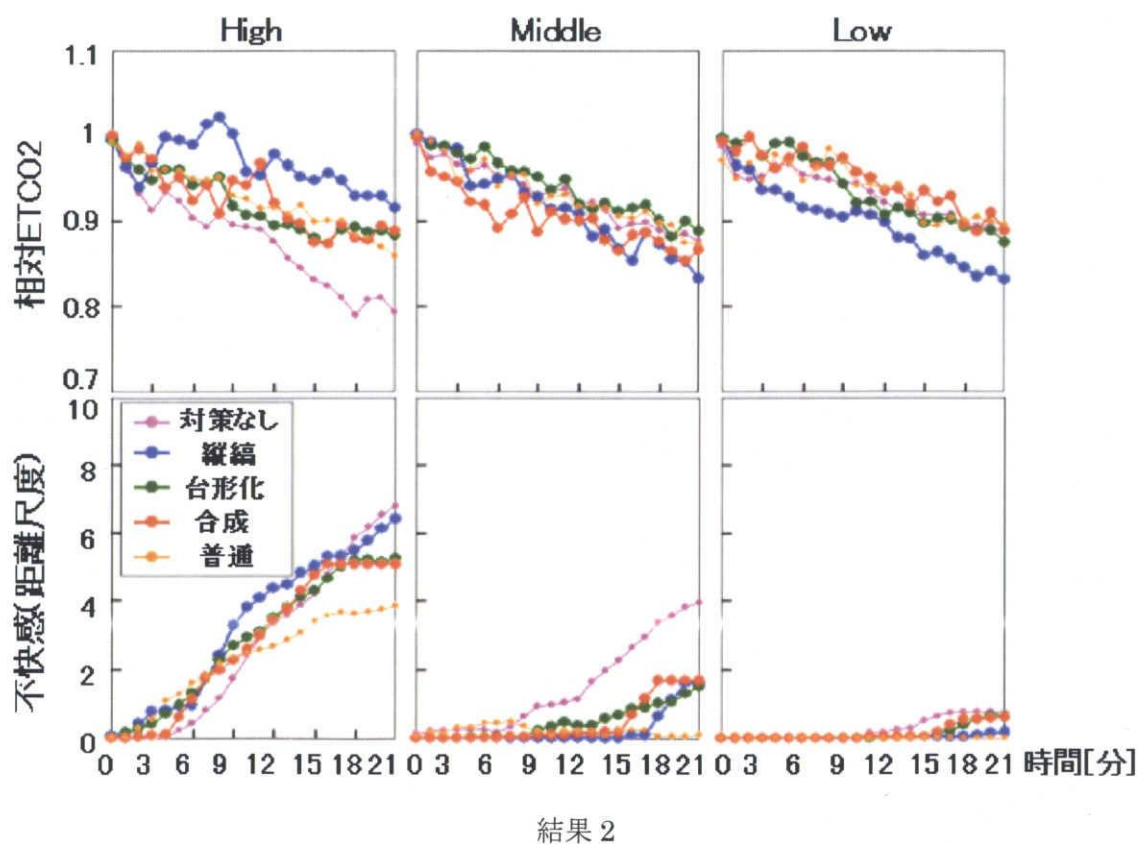
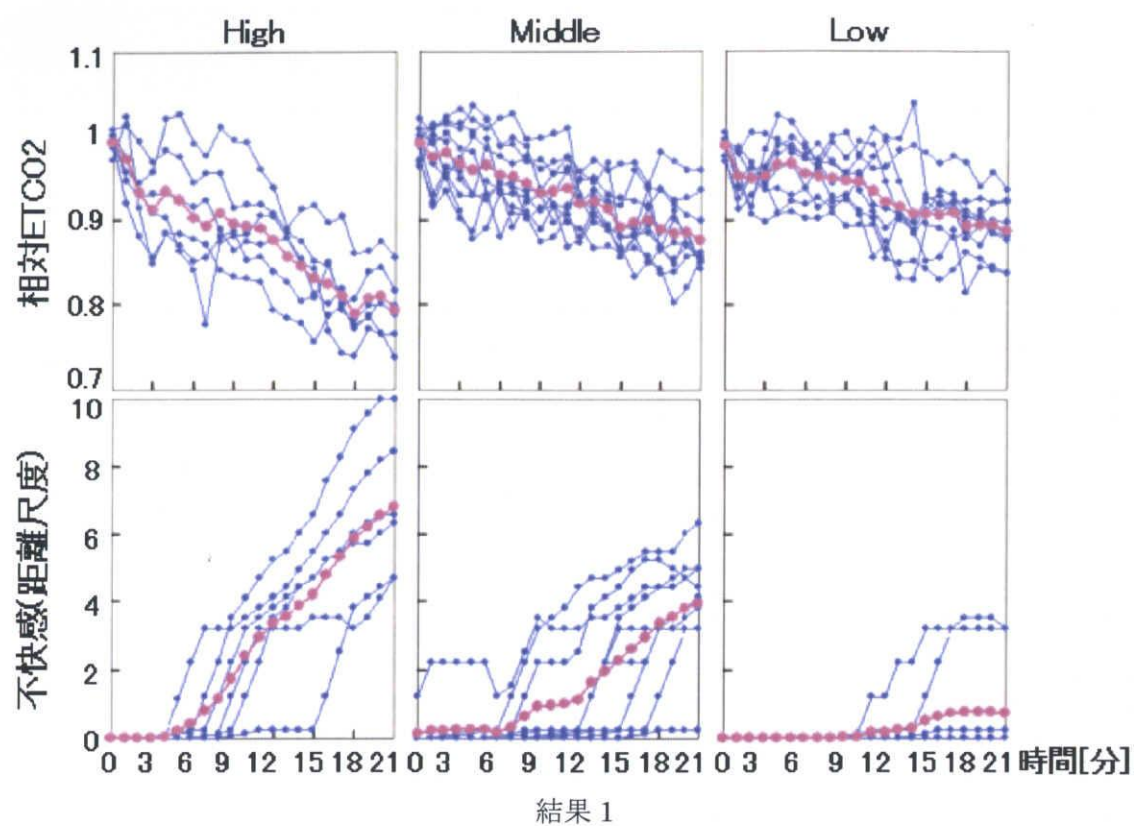
車酔の実験においても不快感の増大に伴って、ETCO<sub>2</sub> が減少するという傾向が見られた。一方、実験 1 の結果（結果 1）において感受性 Low のクラスの不快感・ETCO<sub>2</sub> の時間推移を見ると、不快感強度があまり増加していないのに相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧が減少している結果が得られた。そこで不快感強度を「0」と答えているが、相対 ETCO<sub>2</sub> 分圧は減少した試行について調べたところ、全試行 102 試行中 32 試行あった。これらの試行では、被験者に不快の意識はないが、車酔による生理変化が起こっていると考えられる。このことから ETCO<sub>2</sub> 分圧は、被験者の主観的不快感の傾向によらずに車酔を評価することができ、動揺病強度を客観的に評価する一つの指標となる。

しかし実験 2 において、停車中においても ETCO<sub>2</sub> 分圧が低下する現象が見られた。走行を開始する前の停車時からの時間推移を結果 7 に示す。走行中の ETCO<sub>2</sub> の減少割合は、走行前の待機中より少ない。同じ実験条件で終始停車しながら映画を見た場合、走行している場合よりも相対 ETCO<sub>2</sub> が減少している傾向がみられた。この理由に次のようなことが考えられるため追加実験を行った。

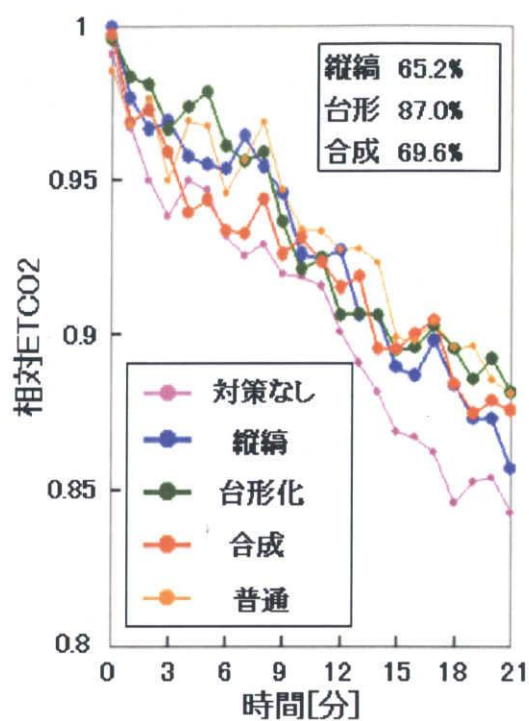
- (1) バッテリーの電圧低下による測定器具の出力変化
- (2) 測定が安定するまでに時間がかかる（測定器具、生理的要因）

実験の結果、長時間測定していても ETCO<sub>2</sub> 分圧は一定であり、(1) の理由は却下された。また計測開始時に ETCO<sub>2</sub> 分圧の減少が起こるため、測定器具の電源を入れた直後から計測を開始する場合と、2 時間ほど測定器具の電源を入れたままの状態から計測を開始した場合を比較した。電源を入れた直後では決まって ETCO<sub>2</sub> の減少が起こり、電源を入れたままの状態からの計測では安定した測定ができたことから、測定器具が安定するまでに時間がかかることが考えられる。

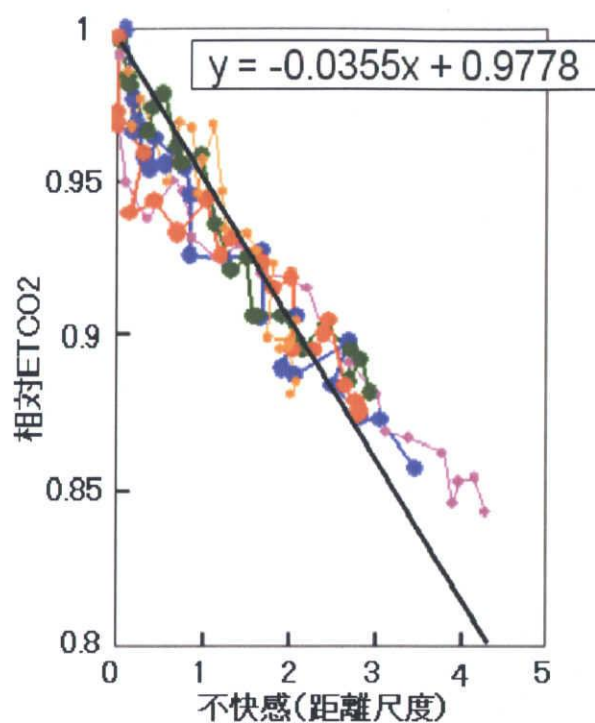
# 結果グラフ



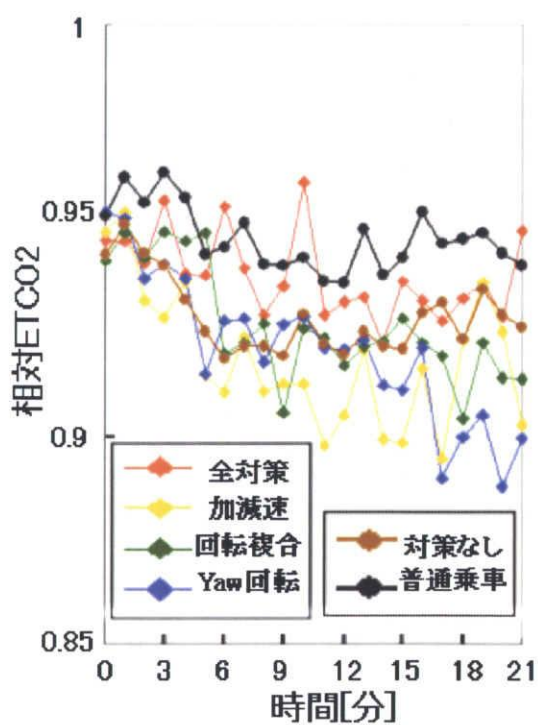




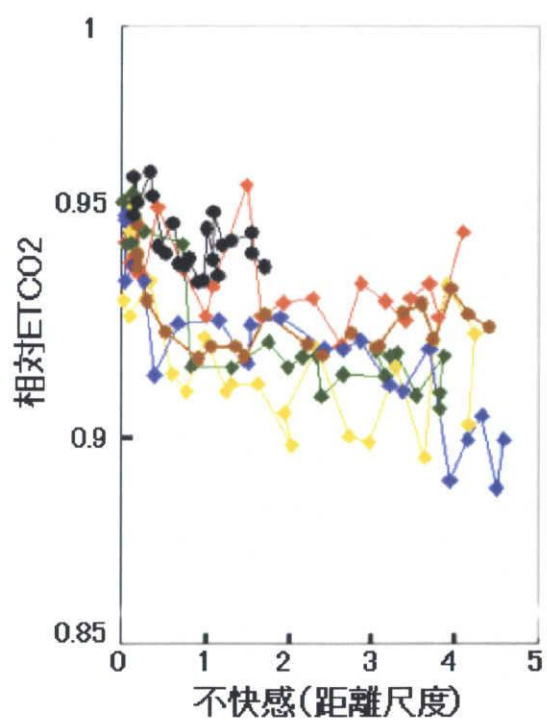
結果 3



結果 4

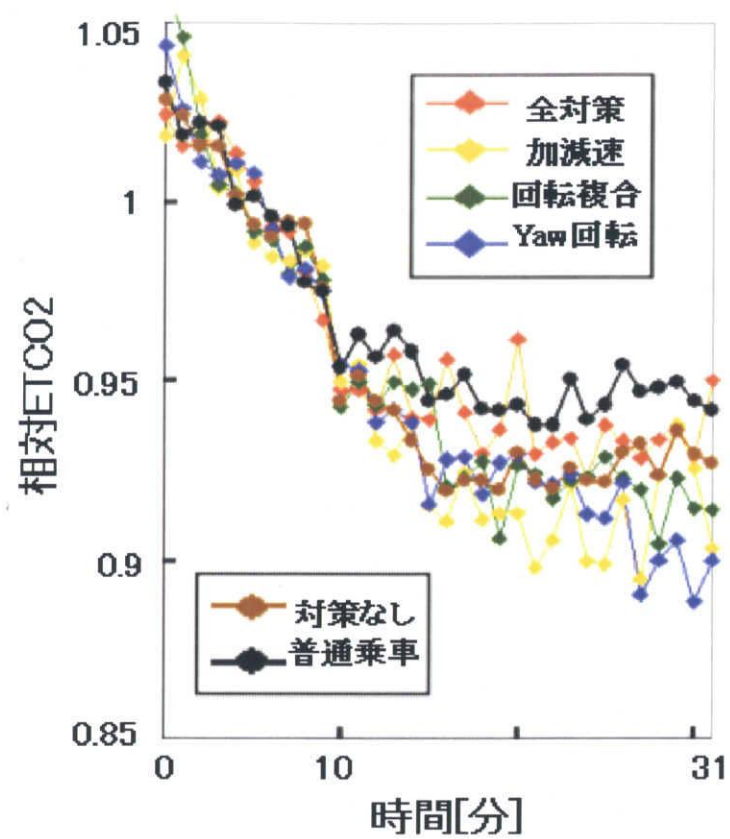


結果 5



結果 6





結果 7

#### 参考文献

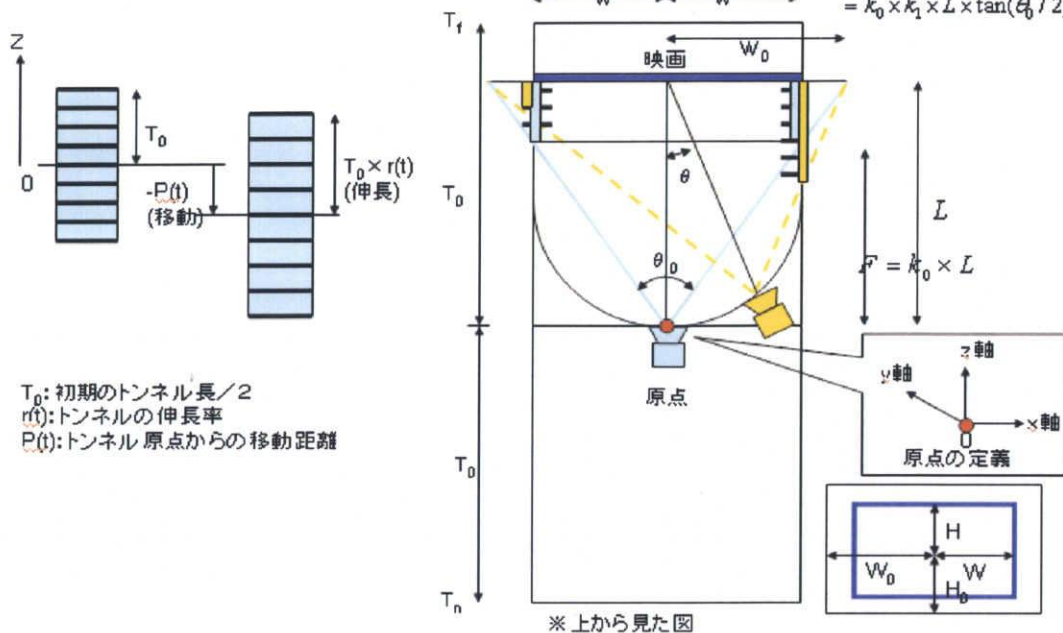
- 1) 国土交通省 HP (<http://www.milt.go.jp/>)
- 2) 森本明宏, 浅野仁志, 井奥大輔, 朴丹, 榊井文人, 河合敦夫, 井須尚紀: TV 視聴が乗り物酔いに及ぼす影響, 2005 ソサイエティ大会公演論文集, 基礎・境界 A-17-2
- 3) Reason JT and Brand JJ: Motion Sickness, Academic Press, London 1975
- 4) 加藤和人, 北崎智之: 後席用ディスプレイ注視時の車酔い発生メカニズムの一考察, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No50-05
- 5) 森本明宏ほか: TV 視聴時の車酔い低減対策, FIT2006 第 5 回情報科学技術フォーラム
- 6) 朴丹, 井奥大輔, 浅野仁志, 森本明宏, 榊井文人, 河合敦夫, 井須尚紀: 呼気二酸化炭素分圧による動揺病強度の評価, 2005 ソサイエティ大会公演論文集, 基礎・境界 A-4-25
- 7) 東司: 船酔いのメカニズムとその対策, 関西造船協会 らん 第 20 号, No1-6
- 8) 松永亨・武田憲昭(1998): 動揺病と宇宙酔い, 耳鼻臨床, 81(8), 1095-1120
- 9) 原島博: 3 次元画像と人間の科学, オーム社, pp139-180, 2000
- 10) 奥村友裕: 車酔い抑制効果を有する車載ディスプレイの開発, 平成 17 年度修士論文

# 付録

回転を、カメラの回転で実現している

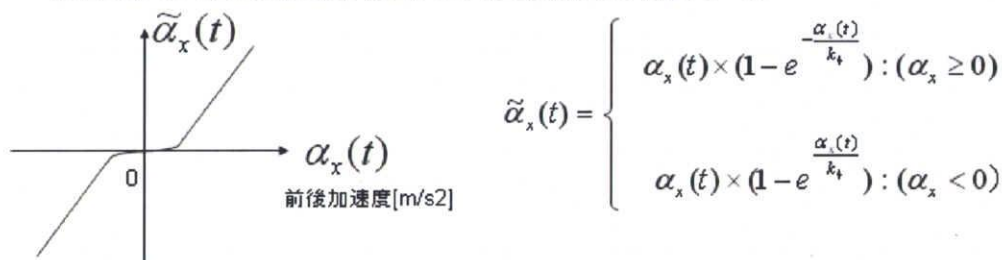
$$\begin{aligned}
 H_0 &= L \times \tan(\theta_0 / 2) & H &= H_0 \times k_0 \\
 W_0 &= W / k_0 & &= L \times \tan(\theta_0 / 2) \times k_0 \\
 &= H_0 \times k_1 & W &= k_1 \times H \\
 \text{---} W \quad \leftarrow \quad W \text{---} & & &= k_0 \times k_1 \times L \times \tan(\theta_0 / 2)
 \end{aligned}$$

背景であるトンネルは伸長しながら移動する



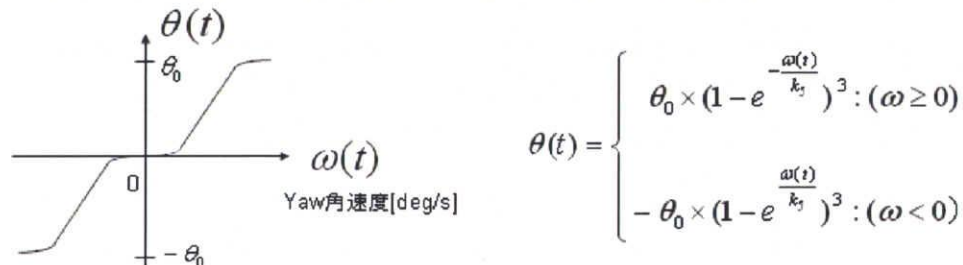
前後加速度がある一定値以下では、トンネルが前後に動かないようにする。  
(注意: 傾いていると重力加速度が発生するので、本来は速度で判定すべき)

(注意: 傾いていると重力加速度が発生するので、本来は速度で判定すべき)



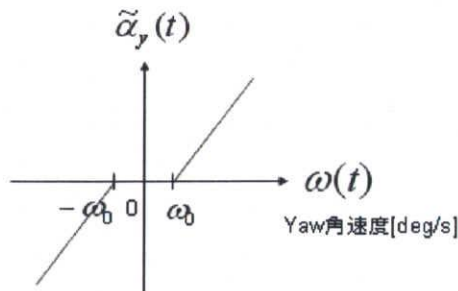
Yaw角速度がある一定値以下では、主映像が回転しないようにする。  
またYaw角速度がある一定値以上では、主映像が回転しすぎないようにする

またYaw角速度がある一定値以上では、主映像が回転しすぎないようにする



#### 4) トンネル上下部の左右移動の不感帯

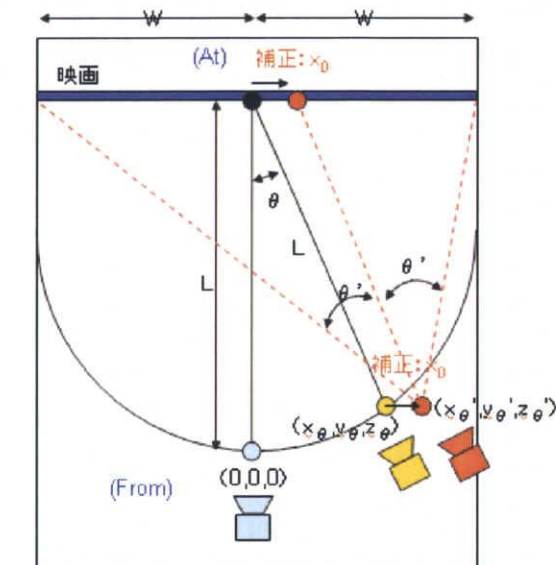
Yaw角速度がある一定値以下では、トンネル上下部が左右に移動しないようにする。  
Yaw角速度がある一定値以下では、遠心加速度を0とする。  
(遠心加速度は傾いていると発生するので、Yaw角速度で判定する)



$$\tilde{\alpha}_y(t) = \begin{cases} \alpha_y(t) \times \exp\left(\frac{\alpha_y(t)}{k_6}\right) : (\omega \geq \omega_0) \\ \alpha_y(t) \times \exp\left(-\frac{\alpha_y(t)}{k_6}\right) : (\omega \leq -\omega_0) \\ 0 : (\omega < |\omega_0|) \end{cases}$$

#### 5) カメラのFromとAtの計算

回転時に、カメラの原点を回転し、更に補正を行う。



・初期位置:

$$\begin{aligned} \text{From}(0,0,0) \\ \text{At}(0,0,L) \end{aligned}$$

・カメラが  $\theta$  回転した位置(映画が  $\theta$  回転):

$$\begin{aligned} \text{From}(x_\theta, y_\theta, z_\theta) \\ \text{At}(0,0,L) \end{aligned}$$

$$x_\theta = L \times \sin \theta$$

$$y_\theta = 0$$

$$z_\theta = L \times (1 - \cos \theta)$$

・カメラが  $\theta$  回転し(映画が  $\theta$  回転)、更に映画の左側と右側が同じ幅だけ見えるように補正( $x_0$ ):

$$\text{From}(x_\theta', y_\theta', z_\theta')$$

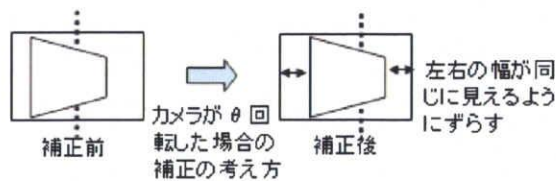
$$\text{At}(x_0, 0, L)$$

$$x_\theta' = L \times \sin \theta + x_0$$

$$y_\theta' = 0$$

$$z_\theta' = L \times (1 - \cos \theta)$$

$$x_0 = \frac{-L + \sqrt{L^2 + 4 \times W^2 \times \sin^2 \theta}}{2 \times \sin \theta}$$



付録 1-2

## 6) 映画(スクリーン)の大きさ

映画(スクリーン)の高さ(H)・幅(W)はトンネルの高さ・幅と同じ大きさである。

- ・映画の高さ  $H = L \times \tan(\theta_0 / 2) \times k_0$
- ・映画の幅  $W = k_1 \times H$   
 $= k_0 \times k_1 \times L \times \tan(\theta_0 / 2)$

## 7) トンネルの形状

トンネルの高さ・幅は映画の高さ・幅と同じ大きさと同じである(6)と同一)。

- ・トンネルの幅 = 映画の幅  $W$
- ・トンネルの高さ = 映画の高さ  $H$
- ・トンネルの手前側(z座標)  $T_n$   $T_n = -T_0$
- ・トンネルの奥側(z座標)  $T_f$   $T_f = T_0$
- ・初期のトンネルの長さ  $2 T_0$

## 8) 主映像、トンネルの回転

Yaw角速度に比例させて主映像、トンネルを回転させる。

- ・プログラム: Yaw角速度に応じてカメラを回転(Fromを変更)することにより、主映像を回転。  
これにより、トンネルも回転させていることになる。  
また回転時、映画の左右の幅が同じに見えるようにカメラの位置と視点の補正を行う  
(「5)カメラのFromとAtの計算」の $x_0$ 参照)

## 9) トンネルの上下部分の左右の移動

遠心力(遠心方向の加速度)に比例させてトンネル上下部分の位置を左右に移動させる

- ・プログラム: 遠心方向の速度(積分) + 遠心方向の加速度に比例させて、トンネルの位置を左右に移動  
1回あたりの移動量は、遠心方向の加速度に比例。  
初期からの移動を算出するために、遠心方向の加速度を積分し、遠心方向の速度を算出。

左右の移動量  $rl$

$$rl = k_7 \times \left( \int \tilde{\alpha}_y(t) dt + \tilde{\alpha}_y(t) \right) + x_9$$

※  $\tilde{\alpha}_y(t)$ は4)、 $x_9$ は5)参照

※  $x_9$ は、手前側を固定して移動させる場合の補正項。

スクリーン側を固定して移動させる場合には、 $x_0$ を使用すること

## 10) トンネルの伸長

トンネルの前後方向の伸長度合いを、前後方向の加速度に比例させる。  
トンネルの移動の効果を上げるための処理である。

- ・プログラム: トンネルの前後方向の伸長度合いは前後方向の加速度に比例する  
ただし一定値以下の加速度ではトンネル伸長しないために、不感帯を設ける  
(「2)トンネル前後移動の不感帯」参照)

伸長度合い  $r(t)$

$$r(t) = \exp\left(\frac{\tilde{\alpha}_x(t)}{k_2}\right)$$

### 11)トンネルの前後の移動

トンネルの前後方向の原点位置を加速度に比例して移動させる(前回の位置からずれる)

・プログラム:トンネルの原点位置は加速度に比例し、さらに前回の位置からずれる。  
「10)トンネルの伸長」と併用している。

原点位置からのトンネルのずれ量を $p(t)$ とする。 $r(t)$ はトンネルの伸長度合い、 $rc(t)$ は、前回と今回の伸長度合いの比を示す。

$$rc(t) = \exp\left(\frac{\tilde{\alpha}_x(t) - \tilde{\alpha}_x(t-1)}{k_2}\right)$$

$$\tilde{\alpha}_x(t) \geq 0 \quad \& \quad \tilde{\alpha}_x(t) \geq \tilde{\alpha}_x(t-1) \quad \text{または} \quad \tilde{\alpha}_x(t) < 0 \quad \& \quad \tilde{\alpha}_x(t) \leq \tilde{\alpha}_x(t-1)$$

$$p(t) = rc(t) \times p(t-1) + L \times (1 - rc(t)) - k_0 \times \tilde{\alpha}_x(t) \times r(t)$$

上記以外

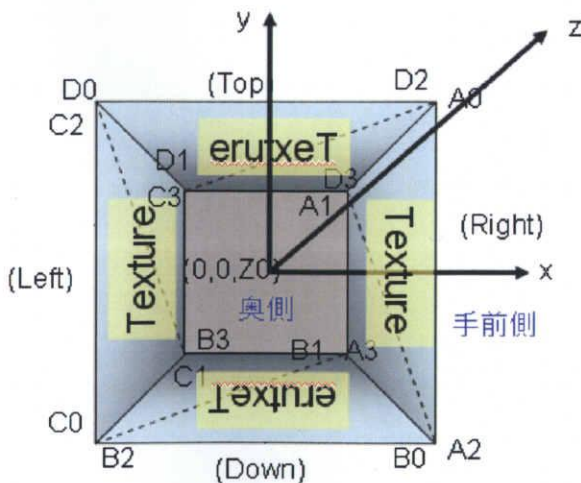
$$p(t) = rc(t) \times p(t-1) + F \times (1 - rc(t)) - k_0 \times \tilde{\alpha}_x(t) \times r(t)$$

なお、 $t-1$ は1フレーム(1/30秒)前を意味する。

※前後加速度が0の場合に、主映像が回転すると、カメラが $Z\theta'$ ( $Z\theta$ )だけずれるため、補正のためにトンネル全体を $Z\theta'$ だけずらす

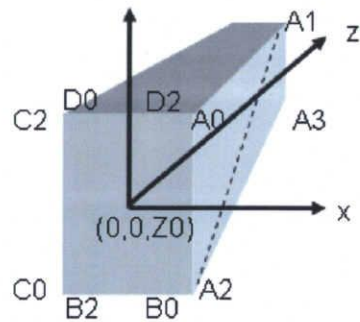
### 12)トンネルポリゴンに張られるテクスチャの考え方

背景のトンネルポリゴンの構成を示す。

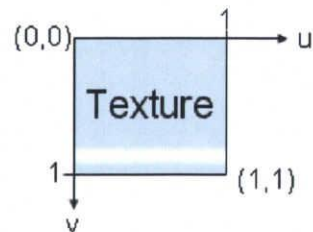


トンネルポリゴンに張られるテクスチャ

詳細は「13)テクスチャの(U,V)座標の定義」参照



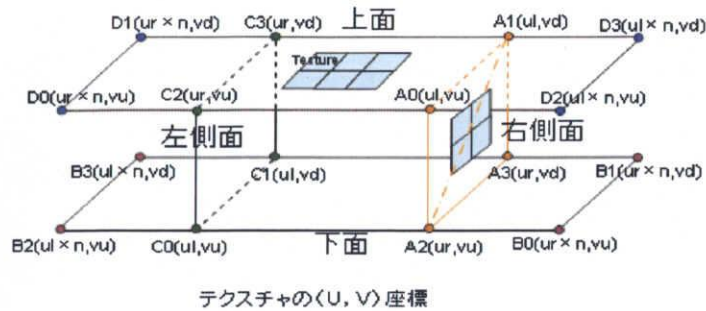
トンネルポリゴンの考え方



テクスチャの座標系(u,v)



### 1.3) テクスチャの(U,V)座標の定義



※ 同一色でポリゴンを構成している

ポリゴン内は、テクスチャが(u,v)座標分、繰り返し張られる。

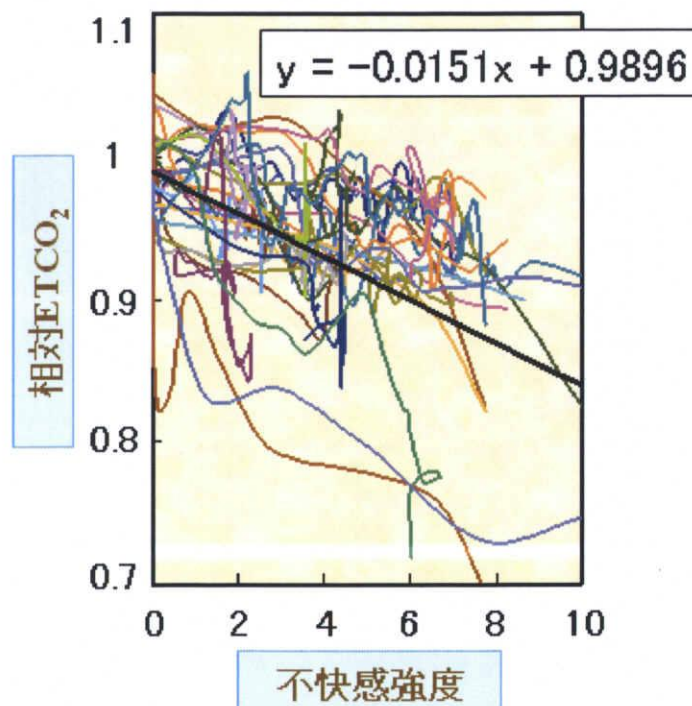
トンネルの上半分(D0,D1,D2,D3)と、下半分(B0,B1,B2,B3)は、遠心力で左右に移動するため、n回分更テクスチャが繰り返している

ポリゴンの描画は、ストリップ構造、すなわち辺を共有する三角形ポリゴンで描画される。

例) ポリゴンA0,A1,A2,A3は、三角形ポリゴンA0,A1,A2と、三角形ポリゴンA1,A2,A3の2つのポリゴンから成る

付録 1-5

(朴丹ら 信学会 2005ノサイエティ大会)

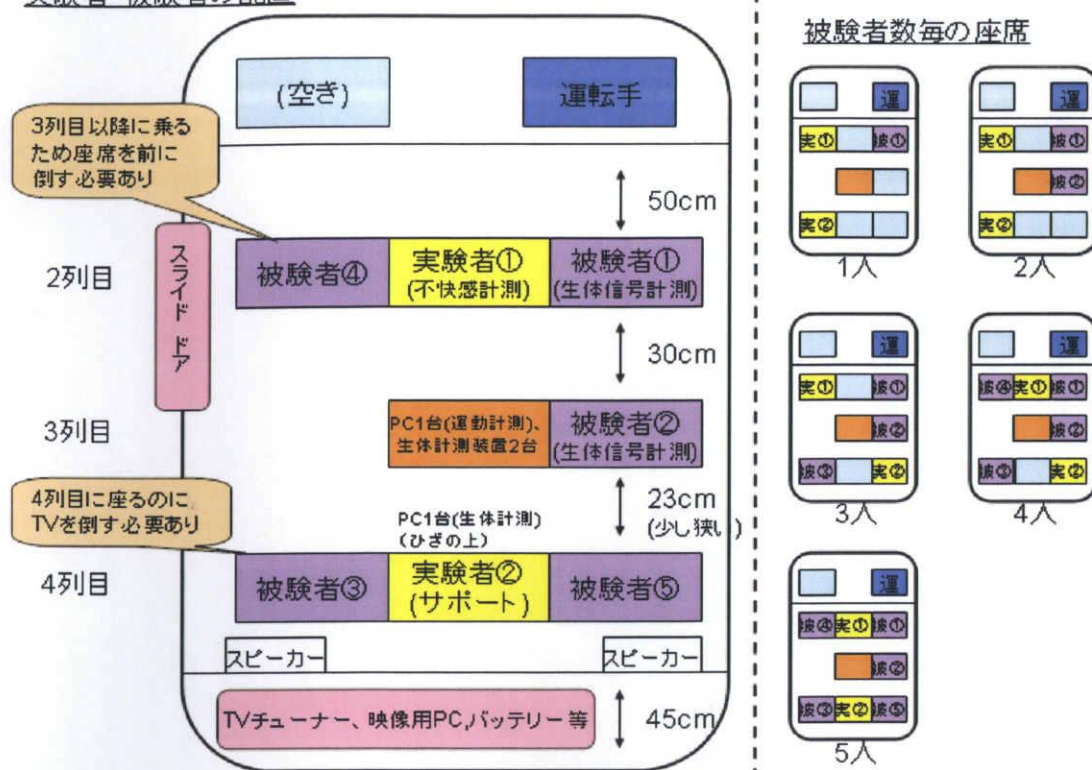


付録 2

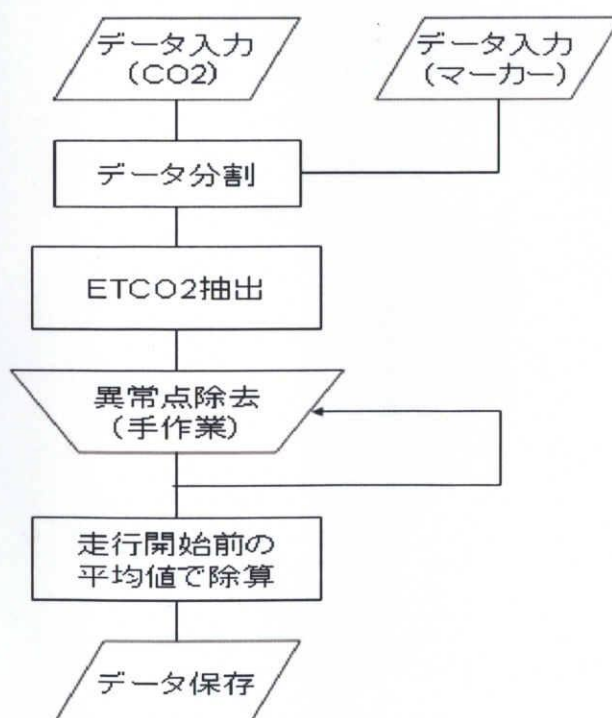


# 実験者・被験者の配置

2005.11.16



付録 3



付録 4