

身体一視野振動の時間差が乗り心地に与える効果

Effects of Time Difference between Body and Vision Vibrations on Riding Comfort

小澤 惇一[†] 竹内 利紗[†] 志水 あづみ[†] 河合俊岳[†] 奥田 翔[†]
 Jun-ichi Ozawa Risa Takeuchi Azumi Shimizu Toshitake Kawai Sho Okuda

増田 修[†] 河合 敦夫[†] 井須 尚紀[†]
 Osamu Masuda Atsuo Kawai Naoki Izu

1. はじめに

定常的振動に加えて、非定常な振動が乗物に加わった時の乗り心地に視覚が与える影響を検討した。自動車では、平坦な道路を直進走行中にもピッチとロール回転の複合した非周期的な小振幅振動が生じる。さらに、路面に小さな凹凸があると車体は過度的に小さく傾き、減衰振動を起こすことになって非定常的振動が発生する。本研究では、車台一座席間の振動伝達に起因する視界一身体運動間の時間差が乗り心地や揺れの強さ感覚に与える影響を調べた。

ロールとピッチが複合した過度的な減衰振動を非周期的に発生させ、これを定常的振動に加えて振動刺激として用いた。視覚刺激には直進走行時の車外視界・車内視界を用い、車内視界の動きと身体振動との時間差を変化させた。時間差の異なる刺激間で、乗り心地と揺れの強さ感覚を被験者に対比較させることによって、これらの心理学的測定を行った。なお、乗り心地については、走りを楽しむような活動的・積極的な心地良さを「壮快感」、ゆったりと寛ぐような静的で落ち着いた心地良さを「快適さ」と表現して2つの尺度で測定した。

2. 実験方法

2.1 被験者

本研究における実験は、三重大学大学院工学研究科実験倫理委員会の承認の下に実施した。これまでにめまいや難聴など耳鼻咽喉科疾患の既往のない20歳前後の健康男女17名(男性9名、女性8名)を被験者に用いた。実験実施に先立って、実験の目的、方法、予期される影響、人権の保護に関することなどについて被験者に十分な説明を行った後、被験者から文書による同意を取得した。なお、動揺病の主症状(Graybiel et al. [1])の診断基準におけるMIII以上の状態が見られた場合や被験者が中断を求めた場合には直ちに実験を中断することとしていたが、動揺病不快感が発生することはなかった。被験者の先入観による心理的な影響を避けるため、実験で与える刺激の情報等は被験者に知らせず、また評価の独立性を保つために被験者間で実験に関する情報交換を行わせないようにした。

2.2 実験システム

3D映像システムには反射型偏光方式を採用し、広視野映像を実現するために円筒型スクリーンに6映像(左右眼用各3映像)を投影することによって1つの動画像を構成した。描画演算用コンピュータ6台(Dell Precision T5400)、プロジェクタ6台(SANYO PDG-DXT10GL)と偏光フィルタ、および偏光用円筒大型スクリーン(高さ2.60m、半径10mの円筒の60deg円弧の曲面)によって3D映像を描画した。被験者の頭部がスクリーンの手前4.0mに位置するようにモーションベース(川田工業(株)JoyChair-R1)を設置し、1台のコンピュータ(Dell Optiplex 745)で描画演算用コンピュータと同期させて制御した。本装置は、搭乗人員1名でロールとピッチの2軸の可動軸を持ち、最大角速度40deg/s、最大回転角15degの回転・振動を負荷することができる。なお、本装置に搭乗した被験者から見たスクリーンの視角は水平120.4deg×垂直48.8degとなった。

また被験者の臨場感や走行感を高めると同時にモーションベースの駆動音を遮断するために、スピーカー7台(BOSE 55WER)から車の走行音と走行感のある音楽「オブラディ・オブラダ」を混合して被験者に聞かせた。被験者に3D映像以外に与える視覚刺激を少しでも減らすために、実験室の床、天井、窓を黒い布等で覆い、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内で実験を実施した。

2.3 刺激

路面の凹凸の上を走行した時に起こる過度的減衰振動に、平らな路面を走行している時の車体の微かな定常振動を加えて、走行中の振動を模擬した。

車体の過渡的減衰振動を模擬するために、ロールとピッチの複合振動の駆動信号として、2つの独立なパルス列(パルス幅10ms、系列長63のM系列)を同時に共振フィルタに入力することで過渡的減衰振動波形を得た。パルス列は、刺激時間45秒(初端2秒と終端3秒を除く)の間に8回、平均5秒に1回の割合で発生させ、かつ発生の間隔は2秒以上開くようにした。ロール振動とピッチ振動の共振周波数は、それぞれ2.0Hz、1.2Hzとし、バンド幅は両者とも0.4Hzに設定した。パルス列の振幅は、平均が0となり、パルス列が持続的に与えられた場合に角速度の実効値が7.1deg/s(rms)となる大きさに設定した。

[†] 三重大学工学部情報工学科 Faculty of Eng., Mie Univ.
[‡] (株)本田技術研究所 Honda R&D Co., Ltd.

なお、ロールおよびピッチ回転の過渡的減衰振動は、振幅の最大値は約1 degとなり、約2秒間で減衰して消失した。

一方、車体の定常振動を模擬するために、ロールとピッチの複合振動の駆動信号として、正規白色雑音を通過帯域0.5~5 Hzのバンドパスフィルタに入力することで非周期的振動波形を生成した。なお、回転軸方向が変動する複合回転を得るように、ロールおよびピッチ振動の駆動信号の生成に独立な正規白色雑音を用いた。ロール振動とピッチ振動のパワー比(角速度の2乗)が等しくなるように、両者の角速度を1.0 deg/s(rms)に設定した。両振動の回転角の実効値は0.10 deg(rms)となった。

上記で得られた過渡的減衰振動波形と定常な非周期的振動波形を足し合わせて、ロールおよびピッチ振動の駆動信号とした。なお、振動刺激の持続時間は45秒間とした。

生成された信号で2軸モーションベースを駆動して被験者に身体振動刺激を与えると同時に、視覚刺激における車内視界の動きを与えた。

(a) 身体振動刺激

上記のモーションベースに被験者を座らせて2点式シートベルトで腰部を拘束し、上述の定常振動と過渡的減衰振動を加えたロール・ピッチ振動を身体に与えた。なお、被験者の頭部はヘッドレストに接触させなかった。

(b) 視覚刺激

等速直進走行時の車外視界と車内視界(運転席における視野)を重ね合わせた映像を3Dグラフィクスによって与えた。車外視界には16.67 m/s(時速60 km)で前方に直進した時の車外風景を模擬した映像を、車内視界には定常振動と過渡的減衰振動が加わった自動車で運転席から見た自動車内部の視界を模擬した映像を用いた。なお、視覚刺激で与える車内視界の振動と身体振動刺激との間に-0.5s、-0.25s、0s、+0.25s、+0.5sの5種類の時間差を設けた。ここで、負の時間差は視覚刺激が身体振動刺激より先行していることを、正の時間差は視覚刺激が身体振動刺激より遅れていることを表す。

2.4 計測法

壮快感、快適さ、および揺れの強さ感覚について、連続する2つの刺激間での高低(強弱)をThurstoneの対比較

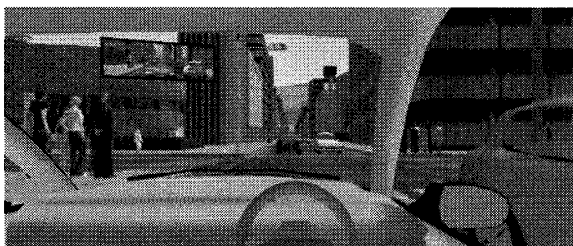


図1. 視覚刺激に用いた映像

法(2件法)によって答えさせた。ここで、壮快感とは「ドライブを楽しみ、うきうき・わくわくするような快さ」、快適さとは「ドライブをしていてリラックスできるような穏やかな心地良さ」、揺れの強さとは「車で走行している感じる自分自身の揺れの強さ」のことで定義した。5種類の刺激をそれぞれ他の4種類の刺激と組合せて比較させ、順序逆順を合わせた20対の比較結果により、各刺激で誘起される上記の各感覚を比較判断の法則(ケースV)に基づいて距離尺度化した。

2.5 実験手順

45秒間の非周期的振動を1刺激とし、15秒間程度の静止時間を置いて約60秒周期で振動刺激を繰り返した。11刺激を1セッションとし、1回の実験で4セッションを実施した。各セッション間には3~5分の休憩時間を取った。連続する2刺激間で壮快感、快適さ、および揺れの強さ感覚の対比較を行わせ、15秒間程度の静止時間内に口頭で答えさせた。1セッションで10比較、1回の実験で計40比較を行わせた。5種類の各刺激が他の4種類の刺激と対をなすように、順序逆順を合わせた20種類の対について各2回の対比較を実施した。実験総数は34回で1,360比較を実施し、各刺激対あたり136試行の比較を行った。

3. 結果

図2~4に、壮快感、快適さ、および揺れの強さ感覚の高さ・強さを、視覚-身体刺激の時間差0sを基準とする距離尺度で表す。いずれの感覚についても距離尺度化にあたって比較判断の法則(ケースV)を適用した。すなわち、各刺激で誘起される感覚の大きさ(高さ・強さ)は正規分布し、そのばらつき(標準偏差)は刺激に依らず等しいと

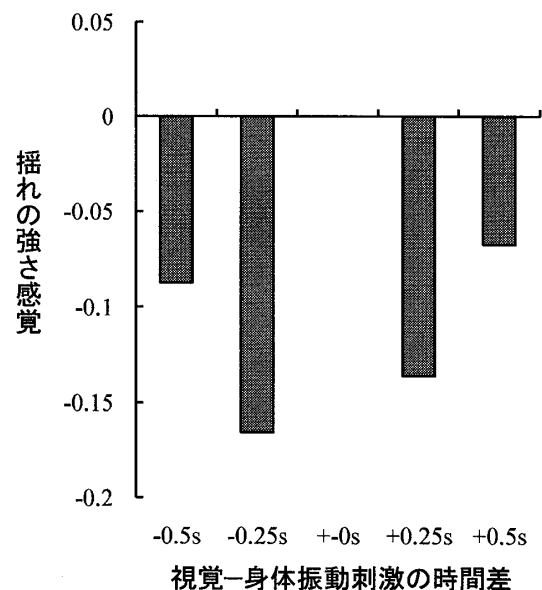


図2. 揺れの強さ感覚

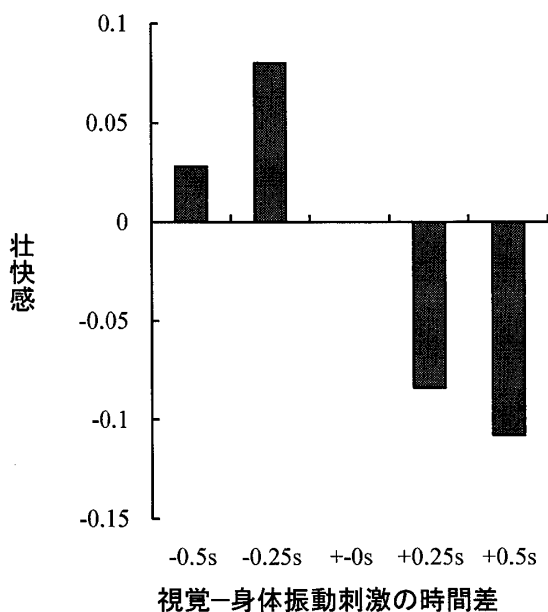


図3. 壮快感

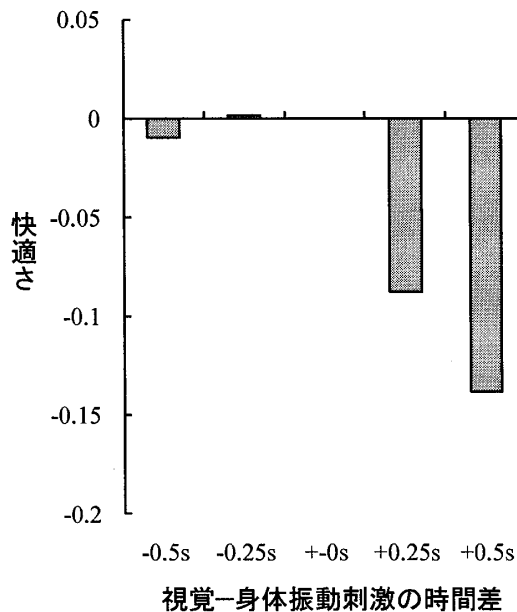


図4. 快適さ

仮定し、モデル化した。その時、比較した刺激間での感覚の差の標準偏差はいずれの刺激対でも等しくなり、各刺激で生じる感覚の標準偏差の $\sqrt{2}$ 倍となる。この感覚の差の標準偏差を単位(1)として、各感覚の距離尺度を定めた。なお、刺激間の感覚の差が危険率5%で統計的に有意となるのは、本実験での比較回数では0.12がその目安となる。

3.1 揺れの強さ感覚

揺れの強さの感覚を、視覚-身体振動刺激の時間差0sを基準とする距離尺度で図2に示す。視覚刺激が身体振動刺激と同期して与えられた時(時間差0s)に、揺れの強さは最も強く感じられた。視覚が前庭感覚・体性感覚と同期して振動を受容し、これらの感覚系が協調して振動を知覚するために強く感じたものと思われる。さて、視覚刺激が身体振動刺激より0.25s先行する時(時間差-0.25s)に最も弱く感じられ、0.25s遅れる時(時間差+0.25s)がこれに次いだ。これらは視覚-身体振動刺激が同期する場合と比較して、統計的に有意に弱い結果であった。視覚刺激が身体振動刺激より0.5s先行する時(時間差-0.5s)および遅れる時(時間差+0.5s)は、同期する場合よりも揺れの感覚は弱く、時間差0.25sで先行あるいは遅延する場合よりは強くなった。ここで、ロール振動の中心周波数は2Hz、ピッチ振動の中心周波数は1.2Hzであるから、0.25sの時間差はロール0.5周期(位相差180deg)・ピッチ0.3周期(位相差108deg)の先行あるいは遅延に相当し、0.5sの時間差はロール1周期(位相差0deg)・ピッチ0.6周期(位相差216deg)の先行あるいは遅延に相当する。視覚刺激と身体振動刺激が同位相に近い程、揺れを強く感じる結果となった。

3.2 壮快感

壮快感を、視覚-身体振動刺激の時間差0sを基準とする距離尺度で図3に示す。視覚刺激が身体振動刺激より先行する時に壮快感が高く感じられ、特に0.25s先行する時(時間差-0.25s)が最も高かった。逆に、視覚刺激が身体振動刺激より遅れると壮快感は低下し、先行する場合と統計的に有意な差であった。視覚刺激によって身体の振動を予測出来ることが、壮快感を増したと思われる。

3.3 快適さ

快適さを、視覚-身体振動刺激の時間差0sを基準とする距離尺度で図4に示す。視覚刺激が身体振動刺激より先行する場合と同期した場合とでは、快適さに違いは見られなかった。時間差のない条件下で行った研究[2]では揺れの感覚が弱い場合に快適さが高くなったが、本研究では視覚刺激が先行して揺れを弱く感じた場合でも快適さは高まらなかった。視覚-身体振動刺激の不一致による違和感が、揺れを弱く感じることによるくつろぎ感の上昇をキャンセルしたのかも知れない。一方、視覚刺激が身体振動刺激より遅れた場合には快適さが低下した。遅延時間が長い時(時間差+0.5s)に低下は顕著となり、統計的にも有意差が得られた。視覚によって身体振動を予測することが出来ず、視覚-身体振動刺激の不一致による違和感があり、さ

表1. 壮快感、快適さ、揺れの強さ感覚の相関

	壮快感- 快適さ	壮快感- 揺れの強さ	快適さ- 揺れの強さ
符号付き Φ 関数	0.06	-0.11	-0.43

らに揺れの感覚が強まったことが、遅延時間が長い時に快適さをより低下させたものと思われる。

3.4 相関

壮快感、快適さ、および揺れの強さ感覚の相互間の相関を検討した。一対比較の試行毎に得られた比較評価が3つの感覚の間でどの程度一致するかを、関連性の尺度である ϕ 係数で表した。感覚の高低あるいは強弱の一致を正、逆の一致を負として ϕ 係数に符号を付加し表1に示す。壮快感-快適さ、および壮快感-揺れの強さ感覚には相関が見られなかったが、快適さ-揺れの強さ感覚には負の相関が得られた。揺れの強さは快適さを低下させるが、壮快感を必ずしも損ねるものではないこと、壮快感と快適さとは必ずしも一致しないことが示された。

4. 考察

本研究では、自動車の乗り心地に視覚が与える影響を調べることを目的に、車台-座席間の振動伝達に起因する視界-身体振動間の時間差を変化させて、「壮快感」と「快適さ」の2項目で乗り心地を比較評価させた。両者を厳密に区分することは難しいが、ここで「壮快感」は走りを楽しむような活動的・積極的な心地良さ、「快適さ」はゆったりと寛ぐような静的で落ち着いた心地良さを表すものとした。異なる刺激条件間で両者を一対比較させた結果、「壮快感」の高低と「快適さ」の高低は必ずしも一致せず、関連性の尺度(符号付き ϕ 係数)はほぼ0となって両者の相関が見られなかった。両者とも車の乗り心地を表す要素であると考えられるが、「壮快感」と「快適さ」はそれぞれ異なる要因によって決定されるものと考えられる。

長野らの研究[3]では、視覚刺激を身体振動刺激より0~0.6秒先行させて定常な非周期的振動を与え、「自動車に乗って走行していると考えた時の乗り心地のこと」と定義して「心地よさ」を計測した。視覚-身体振動の時間差を変化させても「心地良さ」や揺れの強さ感覚に差は見られなかった。非周期的振動が定常的に加わる状況では、視覚刺激が先行しても身体振動の予測が困難なために視覚-身体振動間の不一致が感じられず、「心地良さ」や揺れの強さ感覚に違いが生じないと解釈された。一方、辻らの研究[4]では、視覚-身体運動刺激に位相差を設けて低周波数の正弦波状ロール回転を与え、位相差が大きい程「心地良さ」が低下する結果を得た。特に、視覚刺激が身体運動刺激より位相が遅れる時に、「心地良さ」の低下が激しかった。視覚と身体運動の不一致が心地良さを低下させたと考えられる。さて、本研究では、過度的減衰振動を被験者に与え、視覚-身体振動間に時間差を設けたところ、揺れの強さ感覚は顕著に減弱した。また、視界の振動が身体振動に先行すると壮快感が高まり、遅延すると壮快感および快適さが低下することを示した。特に、0.25秒の視界振動の先行が壮快感を高くした。これは視覚刺激によって身体

振動を予測できることに起因するものと考えられる。一方、視覚刺激が身体振動刺激に先行しても、「快適さ」には差が見られなかった。視覚による予測が、視覚-身体振動の不一致による快適さの低下を抑えたのかも知れない。

アミューズメントのライド・アトラクションでは、視覚刺激を身体運動より0.2秒程度先行させると不快感が生じることが経験的に知られている[5]。本研究の実験においては、視覚刺激が身体振動刺激より0.25秒先行するとき、最も高い壮快感が得られた。ライド・アトラクションでは非定常な動きが与えられており、本研究の実験条件と類似している。本研究で見られた壮快感の上昇は不快感を抑制する効果をもたらすものと思われる。

さて、視覚刺激が先行して与えられても視知覚の処理時間は他の感覚よりも長い。一方、モーションベースの座席部で身体振動刺激が与えられてから頭部運動が生じるまでには時間遅れがあり、運動伝達特性による位相差も生じる。これらの時間差や位相差がどのように関係しているかは今後の検討課題である。

5. おわりに

本研究の結果から、座席振動が車台振動より0.25秒程度の時間遅れとなるように車台-座席間の振動伝達特性を設定することが、快適さや壮快感を高めて乗り心地を良くすることが示唆された。しかし、視覚-身体振動の時間差が乗り心地を変化させるメカニズムは今後の検討課題である。時間差だけではなく、振幅比も含めて、乗り心地を良くする車台-座席間の振動伝達特性を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Graybiel A, Wood CD, Miller EF, and Cramer DB Lt; Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness, *Aerospace Med* 39: 453-455, 1968
- [2] 奥田翔, 竹内利紗, 志水あづみ, 河合俊岳, 小澤惇一, 増田修, 河合敦夫, 井須尚紀; 乗り物の外部・内部視野が乗り心地に与える影響, 第9回情報科学フォーラム講演論文集, 2010
- [3] 長野茂人, 河合俊岳, 増田修, 河合敦夫, 井須尚紀; 身体及び視野の振動が快適さに与える影響, 第8回情報科学フォーラム講演論文集, 第3分冊, 423-424, 2009
- [4] 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, *宇宙航空環境医学*, 45:117, 2008
- [5] 井須尚紀; 乗り物酔い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(内野善生, 古家信彦 編集), 金原出版, 東京, 162-169, 2009