



VR 空間における両手・視点と独立した 3 次元移動インタフェースの検討

佐藤力樹¹⁾, 櫻井翔¹⁾, 廣田光一¹⁾, 野嶋琢也¹⁾

1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究所

(〒 182-0035 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {r_sato, sho, hirota}@vogue.is.uec.ac.jp, tnojima@nojilab.org)

概要: 宇宙空間とアクションを合わせた VR コンテンツでは, 3 次元移動と同時にオブジェクト操作や周囲目視が求められる. しかし既存の移動制御法では, 手や視点が自由でない, あるいは制御できない動きが存在する. そこで本研究では, 両手・視点と独立した 6 自由度運動制御の実現を目指す. まず足の位置・接地圧による 6 自由度運動制御法を試作したが, 制御方法が分かりづらい, 意図しない入力が発生するなどの課題が判明した. それらの解決に向け, 足, 上半身, 肩の動作を併用した 4 自由度運動制御法を試作したところ, より効率的な移動制御ができる可能性が示唆された.

キーワード: インタフェース, 3 次元移動, 6 自由度運動

1. はじめに

VR は宇宙遊泳のような 3 次元移動体験を没入感高く再現できるほか, シューティングやハンドボールといった要素を加えることで, より自由度の高い遊びを実現できる¹²⁾. そうしたコンテンツでは, 3 次元移動と同時に, 手で銃やボールを扱いつつ, 他プレイヤーなどの周囲の状況を目視する必要がある. そのため, 3 次元移動の制御中でも手や視点を自由にすることが望ましい. また宇宙空間を舞台とする場合, 任意な姿勢を取るために, 6 自由度の運動制御が望まれる. そのため本研究では, 宇宙空間を舞台とする VR コンテンツに向け, 両手・視点と独立した 6 自由度運動制御インタフェースの実現を目標とする.

2. 関連研究

現在 3 次元移動制御の多くは, 手に保持するコントローラのボタン・スティック, あるいはコントローラを保持する腕の動作を用いて行われている. しかし前者は, 手によるオブジェクト操作を同時に行うと, 移動制御とオブジェクト操作両方の精度や正確さが低下してしまう [1]. また後者は, 少なくとも片手が移動制御に占有され, 自由なオブジェクト操作ができなくなってしまう. そのほかにも, 頭部方向 [2] や上半身 [3], 足 [4] などを用いた 3 次元移動制御が提案されてきた. 頭部方向で移動方向を制御する手法は, コントローラのボタン・スティックよりも素早いかつ正確な移動を可能とする [2] が, 周囲へ目を向けると移動方向が変わってしまう [5]. 上半身を傾ける・伸ばす・屈めることで移動方向を制御する手法は, 視点を自由にしながら, コントローラのボタン・スティックよりも容易かつ正確な移動制御を可能にする [3] が, 既存手法で制御できる運動自由度は高々 4 自

由度であり, 6 自由度運動全ての制御が望まれる宇宙空間が舞台であると弊害が生じる. 足による移動制御も同様, 視点は自由なものの, 6 自由度運動全ての制御は未だ達成されていない.

そこで本研究では, 両手・視点と独立して 6 自由度運動全てを制御可能なインタフェースの実現を目標とし, まず足のみで 6 自由度運動を制御可能なインタフェースを試作した.

3. 試作インタフェース「Fp²」

本研究ではまず, インタフェースとして活用可能な, 制御に適切な足動作の探索を行った. 探索を容易にするため, 図 1 のように, カメラと MediaPipe を足動作計測に用いることとした. また, 画像では詳細な計測が困難な踵・爪先動作の計測のため, 図 2 に示す, 靴底部分に圧力センサ (FSR406) を備えたデバイスを併用した. そして表 1 のように, 足の位置と踵・爪先の接地圧を入力とする 6 自由度運動制御インタフェース「Fp² (Feet position and pressure)」を試作した. 次に Fp² の評価実験を行った.

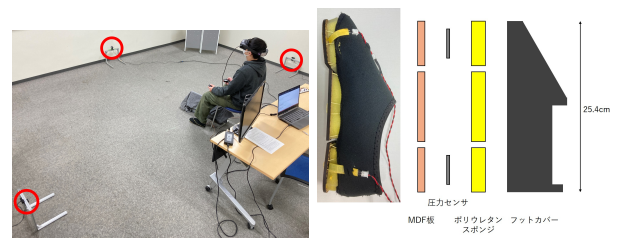


図 1: カメラによる足位置計測 (赤丸部にカメラを配置) 図 2: 踵・爪先の接地圧計測に用いたデバイス

¹⁾無重力 FPS「SkyfrontVR」(<https://www.skyfrontvr.com/>)

²⁾無重力 VR スポーツ「Echo Arena」

(<https://www.readyatdawn.com/game-list/echo-vr.html>)

表 1: Fp² による運動制御

足動作	運動自由度
両足を左/右へ動かす	右/左方向移動
両足で爪先/踵を押す	上/下方向移動
両足を後ろ/前へ動かす	前/後方向移動
両足を左右へ広げる/閉じる	上/下ピッチ回転
左足を後ろ/前, 右足を前/後ろへ動かす	左/右ヨー回転
左足の爪先/踵, 右足の踵/爪先を押す	右/左ロール回転

4. Fp² 評価実験

4.1 実験目的

本実験の目的は、両手・視点と独立した 6 自由度運動制御インタフェース「Fp²」が、3 次元移動とそれ以外の作業の同時実施を改善するか調査することである。本実験に当たり、両手・頭部方向を用いるインタフェースと比較し、Fp² は同時作業におけるタスクパフォーマンス・ユーザビリティ・UX を向上させるという仮説を立てた。

4.2 比較インタフェース

本実験では Fp² の比較対象として、Chen ら [2] の研究を参考にした 2 つのインタフェースを用いた。1 つは、Meta Quest Pro(以下ヘッドセット)の左手コントローラで並進移動、右手コントローラで姿勢回転を制御する手法である(表 2 参照、以下手インタフェース)。もう一つは、上半身の傾きと伸び・屈みで並進移動、頭部方向で姿勢回転を制御する手法(表 2 参照、以下頭インタフェース)である。

表 2: 手・頭インタフェースによる運動制御

手	頭	運動自由度
左スティックを 右/左に倒す	上半身を 右/左へ傾ける	右/左方向移動
左人差指/中指の トリガーを押す	上半身を 伸ばす/屈める	上/下方向移動
左スティックを 前/後に倒す	上半身を 前/後へ傾ける	前/後方向移動
右スティックを 前/後に倒す	顔を上/下に向ける	上/下ピッチ回転
右スティックを 左/右に倒す	顔を左/右に向ける	左/右ヨー回転
右人差指/中指の トリガーを押す	頭を右/左に倒す	右/左ロール回転

4.3 実験タスク

実験では、VR 空間内の直方体オブジェクト(図 3 上、以下パーツ)を掴み、立方体オブジェクト(図 3 下、以下ベース)の 1 面に空いた穴へ格納するタスクを行った。ベースはランダムな角度に傾いており、パーツはベースを中心に衛星運動を行う。参加者は Fp²、手、頭インタフェースのいずれかを使用して 3 次元移動を行い、ヘッドセットのコント

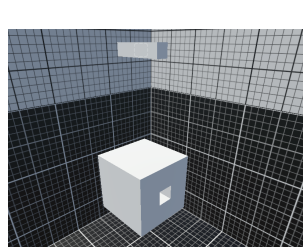
ローラのスティックを押してパーツを掴んだ。そしてベースの穴まで運び、パーツが赤くなる深さまで穴の中へ格納した。その状態を 5 秒維持することでタスク終了となる。その際、パーツとベースが接触すると、パーツを保持している手のコントローラが振動するようになっていた。参加者は、このタスクを 10 分以内に、できるだけ早く、かつパーツとベースを接触させずに行うよう指示を受けた。

4.4 実験手順

参加者はまず、年齢、性別、VR 経験を問うアンケートに回答した後、実験手順やタスク内容について説明を受けた。その後、Fp²、手、頭インタフェースそれぞれで、次のことを繰り返した。

まずインタフェース使用方法の説明を受け、図 4 のように椅子に座り、ヘッドセットを装着した。Fp² を使用する際は、図 2 のデバイスも装着した。また、Fp²、頭インタフェースを使用する際はキャリブレーションを行った。その後、練習として 1 回、本番として 1 回タスクを行い、本番タスクではタスク所要時間、パーツとベースが接触していた時間、総並進移動距離、総姿勢回転量、入力ログが記録された。本番タスクの後、日本語版 NASA-TLX[6] を用いたアンケートと、インタフェースへの好ましさを 7 段階リッカート尺度で答えるアンケートに回答した。

3 つのインタフェースでのタスク終了後、類似インタフェースの使用経験、インタフェースの使いやすさ・好ましさ、実験全体に関する自由記述アンケートに回答した。

図 3: 実験タスクに
用いた VR オブジェクト図 4: 実験の様子
(Fp² を用いる場合)

4.5 結果

実験には 21~30 歳の男性 15 名が参加した。その内、3 名は 10 分を超過したなどの理由でタスクを中断したため、残り 12 名のデータが分析対象となった。

タスクパフォーマンス、ユーザビリティ、UX の結果をそれぞれ図 5, 6, 7 に示す。それぞれのデータについて Friedman 検定を行ったところ、タスク所要時間 ($\chi^2(2) = 16.2, p = 3.09e-4$)、総並進移動距離 ($\chi^2(2) = 12.2, p = 0.00228$)、オブジェクト接触時間 ($\chi^2(2) = 16.2, p = 3.09e-4$)、TLX 知的・知覚的要求 ($\chi^2(2) = 18.5, p = 9.6e-5$)、TLX 重み付けスコア ($\chi^2(2) = 17.1, p = 1.87e-4$) において、インタフェースの主効果が認められた。これらのデータに対し、さらに Bonferroni 補正・Wilcoxon の符号順位検定を用いた多重比較を行った。結果、Fp² のタスク所要時間・総並進移動距離が有意に長かった(手-Fp²: $p = 0.00439, r = 0.201$, 頭-Fp²: $p = 0.00147, r = 0.809$ /手-Fp²: $p = 0.0278, r =$

0.967, 頭-Fp²: $p = 0.00147, r = 0.827$) ほか, オブジェクト衝突時間は頭インタフェースよりも有意に長かった (頭-Fp²: $p = 0.00147, r = 0.131$). また, Fp² の TLX 知的・知覚的要求・TLX 重みづけスコアが有意に高かった (手-Fp²: $p = 0.00293, r = 0.0267$, 頭-Fp²: $p = 0.00147, r = 0.0329$ /手-Fp²: $p = 0.0103, r = 0.415$, 頭-Fp²: $p = 0.00147, r = 0.286$). これらの結果から, Fp² は手, 頭インタフェースと比較し, タスクパフォーマンス・ユーザビリティが低かったことが分かった一方, UX に差は見られなかった。

全タスク終了後のアンケートと入力ログより, Fp² のタスクパフォーマンス・ユーザビリティが低かった理由として, 足動作と 6 自由度運動の対応付けが非直感的であったこと, 入力同士が干渉してしまったことが考えられた. Fp² では表 1 のように 6 自由度運動を制御したが, 7 名の参加者が, 足動作と各運動の対応付け, 特にピッチ・ロールの対応付けが直感的でなかったとコメントした. また, 両足を後ろに動かしながら前後に開く動作が難しく, 前方向に進みつつ左右に向きを変える移動ができなかったとコメントされていた. 図 8 から, 手, 頭インタフェースと比較し, Fp² では有意に複数の運動自由度が同時に制御されていなかったことが分かった (Friedman: $\chi^2(2) = 22.2, p = 1.5e-5$, 手-Fp²: $p = 0.0103, r = 0.161$, 頭-Fp²: $p = 0.00147, r = 0.0553$), 移動が不効率になっていたと考えられる. ほかにも, 足を動かすと接地圧が変化し, 意図せず上下方向移動が発生したことがコメントされていた. これらがタスクパフォーマンス・ユーザビリティの低下に繋がったと考えられる. しかし, TLX フラストレーションやインタフェースの好ましさに有意な差は見られなかった. 参加者 4 名は Fp² に対し, 操作感が楽しいとコメントしていたことから, Fp² は楽しさを感じさせていた可能性が示唆された. また参加者の内, 手の類似インタフェース経験者は 10 名, 頭の類似インタフェース経験者は 1 名, Fp² の類似インタフェース経験者は過去のテスト参加者であった 3 名であった. そのため, Fp² の目新しさも影響していると考えられる。

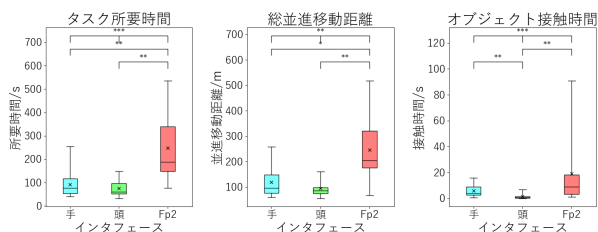


図 5: タスクパフォーマンス結果 (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$)

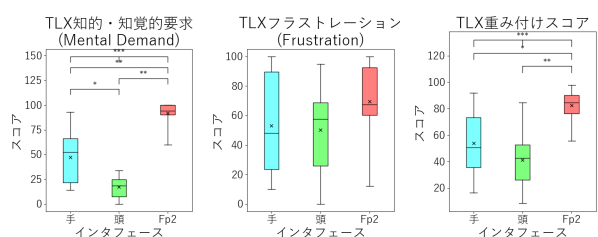


図 6: ユーザビリティ結果 (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$)

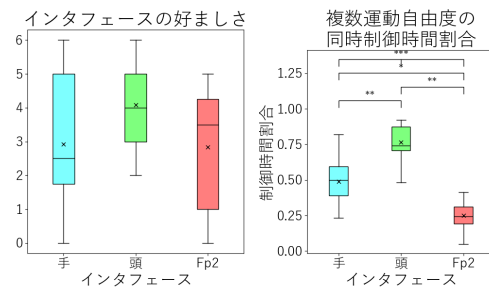


図 7: UX 結果

図 8: 複数運動自由度を同時制御していた時間の割合 (* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$)

5. 新試作インタフェース「FUS」

5.1 インタフェース模索

4.5 から, Fp² は足動作-運動自由度の対応付けと入力同士の干渉が課題だと分かった. これらの解決にあたり, 直感的かつ干渉しない足動作-運動自由度対応, 足以外の動作の併用の 2 点を重視し, インタフェースの模索を行った. 結果, 3DRudder³の前後・左右方向移動制御が直感的である可能性が見られた一方, 上下方向移動制御は直感的でなく, ヨー回転制御が左右方向移動制御と干渉する可能性が見られた (3DRudder の運動制御は表 3 を参照). また, 4.2 の頭インタフェースの上下方向移動制御, 肩動作によるヨー回転制御が直感的である可能性が見られた. そこで, 3DRudder, 上半身, 肩動作を併用し, 直感性と入力干渉を改善したインタフェースが実現できると考えた. そしてまず比較のため, 3DRudder と同じ 4 自由度運動を制御可能なインタフェース「FUS (Feet, Upper body and Shoulders)」を試作した.

5.2 FUS 概要

3DRudder 再現デバイスを図 9 に示す. 半球状のスポンジボールの上に板を固定し, 板の中心に 9 軸センサ (BNO055), 両脇に足を乗せるための木片と爪先・踵の動作を計測する圧力センサ (FSR406) を配置し, 表 3 の運動制御を再現した. また FUS を使用している様子を図 10 に示す. 図 9 のデバイスのほか, 肩の位置に圧力センサ (FSR402) を配置した 4 点式シートベルトと, ヘッドセットの頭部位置推定機能を用い, 表 3 のように運動制御を行った. 次に FUS を評価するための実験を行った.



図 9: 3DRudder 再現デバイス



図 10: FUS 使用時の様子

³<https://www.ask-corp.jp/products/3drudder/controller/3drudder.html>

表 3: 3DRudder と FUS による運動制御

3DRudder	FUS	運動自由度
デバイスを 右/左に傾ける	デバイスを 右/左に傾ける	右/左方向移動
左足の踵/爪先, 右足の爪先/踵を押す	上半身を 伸ばす/屈める	上/下方向移動
デバイスを 前/後ろに傾ける	デバイスを 前/後ろに傾ける	前/後方向移動
デバイスを 左/右に回す	右/左肩で ベルトを前に引く	左/右ヨー回転

6. FUS 評価実験

6.1 実験目的・概要

本実験の目的は、FUS が Fp^2 や 3DRudder の直感性・入力干渉の課題を解決するか調査することである。実験は 3DRudder 再現デバイスと FUS を用い、4.4 と同様に行った。

6.2 結果

実験には 21~22 歳の男性 5 名が参加した。参加者数が少ないため、本実験では検定を行わなかった。

タスクパフォーマンス、ユーザビリティ、UX の結果をそれぞれ図 11, 12, 13 に示す。3DRudder と比較し、FUS はタスク所要時間・総姿勢回転量が少ない傾向が見られた。また TLX 身体的要求は 3DRudder, TLX フラストレーションは FUS の方が少ない傾向が見られた。そして 3DRudder と比較し、FUS の方が好まれていた傾向が見られた。全タスク終了後のアンケートでは、3DRudder よりも、FUS の上下方向移動制御の方が分かりやすかった・制御しやすかったほか、ヨー回転制御も好ましいとコメントされていた。そして、FUS の方がタスク所要時間や総姿勢回転量が少ない傾向が見られたことから、FUS が 3DRudder の上下方向移動・ヨー回転制御の課題を解決できた可能性が示唆された。

また図 5 と 11, 図 8 と 14 を比較すると、 Fp^2 よりも FUS のタスク所要時間や総並進移動距離が減少し、複数運動自由度の同時制御時間割合が増加している傾向が見られた。この結果から、FUS が Fp^2 よりも効率的な移動制御を実現できた可能性が示唆された。しかし、本実験と 4.4 の実験では参加者数や制御運動自由度が異なるため断言できない。

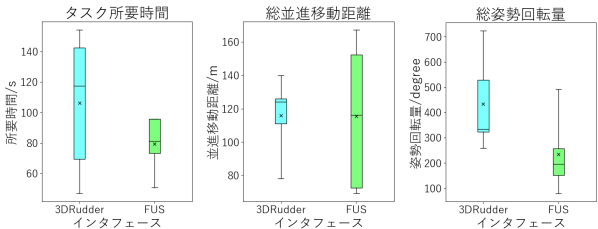


図 11: タスクパフォーマンス結果

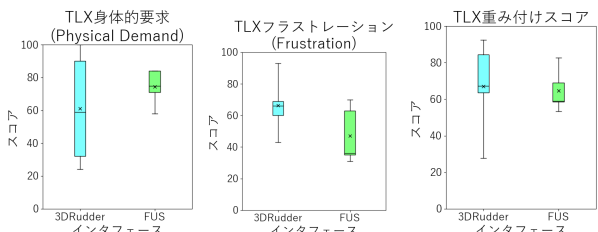


図 12: ユーザビリティ結果

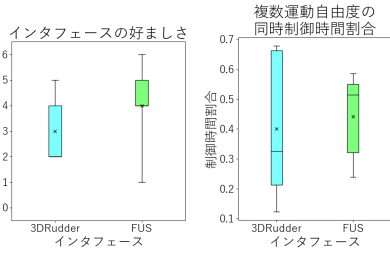


図 13: UX 結果

7. おわりに

本稿では両手・視点と独立した 6 自由度運動制御インタフェースの実現を目標に、足のみで 6 自由度運動制御を行う「 Fp^2 」の試作・評価を行った。結果、足動作・運動自由度の対応付けと、入力同士の干渉に課題があることが分かった。これらの解決のため、足、上半身、肩の動作を併用した 4 自由度運動制御インタフェース「FUS」を試作・評価した結果、3DRudder の課題を解決し、 Fp^2 よりも効率的な制御が実現できた可能性が示唆された。しかし、実験タスクが同時作業を強要するものでなかったほか、UX の評価指標が少なかったため、未だ不明瞭な部分もある。また実験参加者が少なく、FUS の有用性についても断言できない。今後、実験設計を改めて行った上で調査を続けていく。

参考文献

[1] A. M. Hashemian, A. Adhikari, I. A. Aguilar, E. Kruijff, M. v. d. Heyde and B. E. Riecke, "Leaning-Based Interfaces Improve Simultaneous Locomotion and Object Interaction in VR Compared to the Handheld Controller," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.30, no.8, pp.4665-4682, 2024.

[2] W. Chen, A. Plancoulaïne, N. Férey, D. Touraine, J. Nelson, and P. Bourdot, "6DoF navigation in virtual worlds: comparison of joystick-based and head-controlled paradigms," 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp.111-114, 2013.

[3] A. M. Hashemian, M. Lotfaliei, A. Adhikari, E. Kruijff and B. E. Riecke, "HeadJoystick: Improving Flying in VR Using a Novel Leaning-Based Interface," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.28, no.4, pp.1792-1809, 2022.

[4] 笠原 暢仁, 宮下 芳明, "手でカメラ操作し足で操縦するドローン UI", エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2022 論文集, pp.189-194, 2022.

[5] S. Kang, J. Jeong, G. A. Lee, S. H. Kim, H. J. Yang, and S. Kim, "The RayHand Navigation: A Virtual Navigation Method with Relative Position between Hand and Gaze-Ray," 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Article 634, pp.1-15, 2024.

[6] 芳賀 繁, 水上 直樹, "日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定", 人間工学, 1996, 32 巻, 2 号, pp.71-79, 2010.