



実車両運転型 VR システムに対する リダイレクテッドウォーキング技術の応用可能性検討

Investigation into the Applicability of Redirected Walking Techniques to a Vehicle-in-the-Loop VR System

田中 誠大¹⁾, 小玉 亮¹⁾, 藤枝 延維¹⁾

Masahiro TANAKA, Ryo KODAMA and Nobushige FUJIEDA

1) 株式会社豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1, kodama-r@mosk.tytlabs.co.jp)

概要：限られた実空間においても広大なバーチャル空間内を自由に運転しているように体験させることを目的に、リダイレクテッドウォーキングを実車両運転型 VR システムに応用する可能性を検討した。並進・回転のゲイン操作を含むアルゴリズムを実装し、3 名の開発者による主観評価を通じて、ゲイン係数 1.25~2.0 の範囲での体験を比較した。直進ではゲイン係数 2.0 でも違和感は少なく、旋回時には 1.75 を超えると遠心力の違和感が現れる傾向が確認された。

キーワード：リダイレクテッドウォーキング, 自動車, 運転, 移動感覚

1. はじめに

筆者らは、自由に移動できるライド型アトラクションを提供するアイデアとして実車両運転型バーチャルリアリティ (VR) システム (以下、運転型 VR システムと呼ぶ) を提案している[1]。これは、実車両にヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着して乗り込み、バーチャル空間をしながら運転を行うものである。バーチャル空間内の移動が自由となり、体感の向上が期待できる。

一方で、運転型 VR システムの運用には、自動車が安全かつ自由に走行できる広大な実空間の確保が必要となる。しかし、現実的にそのようなスペースを用意することは困難であり、運用可能な場所は限られる。また、走行範囲が狭いと十分な速度を出すことができず、体験の種類も制約される。

この課題を解決するために、限られた物理空間で広いバーチャル空間を移動しているように感じさせる技術である「リダイレクテッドウォーキング (Redirected Walking: RDW)」[2]を運転型 VR システムに組み込むことを試みる。

本研究はその第一段階として、車両上で動作する RDW (以下、リダイレクテッドドライビング (Redirected Driving: RDD) と呼ぶ) のアルゴリズムを実装し、有効なゲイン係数の範囲を明らかにすることを目的とする。ゲイン係数は開発者による主観的評価で検証する。

2. 関連研究

RDW はユーザが気付かない範囲で、実空間の視界の移

動量をゲイン係数倍したものをバーチャル空間の視界の移動量として反映することで、限られた実空間の移動を広大なバーチャル空間の移動として知覚させる手法である。本研究では、基本的な操作である「並進移動量操作」「回転量操作」を利用する。

並進移動量操作は、体験者の実空間の並進移動量に並進ゲイン係数 gT を乗算する操作である。Steinicke らによる研究[3]では、 gT が 0.78 から 1.22 の範囲内である場合、多くの体験者がこの操作に気づかないことが報告されている。

回転量操作は、体験者の実空間の回転量に回転係数ゲイン gR を乗算する操作である。同じく Steinicke らによる研究では、 gR が 0.67 から 1.24 の範囲内である場合、多くの体験者がこの操作に気づかないことが報告されている。

RDW の技術をモビリティでの移動に適用したものとして、Bruder らによる研究[4]がある。車いすでの移動時は有効な並進ゲイン係数が 1.36 に拡大することが示された。理由として、車いすでの移動時は歩行時に比べて、運動感覚の手がかりが少ないためと考察されており、運転型 VR システムでも同様の効果が期待される。ただし、この研究は 2km/h 程度の速度で行われており、より高速で運動する車両上で同様の結果が得られるか定かではない。

3. 実験方法

運転型 VR システムのハードウェアおよびソフトウェア構成を 3.1, 3.2 節で示す。3.3 節では、「並進移動量操作」および「回転量操作」のアルゴリズムを説明する。加えて、

発進時に生じやすい視覚と前庭感覚間、視覚と聴覚間の刺激の差を緩和する機能のアルゴリズムを 3.4 節で示す。最後に、3.5 節の方法で評価用コンテンツを制作し、開発者数名で体験することで有効なゲイン係数を検証した。

3.1 ハードウェア構成

運転型 VR システムのシステム構成を図 1 に示す。ベース車両はトヨタ車体の一人乗り電気自動車 (EV) である COMS とした。当所開発のコントローラを搭載し、運転者の操作に応じて変化するアクセルペダル出力値、シフトポジションを読み取ることができる。また、取得した値を上書きして EV に指令できる。ハンドルのシャフト部にはサーボモータが設置されており、ハンドルの操作角を取得できる。

車両には、バーチャル空間を提示するための PC と HTC 社の HMD である Vive Pro、そして各種トラッキングシステムが搭載されている。トラッキングシステムは、自然な運転感覚を実現するため、運転時の視覚情報に与える影響が大きい車両、頭部、手、ハンドルの姿勢を計測できるシステムを選定し、バーチャル空間の車両、頭部、手、ハンドル (以下、アバタと呼ぶ) に反映するようにした。車両トラッキングシステムには更新頻度 200 Hz、位置誤差 ± 10 cm、方位誤差 ± 0.3 deg の測位システムを採用した。頭部トラッキングシステムには、LP-Research 社の LPVR-DUO を採用した。LPVR-DUO は車両向けの頭部トラッキングシステムで、光学式トラッキングシステムと車両に設置する IMU (Inertial Measurement Unit) の情報が必要なため、NaturalPoint 社の光学式マーカートラッキングシステムである V120: Trio および Motive ソフトウェアと LP-Research 社の Platform-IMU が接続されている。そしてハンドトラッキングシステムには Ultraleap 社の Leap Motion Controller 2 を採用した。ハンドルの角度は、ハンドルシャフトに設置したサーボモータから取得した。

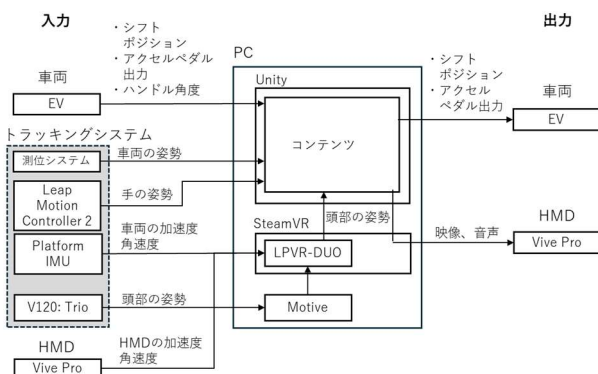


図 1 ハードウェア構成

3.2 ソフトウェア構成

アルゴリズムの実装、および評価用コンテンツの制作は、3D のゲームエンジンである Unity で行った。

運転型 VR システムを実現するために、各種トラッキン

グシステムのデータをアバタに反映する機能を持たせた。頭部、ハンドル、両手アバタについてはデータをそのままアバタに反映し、車両アバタについては RDD として並進移動量操作と回転量操作を行ったのちにアバタにデータを反映する機能を追加した。

発進時の違和感を低減する機能として、車両から得たアクセルペダル出力値を RDD のゲイン係数に応じて上書きする機能を追加した。また、車速と RDD のゲイン係数から走行音を生成する機能を追加した。

3.3 RDD

3.3.1 座標系の定義

本研究では、100m×74m の平坦な車両実験場を前提にアルゴリズムを実装した。Unity 上では X-Z 平面とし、短辺方向を X 軸、長辺方向を Z 軸、高さ方向を Y 軸として定義した。

3.3.2 並進移動量操作

並進移動量操作は、1 フレーム内における実車両の移動距離に gT を乗算し、その結果を車両アバタの移動量として反映する方法で実現した。具体的には、測位システム取得される車両の座標データを用い、以下の処理を行った。

まず、前フレームの車両座標 $(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1})$ を記録しておき、現フレームの座標 (x_n, y_n, z_n) から移動量 d [m] を算出した (式(1))。

続いて、Unity の標準機能を用いて車両アバタの進行方向を示す単位ベクトル $\vec{d}_{forward}$ を取得した。最後に、前フレームの車両アバタの座標 $(x'_{n-1}, y'_{n-1}, z'_{n-1})$ に d 、 gT 、 $\vec{d}_{forward}$ を積算したベクトルを加算し、現フレームの車両アバタの座標 (x'_n, y'_n, z'_n) とした (式(2))。

$$d = \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (z_n - z_{n-1})^2} \quad (1)$$

$$(x''_n, 0, z'_n) = (x''_{n-1}, y'_{n-1}, z'_{n-1}) + gT * d * \vec{d}_{forward} \quad (2)$$

3.3.3 回転量操作

回転量操作は、1 フレーム内における実車両の方位の変化量に gR を乗算し、その結果を車両アバタの方位の変位量として反映する方法で実現した。具体的には、測位システムから取得される実車両の方位 (ヨー角) データを用い、以下の処理を行った。

まず、前フレームの実車両のヨー角 ψ_{n-1} [deg] を記録しておき、現フレームのヨー角 ψ_n [deg] から方位の変化量 $\Delta\psi$ [deg] を算出した (式(3))。

続いて、 $\Delta\psi$ に gR を掛けた値を車両アバタの前フレームのヨー角 ψ'_{n-1} に加算し、これを車両アバタの現フレームのヨー角 ψ'_n とした (式(4))。今回はステアリング操作の違和感を低減するため、実車両と車両アバタの旋回半径が一致する $gT = gR$ の条件で実験を行った。

$$\Delta\psi = \psi_n - \psi_{n-1} \quad (3)$$

$$\psi'_n = \psi'_{n-1} + \Delta\psi * gR \quad (4)$$

3.4 発進時の違和感を低減する機能

車両の動き始めには、視覚と他の感覚（特に前庭感覚）との間に加速度のズレが生じやすい。ゲイン係数が大きいほど、加速度の差は大きくなる。ある程度を超えた段階で違和感が生じると予想される。また、ゲイン係数がある程度大きいと、景色の流れが現実離れして違和感が生じる可能性がある。これらの違和感を低減するため、3.4.1 項で示すゲイン係数に応じてアクセル操作量を絞る「アクセル操作量操作」を実装した。

また、RDD が適用された映像情報と、聴覚で捉える風切り音やロードノイズなどの差である。大まかには、走行音は車速に応じて音量と音程が変化する。ゲイン係数が大きいほど、車速の変化と走行音の変化の差が大きくなり、違和感につながる。この違和感を低減するため、3.4.2 項に示すゲイン係数に応じて走行音を変調する「走行音操作」を実装した。

3.4.1 アクセル操作量操作

RDD のゲイン係数が大きいほどアクセル操作量が小さくなる処理を実装した。

$$A_{output} = \frac{A_{input}}{gT} \quad (5)$$

A_{input} は体験者のアクセルペダル操作量で、 A_{output} は車両に指示される実際のアクセルペダル操作量である。ゲイン係数が大きいほどアクセルペダル操作量が小さくスケールリングされ、実車両の加速が穏やかになる。

この処理はブレーキへの応用も有効と考えられるが、今回は未実装とした。

3.4.2 走行音操作

実際の音を操作することは難しいため、ヘッドホンからコンテンツで生成したモータ音を再生し、それを体験者に提示することで車速に関する違和感の低減を試みた。

まず、ループ再生が可能なノイズ音を用意する。これを再生しながら、車両の速度とゲイン係数からノイズ音の音量と音程を操作し、モータ音を模した走行音を生成した。まず、速度 v [m/s] は、(1) 式で得られる毎フレームにおける移動距離 d [m] をフレーム更新間隔 Δt [s] で割ることで算出される (式(6))。

次に、車速 v と gT から、式(7)(8)に従ってモータ音の音程 p と音量 l を調整する。RDD のゲイン係数が大きいほど、音程 p と音量 l が大きく変化する計算となっている。 gp および gl はそれぞれ p や l の振れ幅を適当な範囲にスケールリングするための定数である。予備実験にて、実験で用いる車速

域で違和感が無いように設計した。

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (6)$$

$$p = p_{base} + gp \cdot |v| \cdot gT \quad (7)$$

$$l = l_{base} + gl \cdot |v| \cdot gT \quad (8)$$

3.5 ユーザ評価

アルゴリズムの効果を検証するため、開発者 3 名を対象に体験評価を実施した。

3.5.1 評価方法

まず、体験者には HMD を装着した状態で習熟運転をさせた。その後、バーチャル空間で同一のコースを、ゲイン係数を 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 の 4 条件で走行させたのちに、感想を収集した。条件の順序は体験者の自由とした。

3.5.2 体験内容

コンテンツは、図 2(a)に示すバーチャル空間 1 と図 2(b)に示すバーチャル空間 2 の二つのバーチャル空間で構成した。

バーチャル空間 1 は、RDD が適用されていない運転操作を体験できる環境である。空間内には、実車両を模擬したバーチャル車両と、各ゲイン条件の開始位置を示す表示板 (図 2 (a)の A から D の板)、ユーザが迷わず目的地まで到達できるようにするための走行ルートを配置した。この空間では、実空間とバーチャル空間の車両姿勢を 1 対 1 で対応させた。習熟運転はバーチャル空間 1 で実施した。

バーチャル空間 2 は、RDD が適用された運転操作を体験するための環境であり、走行ルートを示す道路とバーチャル車両を配置した。走行ルートは左端がスタート位置となっており、直線→左カーブ→直線→右カーブ→直線とした。どのゲイン条件でも、バーチャル空間 2 は同じ見目をしており、図 3 に示すように実車両の軌跡やアクセル操作量、走行音に差が出る。なお、走行ルートの直線とカーブの間には緩やかに曲率に変化する緩和曲線が設けられている。これは、ゲイン条件間で生じる遠心力の差に気づかれにくくする工夫である。

体験者は習熟運転が終わったら、バーチャル空間 1 の A から D の表示板のいずれかの前まで走行し、一旦停車する。バーチャル空間 1 では、車両アバタ内に図 2(c)に示すように A から D のボタンが配置されており、表示板に対応するボタンを押すと図 2 (b)のバーチャル空間 B の左端に移動する。それぞれのボタンに 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 のゲイン条件のいずれかが割り当てられており、ボタンを押すことで、そのゲイン係数で各アルゴリズムが有効となった状態での走行が可能となる。A~D で示しているのは体験者に具体的なゲイン係数を伏せる意図がある。バーチャル空間 1 における A から D の開始点が異なるのは、バー

チャル空間 2 では同じ見た目のコースでも、実際の走行軌跡はゲイン係数ごとに異なるためである。走行可能範囲から出ないように開始点を指定している。

バーチャル空間 2 の右端まで走行したら、図 2 (d)に示すハンドル右側のボタンを押してバーチャル空間 A に移動する。

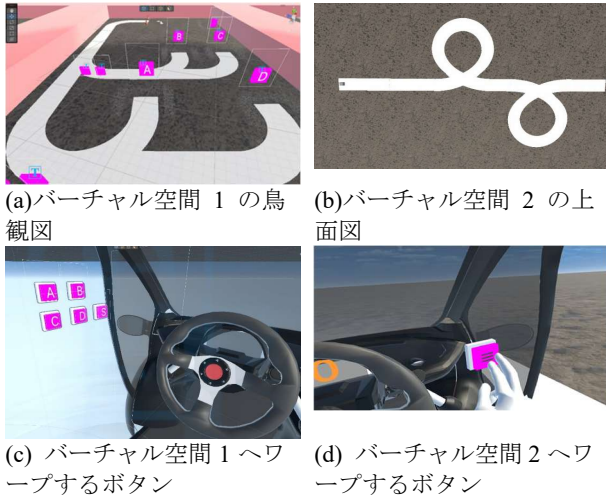


図 2 評価コンテンツ

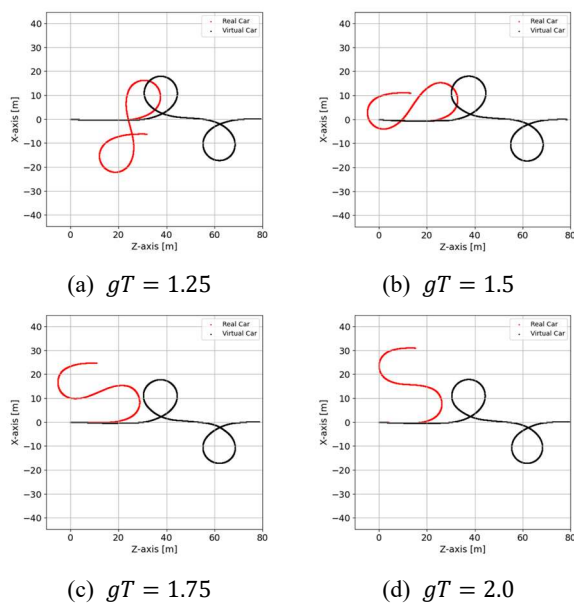


図 3 実車両とバーチャル車両の軌跡の違い

4. 結果

開発者 3 名のうち、自身の向いている方向がバーチャル空間と現実空間で異なることに気づいた者はいなかった。以下のような感想が得られた。

- ・ゲイン係数が 1.75 以上だと、旋回時に横 G があまりかからないように感じた。
- ・直進はゲイン係数が 2.0 でも違和感はないが、旋回時に

加減速すると違和感がある。

- ・ゲイン係数 2.0 での走行後に 1.25 で走行すると、実車両より遅く感じられた。

5. 考察

直進走行については、ゲイン係数 2.0 でも違和感が報告されなかった。このことから、直進走行に関しては有効な並進ゲイン係数は 2.0 以上であると考えられる。

旋回走行については、ゲイン係数 1.75 以上で、旋回時の遠心力が見た目通りではないことに気付かれることが分かった。このことから、有効な回転ゲイン係数は 1.5~1.75 の間にあると考えられる。

発進時の違和感については感想に出なかった。アクセルペダル操作量と走行音の操作に効果があったのだと予想される。

車両の方位角は容易に誤認されることがわかった。遠心力の違和感を抑えることで、限られた実空間でも広大な空間を走行していると感じさせることが可能となる。

まとめると、リダイレクテッドウォーキングは運転型 VR システムでも機能することが確認できた。有効なゲイン係数は歩行時や車いす移動時と比べて拡大する。しかし、遠心力の差には気づかれやすく、ゲイン係数をさらに拡大するには、旋回時に体験者にかかる遠心力を実際のものに近づける必要があることが明らかになった。

6. むすび

RDD および発進時の違和感低減処理を実装した。開発者を対象としたユーザ評価を行い、直進走行については、ゲイン係数 2.0 でも違和感が無いことを確認した。一方で、遠心力に対する違和感が原因で、旋回時はゲイン係数が 1.75 以上になると違和感が生じることが確認された。今後は被験者を増やして、評価傾向の再確認を行う予定である。

参考文献

- [1] 小玉亮, 藤枝延維, 田中誠大: 実車両運転型 VR システムの試作, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2B2-10, 2024.
- [2] S. Razzaque, et al., "Redirected walking." In Proceedings of EUROGRAPHICS, 9, 105-106, 2001.
- [3] F. Steinicke, et al., "Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback." International Conference on Cyberworlds, 217-223, 2008.
- [4] G. Bruder, et al., "Redirecting walking and driving for natural navigation in immersive virtual environments." IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, 18, 538-545, 2012.