



転がり 2 軸モーションベースにおける 持続的な加速度知覚の検討

Consideration of Sustained Acceleration Perception with Rolling 2-axis Motion Base

副野隼平¹⁾, 脇田 航¹⁾

Syumpei SOENO and Wataru WAKITA

1) 広島市立大学大学院情報科学研究科 (〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1, soeno@vr.info.hiroshima-cu.ac.jp)

概要: モーションベースによる加速度呈示の際, アクチュエータの加速度が速くてもすぐに減速してしまうため, 急ブレーキのように大きな加速度が持続するような状況において, 目標加速度のスケールを縮小せずにアクチュエータの加速度と重力の分力による合成加速度を目標加速度に近づけることは困難である. 本研究では, 1G で伸縮可能なアクチュエータを備えた転がり 2 軸モーションベースを用いて, 急ブレーキのような大きな加速度が持続するような状況における合成加速度の知覚について検討し, アクチュエータの加速度が 0.3G, 0.6G, 1G のそれぞれにおいて定量評価および主観評価で比較検証した. その結果, アクチュエータによる加速度の立ち上がりが速いほど急ブレーキ感が増すことが明らかとなった.

キーワード: 転がり 2 軸モーションベース, ウォッシュアウト法, 前庭感覚, 体性感覚

1. はじめに

フライトシミュレータやドライビングシミュレータ等において, 臨場感を高めるためにアクチュエータを伸縮させることによって搭乗者を揺動させるモーションベースが一般的に利用されているが, モーションベースで可動できる方向を多くするにはアクチュエータの数が必要となり, コストがかかるだけでなく制御も複雑となる. また, アクチュエータだけで積載物の重量を支える構造ではスラスト荷重やラジアル荷重に耐えうるアクチュエータが必要となり, 速い伸縮・揺動が困難となる. この問題に対し, 筆者らはこれまでにモーションベースにおけるアクチュエータへの負荷を大幅に軽減するため, 球面体を転がす手法を提案し, 装置開発に取り組んできた[1]. この手法では可動ベース下部に球面体を取り付けて設置ベース上に載置し, 設置ベースと可動ベースを 2 本のアクチュエータで可動ベースを前後左右に転がり揺動可能に連結することで, 起き上がりこぼしのように少ない力で積載物を揺動可能になるだけでなく, アクチュエータへの負荷が軽減されるため, 押しつけ力の小さい安価で速いアクチュエータによって 1G の伸縮・揺動を実現することができる.

一方, モーションベースを用いて加速度を呈示する際, 加速度を過渡的な成分と定常的な成分に分け, 過渡的な成分はアクチュエータの加速度を用い, 定常的な成分は搭乗

者の体を傾けることによる重力の分力を用いた合成加速度によって表現される.

しかしながら急ブレーキのような大きな加速度が持続するような状況を合成加速度で表現しようとする, 目標角度に瞬時に揺動させる必要があり, 従来のモーションベースではアクチュエータの加速度も小さく, 目標角度への制御も追いつかず, 構造によっては揺動角度も足りないため, 目標加速度のスケールを縮小せずに合成加速度を目標加速度に近づけることは困難である. また, これによって臨場感も低下してしまう. 一方, 我々の転がり 2 軸モーションベースはアクチュエータに対して負荷がかかりにくい構造となっており, 1G で伸縮可能なアクチュエータによって立ち上がりの速い加速度を呈示できるが, 伸縮速度が 200mm/sec であるためニュートラルから最大角度 (pitch 角 26deg) へと傾斜するまでに 1 秒ほどかかり, 合成加速度がすぐに立ち下がる. このときに体験者が合成加速度をどう感じるかについては明らかではない.

そこで本研究では, 急ブレーキのような立ち上がりが速く大きな加速度が持続するような状況において, 目標加速度のスケールを縮小せずに, 前述の合成加速度を呈示した際にユーザがどのように加速度を知覚するかについて検討する. 具体的には, ドライビングシミュレータ内で急ブレーキを行ったときの加速度を呈示する際, 従来のモーシ

ョンベースのようにアクチュエータの加速度が遅い (0.3G) 場合, 提案手法による加速度が速い (1G) 場合, 中間程度の速さの場合 (0.6G) それぞれの合成加速度について定量評価と主観評価で比較検証を行う。

2. 関連研究

2.1 モーションベースを用いた加速度呈示法

任意の加速度を任意の時間呈示するためには, 無限に加速度を発生させる移動体が必要となるが, 広大な空間が必要となり現実的ではない。そのため, モーションベースでは限られた範囲内で移動体にかかる加速度を呈示する際に呈示する加速度を過渡的な成分と定常的な成分に分け, 過渡的な成分はアクチュエータの加速度によって呈示し, 定常的な成分は搭乗者の体を傾けることによる重力加速度の分力を用い, これらの合成加速度として呈示するウォッシュアウト法が一般的に用いられている。

2.2 6軸モーションベース

高自由度のモーションベースの一例として, スチュワート型の6軸モーションベース[2]があげられる。設置ベースと可動ベースを6本のアクチュエータでV字状に連結し, 協調伸縮によって可動ベースを並進3軸, 回転3軸方向に運動させることができる。しかしながら, コストがかかるだけでなく, 並進できる距離に限界があるため, 加速度が持続するような場合は可動ベースを傾斜させて重力の分力によって疑似的な加速度を呈示する。また, 構造上, 積載物をアクチュエータで支えるため, スラスト荷重やラジアル荷重に耐えられるアクチュエータが必要となり, アクチュエータの伸縮速度や加速度が遅くなってしまうだけでなく, 費用面等様々なコストが増大してしまう。

2.3 転がり2軸モーションベース

図1に筆者らが提案してきた球面体を用いた転がり2軸モーションベースを示す。



図 1: 転がり2軸モーションベース

このモーションベースは座席後方の2本の1Gの加速度で伸縮可能なアクチュエータを伸縮制御し, 球面体を転がすことによって, 起き上がりこぼしのように少ない力で積載物を pitch, roll 方向に $\pm 26\text{deg}$ 転がり揺動できる。積載物の荷重の大半を, 球面体を介して地面へと逃がしているため, アクチュエータへの負荷を大幅に軽減でき, アクチュエータの伸縮加速度1Gで揺動させると, pitch, rollともに $\pm 1\text{G}$ 程度の加速度が呈示できる。

転がり運動は回転運動に加え並進運動も含まれている

ため, ユーザの頭部には並進3自由度, 回転3自由度の6自由度の運動が発生する。このため, VR空間内で余分な運動を知覚させないよう視覚補正によって疑似的な6軸運動知覚, 疑似6軸での制御も期待できる[3]。

本研究では, 急ブレーキのような大きな加速度が持続するような状況において, roll, pitchともに $\pm 1\text{G}$ 程度, $\pm 26\text{deg}$ で転がり揺動可能な2軸モーションベースを用いた加速度の知覚について検討する。

3. システム概要

3.1 使用したシステム

本研究では, ドライビングシミュレータのソフトとして株式会社バンダイナムコエンターテインメントのProjectCarsを使用し, Simtoolsにより車両の加速度 (Sway, Heave, Surge) および姿勢 (Pitch, Yaw, Roll) を取得し, 転がり2軸モーションベースで呈示する。

図2に実験で使用したシステムの概要図を示す。

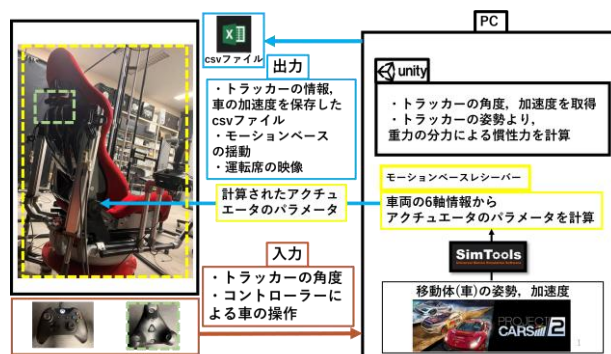


図 2: システム概要図

このシステムへの入力, Simtoolsを通して取得するProjectCarsの車の加速度, 姿勢などの情報と転がり2軸モーションベースに取り付けられたトラックの角度, 加速度である。トラックの回転角度, 加速度を入力するためにSteamVRを利用する。また, コントローラーによってProjectCars内の車の操作を行う。システムの出力は, HMDによるゲーム内の運転席の映像, モーションベースの揺動による加速度呈示とモーションベースに取り付けられたトラックの角度, 加速度, 角度を用いて計算した加速度 (慣性力), ProjectCars内の車の加速度 (Surge) を保存したcsvファイルである。

ProjectCarsより取得した車の情報をUDP通信でモーションベースのレシーバに送り, レシーバ内でアクチュエータのパラメータを計算し, モーションベースに取り付けられたアクチュエータを伸縮させ, 揺動を行うことで加速度呈示を行う。その際, ProjectCarsより取得した車の加速度情報を用いて, モーションベースのアクチュエータの伸縮量, 伸縮速度, 伸縮加速度を決定する。

3.2 転がり2軸モーションベースにおける加速度呈示

本研究では, 転がり2軸モーションベースを用いて加速

度呈示を行う際、前述のウォッシュアウト法を用いる。この時の過渡的な加速度的呈示を行うアクチュエータの加速度にゲイン値をかけ、0.3 倍、0.6 倍、1.0 倍の 3 つのパターンについて検証する。

3.3 転がり 2 軸モーションベースのアクチュエータのパラメータの決定

転がり 2 軸モーションベースにおいて、揺動角度はモーションベースに取り付けられた 2 本のアクチュエータの伸縮量によって決定される。また、アクチュエータを制御する際に伸縮量 (0~300mm) のほかに、伸縮速度 (0~20000, 20000 で 200mm/sec)、伸縮加速度 (0~100, 100 で 1G) の 2 つのパラメータが必要となる。

加速度呈示の際は過渡的な加速度はアクチュエータによって呈示し、定常的な加速度を重力の分力で呈示する。この時、アクチュエータの伸縮速度は最大とし、伸縮加速度は、ProjectCars 内の車の加速度 (m/s^2) を (G) に変換したものを伸縮加速度とする。また、伸縮量は図 3 のように目標角となる θ を算出し、Surge 方向への加速度は Pitch 方向への転がり揺動で疑似的に表現する[3]。

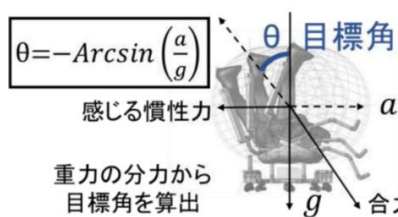


図 3: 並進方向運動に対しての慣性力呈示

これにより、アクチュエータの制御に必要な 3 つのパラメータが決定される。また、アクチュエータのスペックを超えた入力があった場合は最大値に制限する。また、加速度が 0 で入力された場合、アクチュエータの仕様上誤作動を起こすため、伸縮加速度の最小値は 1 とする。

3.4 トラックで取得した情報からの出力

ユーザの頭の位置に値する場所に設置されたトラックの X 軸の回転角度を取得する。定常的な加速度呈示の際は、重力の分力を用いて搭乗者が感じる慣性力とするため、X 軸の回転角度を次式により算出する。

$$a = G \times \sin \theta \quad (1)$$

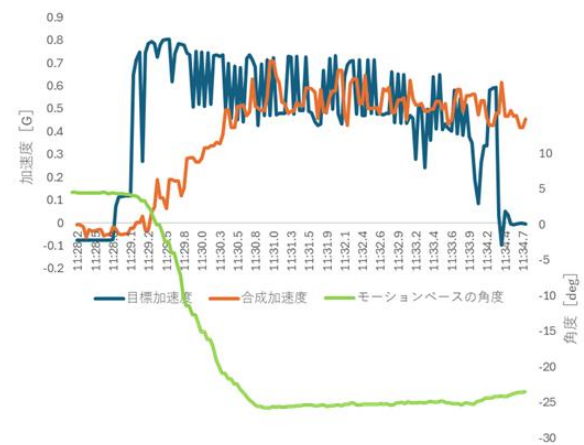
VIVE トラックには加速度センサが備わっており、これよりアクチュエータによる過渡的な加速度を取得する。得られたこれらの情報を Unity 内でスクリプトを用いて、csv ファイルとして出力する。

4. 評価実験

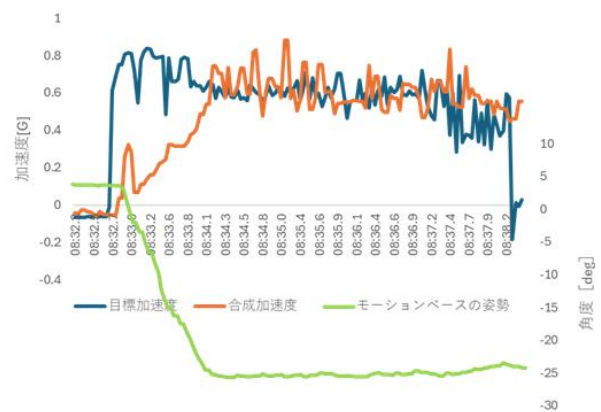
4.1 定量評価

ProjectCars 内の直線コースにおいて、速度 100km/h の状態から急ブレーキを行う。このときの車両の加速度を目標加速度とし、モーションベースによって呈示された合成加速度および、モーションベースの姿勢を示したグラフを図

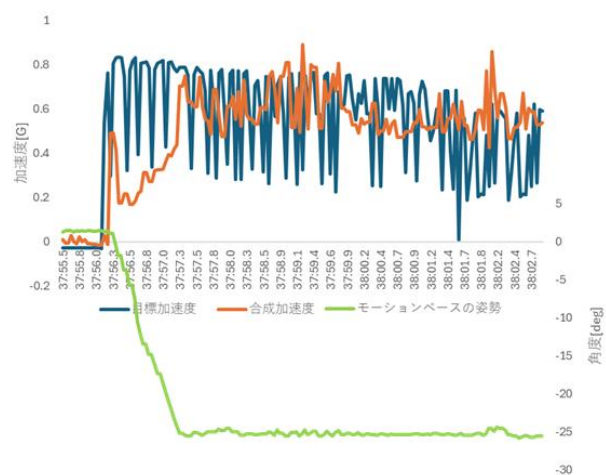
4 に示す。



(a) ゲイン値 0.3



(b) ゲイン値 0.6



(c) ゲイン値 1.0

図 4: 各ゲイン値における急ブレーキ時の結果

図 4 を見ると、急ブレーキ時の車の加速度は急速に約 0.8G に到達している。このとき、合成加速度を見ると、ゲイン値が大きいほど、立ち上がりの加速度が早く、大きい加速度が呈示されていることがわかる。しかし、ゲイン値が大きくなるほど合成加速度が大きく立ち下がっている。

また、加速度呈示は0.2秒ほど遅れて追従していることがわかる。また、加速度が速いほどモーションベースの揺動可能角度の26degに到達したときに合成加速度が大きく振動していることがわかる。これは最大揺動域に達した反動で筐体自体が揺れるためであると考えられる。

これらがユーザにどのような影響を与えるか主観評価によって検証する。

4.2 主観評価

20代の男女10人に対し、定量評価を行った状況と同じ体験をしてもらい、急ブレーキ感を0から10でスコアをつけてもらった。実験中の被験者はHMDを通して運転者の映像を見ている。

それぞれのゲイン値におけるスコアを図5に示す。

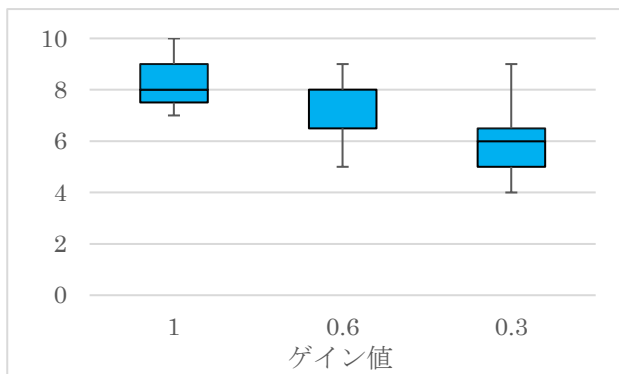


図 5: 急ブレーキ感のスコア

図5より、ゲイン値が大きい、立ち上がりの加速度呈示が大きいほど高いスコアが得られた。これにより、急ブレーキなどの大きな加速度が持続する場合は、合成加速度が一度立ち下がったとしても、立ち上がりの加速度呈示を目標加速度に追従させることが有効であると考えられる。

急ブレーキ感を感じなかった被験者はいなかったが、ゲイン値の違いにあまりスコアに差がみられない被験者もいた。この被験者は運転免許を持っておらず、実際に普段から車に乗ってブレーキを感じる機会があるかどうかスコアに関係している可能性も考えられる。

一方、合成加速度が遅れて呈示されることに違和感を覚えた被験者はいなかった。

5. むすび

本研究では、転がり2軸モーションベースを用いて、急ブレーキのような大きな加速度が持続するような状況において、目標加速度のスケールを縮小せずに合成加速度を呈示した際にユーザがどのように加速度を知覚するかについて検討を行い、ドライビングシミュレータ内で急ブレーキを行ったときの加速度を呈示する際、従来のモーションベースのようにアクチュエータの加速度が遅い(0.3G)場合、提案手法による加速度が速い(1G)場合、中間程度の速さの場合(0.6G)それぞれの合成加速度について定量評価と主観評価で比較検証を行った。

定量評価より、ゲイン値が大きいほど立ち上がりの加速度は目標加速度に合成加速度が追従できているが、ゲイン値が大きいほど立ち下がる加速度も大きくなった。これらがユーザにどのような影響を与えるのか主観評価を行った結果、ゲイン値が大きい、立ち上がりの加速度呈示が大きいほど高いスコアが得られた。これにより、急ブレーキなどの大きな加速度が持続する場合は、合成加速度が一度立ち下がったとしても、立ち上がりの加速度呈示を目標加速度に追従させることが有効であることがわかった。

今回は急ブレーキの状況に限って検証したが、遠心力がかかり続ける場合や、エレベーターなどの上下に加速度がかかり続ける場合等については未検証であるため、引き続き検討を進めていく。

参考文献

- [1] 脇田 航：ヒンジ機構による簡易二軸モーションプラットフォーム (Type1) の改良, 知覚情報研究会「VR心理, 複合現実型実応用および一般」, PI-21-036, 2021.
- [2] D. Stewart: A Platform with Six Degrees of Freedom, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Vol. 180, No. 15, pp. 371–386, 1965.
- [3] S. Soeno and W. Wakita: An Examination of 2-axis Distribution Method for Pseudo 6-axis Motion Rendering with a Rolling Two-Axis Motion Base, Proceedings of the 34th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2024) and the 29th Eurographics Symposium on Virtual Environments (EGVE 2024), pp.1–2, Tsukuba, Japan, 2024.