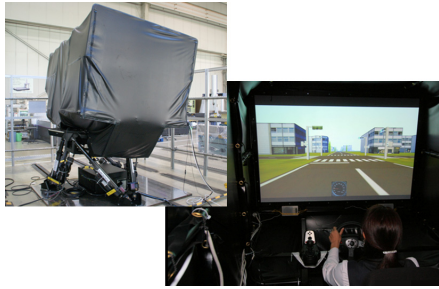


シミュレータ酔い低減を目指したドライビングシミュレータの開発

Development of the Driving Simulator Reducing Simulator Sickness



高桑 義直
Yoshinao Takakuwa

栗屋 伊智郎
Ichiro Awaya

後藤 真弘
Masahiro Goto

久保 壮
Tsuyoshi Kubo

岡田 卓三
Takumi Okada

岡田 幸一郎
Koichiro Okada

シミュレータ酔いは実車両とシミュレータの運転感覚に差異があることから生じるといわれている。この差異は大きく視覚的問題(実際の視界と映像の違い)と運動的問題(実際の車両加速度とシミュレータ加速度の違い)に分けられ、人間の器官で違和感として感じられる。視覚的問題は、画像処理技術の進歩により、CG映像の高精細・高速化や全視界型ドームスクリーンの採用により解消されつつある。運動的問題は、シミュレータを大型化して可動範囲を拡大することで違和感を小さくする試みがなされている。本論文では、運動制御によって、シミュレータ酔い低減を目指した小型6軸ドライビングシミュレータの開発に関して報告する。

1. はじめに

近年、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。

上記の技術開発ではリラックスした状態で長時間シミュレータに乗り続けることが求められるが、実際にはシミュレータ酔いが発生し、実験に支障を来すことが多く報告されている。シミュレータ酔いの要因のうち、視覚的問題は近年解消されつつある。運動的問題の解決には、大型(縦35m×横20m規模)のスライド機構にて並進可動範囲を拡大して実車加速度を模擬することでシミュレータ酔いを低減するシミュレータが開発されている⁽¹⁾。

一方、スライド機構のない小型(縦4m×横3m 規模) 6軸ヘキサポッド型(以下、単に6軸と省略する)シミュレータでは、並進可動範囲が制限されるため、大型のスライド機構のものに比べて並進加速度模擬能力は劣るものの、安価でコンパクトに製作できるメリットがあり、今後も研究や訓練用途としての応用が期待されている。以下、小型6軸シミュレータを対象としてシミュレータ酔いを低減する方法を示すとともに評価実験を実施した結果について述べる。

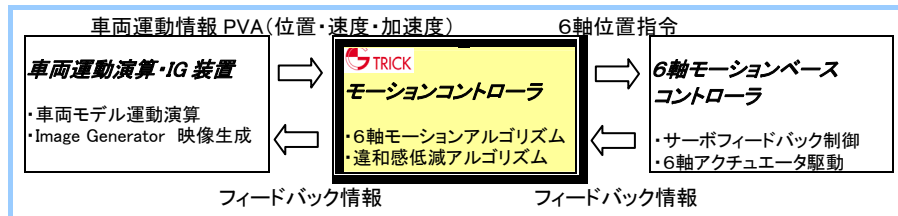
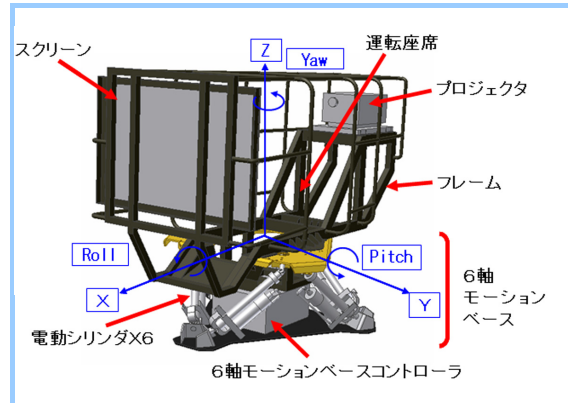
2. 試験用シミュレータの構成と仕様

ドライビングシミュレータは、自動車と同様に運転者の操作により動作し、限られた空間内で、実車の運転・走行感を模擬する装置である。ここで、ドライビングシミュレータの6軸(X,Y,Z,Roll,Pitch,Yaw)を図1に定義する。また、今回製作した6軸シミュレータの外観と内部をタイトル写真に示す。運転者はステアリング、アクセル、ブレーキを操作することで、プロジェクタからスクリーンに投影された視野映像を得る。本装置の制御機器構成を図2に示す。車両運動演算・IG(Image Generator)装置からの車両運動情報は、当社独自のG TRICK^注 モーションコントローラにより6軸位置指令に変換され、6軸モーションベース(リニア・アクチュエータを6台パラレルに配置し、前後(X)、左右(Y)、上下(Z)、X軸回転(Roll)、Y軸回転(Pitch)、Z軸回転(Yaw)の6軸動作を同時に行わせることのできる機構)の電動シリンダを駆動し、運転座席を有するフレームを動作させる。6軸モーションベース仕様を表1に示す。

注: 重力加速度(G)を利用した乗物運転技能訓練用シミュレータの三菱重工業(株)登録商標 

表1 6軸モーションベース仕様

軸	ストローク	速度	加速度
X	±0.25m	±0.5m/s	±0.6G
Y	±0.25m	±0.5m/s	±0.6G
Z	±0.18m	±0.3m/s	±0.5G
Roll	±21deg	±30deg/s	±500deg/s ²
Pitch	±22deg	±30deg/s	±500deg/s ²
Yaw	±22deg	±40deg/s	±400deg/s ²

図1 ドライビング
シミュレータ
の6軸の定義図2
制御機器構成

3. シミュレータ酔いの発生と対策

3.1 シミュレータ運転時の違和感

運転者がシミュレータに搭乗し、運転を行うと実際に車両が動いたように視界映像が表示される。このとき、ドライバは視界映像と自身の運転操作から運動体感を経験的に予測する。しかし、シミュレータは車両と同じ運動を再現できないため、予測に一致した体感を与えることはできない。このため、視界映像から認識する予測体感加速度とシミュレータの加速度のずれが違和感を生じさせ、これがシミュレータ酔いの症状を引き起こすと一般に考えられている。(図3)

この違和感を予測し、ある閾値以内に抑える方法について検討を行った。

3.2 違和感低減の方針

違和感を定量的に把握するためには、視界と運転から予測される経験的運動とシミュレータ運動の差を取ることが考えられる。視界から予想される運動は実車両の運動であるため、ドライバ操作を車両の運動モデルに入力し、車両運動演算から出力された加速度を用いる。

一方、シミュレータの運動には、シミュレータ運動目標値と実際のシミュレータ応答が一致すると仮定し、シミュレータ加速度を用いる。この2つの加速度の誤差は、人間が感じる違和感と直接関連付けることは難しい。なぜなら、人間には感知できない小さな加速度や感知できない低周波・高周波の加速度が存在するためである。そこで、人間の三半規管(角加速度)と耳石(直線加速度)を数式モデル化し、車両運動演算から出力された加速度とシミュレータ加速度をそれぞれ本器官モデルで補正して差を取ることで違和感を表現する方法を考案した。

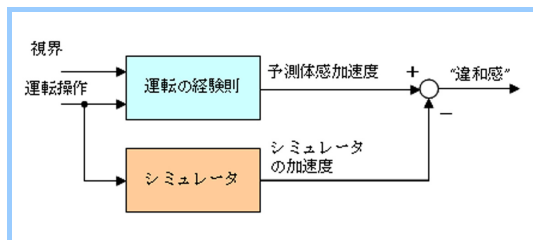


図3 シミュレータにおける違和感の発生

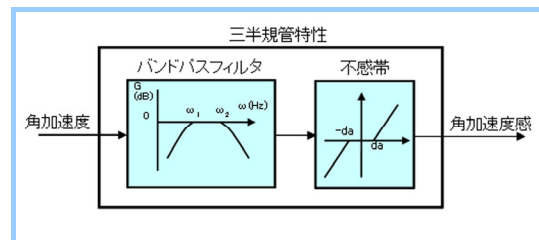


図4 三半規管と耳石に共通の器官モデル

4. 違和感低減アルゴリズム

4.1 三半規管と耳石のモデル

人間が加速度を感じる主要な器官である三半規管と耳石は共通した特性として、(1)感知可能な加速度の大きさの閾値が存在すること、(2)感知可能な周波数帯が存在すること、が挙げられており、文献⁽²⁾を参考にモデル化を行った。この結果、三半規管と耳石に共通の器官モデルを図4に示すようにバンドパスフィルタと不感帯で表した。

4.2 シミュレータ酔い低減のための制御則

器官モデルの出力を利用して車両運動とシミュレータの加速度感の差を取り、これをシミュレータ違和感と定義する。

シミュレータ違和感には以下に示す2種の違和感が存在する。

- (1) 加速度の不足による違和感(もの足りなさ)
- (2) 本来の車両には存在しない加速度による違和感

後者の違和感は、X、Y方向の加速度模擬を傾斜による重力を利用したときに生じる。加速度が非常にゆっくりと変化しシミュレータ違和感の閾値以内であれば有効に作用するが、閾値を越えた場合には回転が違和感となり、シミュレータ酔いの原因になる。特に小型6軸シミュレータでは重力を利用する機会が多いため、その頻度は高くなる。

そこで、X、Y方向の回転角速度であるピッチ軸とロール軸の違和感を推定し、この大きさが閾値以上になったときに、違和感が増大しないように角加速度を現在値に制限する。この方法により、違和感が閾値以内に抑えられシミュレータ酔いを低減する効果が期待できる。図5に本制御則のコンセプトを示す。図6に違和感低減アルゴリズムを加えた6軸モーション制御ブロック図を示す。このブロック図の各機能を以下に説明する。

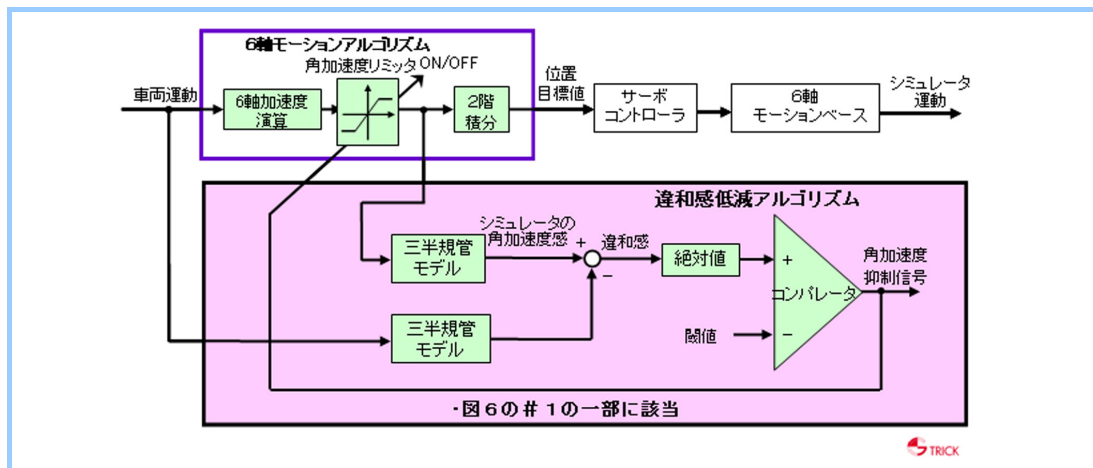


図5 シミュレータ酔い低減のための制御則(角加速度抑制部)

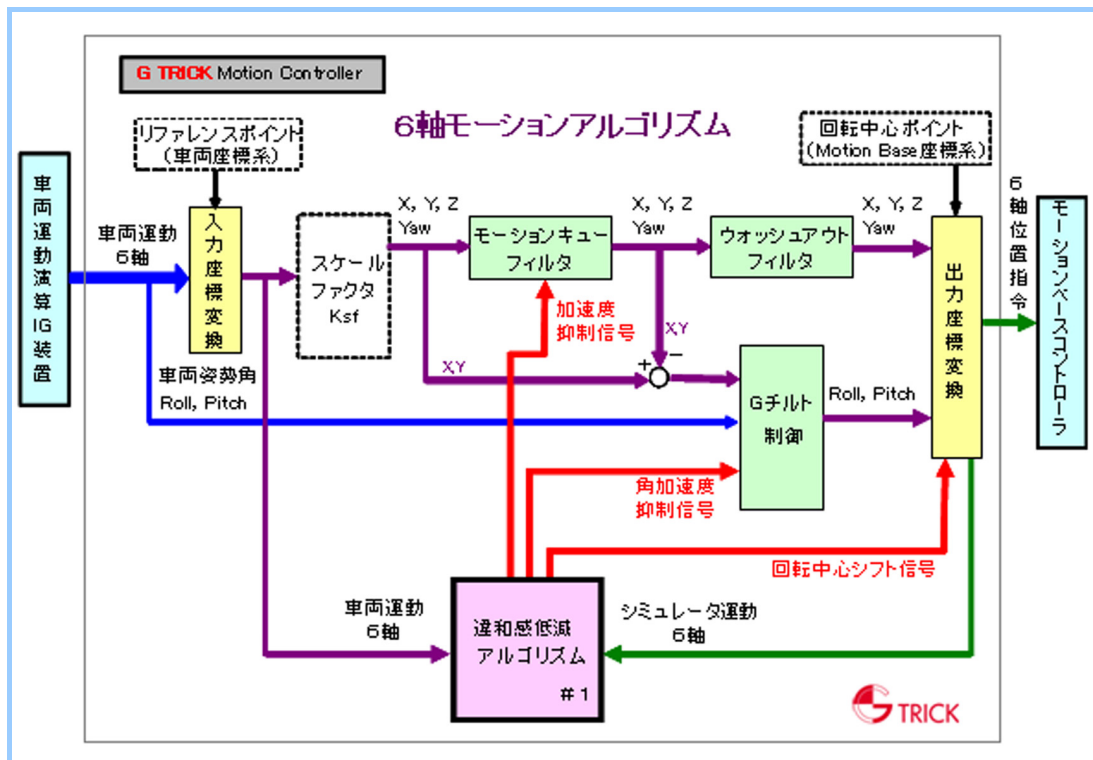


図6 違和感低減アルゴリズムを加えた6軸モーション制御ブロック図

- (1) 入力/出力座標変換機能; 車両座標系の“リファレンスポイント”を設定し, 任意の回転中心ポイントにおける加速度を出力側の座標に変換する.
- (2) モーションキューフィルタ機能; X, Y, Z, Yaw の急峻な初動加速度のみを再現するために用いるフィルタであり, 動的な周波数成分を通すことで初動部分のみの加速度を取り出す.
- (3) ウォッシュアウトフィルタ機能; モーションベースを原点に低速で復帰する.
- (4) G チルト制御機能; モーションキューフィルタで削減した低周波の持続する加速度信号を重力傾斜分で補償するため, 持続加速度を傾斜角に変換し模擬する.
- (5) 違和感低減アルゴリズム; 車両加速度とシミュレータ加速度を入力し, 器官モデルを通して違和感を推定演算する. 出力は加速度抑制信号であり, 違和感が閾値を超えたとき, モーション制御の各ブロックの加速度出力を現在値に制限する. これにより違和感の増大を防ぐ. また, 違和感が閾値以下になると制限を解除する.

5. 評価実験

5.1 違和感評価実験

違和感低減アルゴリズム無しの条件で, 20 歳~50 歳の健康な成人男女 30 名(男性 26 名, 女性 4 名)の被験者に 2km×2km の仮想空間内の市街地コースを 10~20 分間運転してもらい, 運転中に感じる違和感に関してアンケート調査を実施した. 本実験の結果, 被験者が運転に違和感を生じた要因は, 実車走行時より大きな回転角加速度の発生, 及び実車に存在しない回転感覚であった. また, アンケート結果に有意な年齢差, 男女差は見られなかった.

5.2 違和感低減アルゴリズム評価実験

違和感低減アルゴリズム有りの条件で, 20 歳~50 歳の健康な成人男女 23 名(男性 18 名, 女性 5 名)の被験者に同様の仮想空間を 10 分程度で以下の条件にて運転してもらった.

- (1) 右左折各 7 回, 一時停止 10 回, 左右各 4 ターンのスラローム走行 1 回
- (2) 直線道路 80km/h, 交差点 20~30km/h, スラローム 40~50km/h, 一旦停止厳守

違和感評価実験のパラメータは, 表 2 の 3 種類を設定した. 被験者 1 名 1 回の試験で, 10 分の休憩をはさんで, 設定 1 と 2 の二種類の設定(順番はランダム)にて同じ運転試験を行い, 違和感低減アルゴリズムの効果を確認した. さらに設定 3 は, 日を改めて先の実験において酔いや酔い人に対してのみ実施した. 乗車後の酔いの程度の評価には, 2 種類の評価点(酔いが深いほど点数大)で点数化を行った. “動揺病評価点”は, 動揺病診断基準⁽³⁾ (88 点満点; 1~2 点: 軽度の不快, 3~7 点: 中程度の不快, 8 点以上: 重度の動揺病)に基づくものである. またこれとは別に, 5 項目の“被験者所感評価点”(15 点満点; あくびが出る/嫌気生じる/疲労感溜まる/体のほてり/眼精疲労についてインタビューにより各々 重度: 3 点, 中程度: 2 点, 軽度: 1 点, 無し 0 点で点数化)による評価を実施した.

表 2 違和感低減アルゴリズム評価実験 パラメータ設定

設定	内容	説明
1	6軸モーションアルゴリズム	6軸モーションアルゴリズムのみ
2	6軸モーションアルゴリズム+違和感低減アルゴリズム	器官モデルを通して違和感を推定演算し, 閾値を超えた場合に加速度を現在値に制限し, 閾値以下になると制限を解除する.
3	6軸モーションアルゴリズム (G チルト制御機能 OFF)	G チルト制御機能を OFF し, モーションキューフィルタ機能のみで, 並進加速度を模擬.

6. 実験結果

表 3 に違和感低減アルゴリズムの評価実験の結果を纏めた. ただし, シミュレータ酔いは, 蓄積による影響が大きく 10 分の休憩では十分に解消されないことが実験により判明したため, 2 回目の試験データは結果として用いないこととした. このため, 設定 1 と設定 2 で 2 回乗車した中の 1 回目の設定の評価結果のみを採用した. これより①酔いや酔い被験者, ②全く酔いを感じない被験者, ③過度にシミュレータに酔う被験者の 3 区分に分類した.

表3 違和感低減アルゴリズム評価実験結果

区分	基準 (区分理由)	人数
① 酔いやすい被験者	動揺病評価点 $\neq 0$	10 名
② 全く酔いを感じない被験者	動揺病評価点 $= 0$	12 名
③ 過度に酔う被験者	動揺病評価点が 20 点以上を記録. 被験者所感評価点 15 点満点.	1 名

表4 酔いを起こす被験者に対する評価実験結果

設定	動揺病評価点 (88 点満点)	被験者所感評価点 (15 点満点)
1	6.83	2.83
2	<u>3.33</u>	<u>1.33</u>
3	2.86	1.43

さらに、酔いの要因と回転角速度の関係を調査する追加実験として日を改めて、表3の被験者に対して設定3の条件で試験を行った。結果として、区分②と区分③の被験者は、設定による差が顕著に現れなかった。一方で、区分①の被験者(10 名)は設定による差が顕著に現れた。ここで区分①の被験者データを用いて、設定1, 2, 3で乗車した場合の“動揺病評価点”と“被験者所感評価点”の平均点を表4にまとめた。

この結果から、設定3が最も動揺病評価点が低い設定であることが分かる。これは、回転角加速度がシミュレータ酔いの一因に寄与していることを示しているが、同時に実施したアンケートの所感記事から“加速感の物足りなさ”をほとんどの被験者が感じており、持続加速感を模擬できず、シミュレータとして問題があることが分かった。

これに対して違和感低減アルゴリズムを組み込んだ設定2では、設定1よりも評価点平均がどちらも半減しており、適度な加速感を有しながらシミュレータ酔いを低減できていることが確認でき、違和感低減アルゴリズムが有効に機能していると判断できる。

7. おわりに

小型6軸ドライビングシミュレータを用いて、シミュレータ酔いの原因となる違和感を推定し、人間の感覚器を数式モデル化した当社独自の違和感低減アルゴリズムを構築した。被験者実験により、シミュレータ酔いを起こしやすい被験者に対して、同アルゴリズムがシミュレータ違和感の低減に有効に作用し、かつ適度な加速感を有し効果的であることを確認できた。今後、更にアルゴリズムの改良を行い、長時間運転が可能なドライビングシミュレータを実用化していきたい。

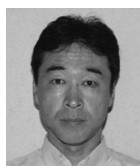
参考文献

- (1) 米川, 阿賀, 門脇ほか: 市街地走行で現実感のあるドライビングシミュレータの開発, 自動車技術会, 2008 年春季大会学術講演会前刷集 No.36-08,p.1~6, 2008
- (2) Peters,R.A., "Dynamic of the Vestibular System and their Relation to Motion Perception, Spatial Disorientation, Illusion", NASA-cr-1309, Washington D.C., National Aeronautics and Space Administration(1969)
- (3) Graybiel, A., Wood, C. D., Miller, E. F., Cramer, D. B.: Diagnostic Criteria for Grading the Severity of Acute Motion Sickness., Aerospace Med., May, p.453-455, 1968

執筆者紹介



高桑義直
神戸造船所
先端製品・機械システム部 制御システム設計課 主席



栗屋伊智郎
技術本部 名古屋研究所 パワーエレクトロニクス・制御研究室 主席 工博



後藤真弘
技術本部 名古屋研究所 パワーエレクトロニクス・制御研究室



久保壮
神戸造船所
先端製品・機械システム部 メカトロシステム設計課



岡田卓三
神戸造船所
先端製品・機械システム部 制御システム設計課



岡田幸一郎
神戸造船所
先端製品・機械システム部 制御システム設計課