

2025年度 卒業論文

論文題目

VR空間における自然な動作での飛行移動実現
のためのユーザーの自発的な動作の分析

指導教員
舟橋 健司 準教授

名古屋工業大学 工学部 創造工学教育課程 情報・社会コース
2022年度入学 34719027番

野村 麻衣

目次

第1章	はじめに	4
1.1	研究の背景	4
1.2	現状と課題	6
1.3	研究の目的	8
第2章	自発的な飛行動作の収集	9
2.1	動作の収集目的	9
2.2	動作収集の方法の概略	9
2.3	動作収集のための飛行タスク	10
2.3.1	収集する飛行動作	10
2.3.2	収集のための飛行タスク	11
2.4	収集のための環境及び装置	12
2.4.1	VRサブシステム	13
2.4.2	計測系	14
2.4.3	制御系	15
2.5	記録項目	15
2.6	動作収集方法の詳細	16
2.6.1	参加者の姿勢	17
2.6.2	事前説明	17
2.6.3	動作の収集手順	18
2.6.4	動作の収集	19
第3章	ユーザー自発動作の分析	23
3.1	分析の目的と前処理	23
3.2	各飛行ルートごとの身体動作の分析	23
3.2.1	上昇ルート：静止から上昇	24
3.2.2	上昇ルート：上昇から静止	24
3.2.3	下降ルート：静止から下降	25
3.2.4	下降ルート：下降から静止	25
3.2.5	右旋回ルート：静止から前進	26
3.2.6	右旋回ルート：前進から右旋回	27
3.2.7	右旋回ルート：右旋回から前進	27
3.2.8	右旋回ルート：前進から静止	28
3.2.9	左旋回ルート：静止から前進	28
3.2.10	左旋回ルート：前進から左旋回	29
3.2.11	左旋回ルート：左旋回から前進	29
3.2.12	左旋回ルート：前進から静止	30

3.3	全飛行ルートでの身体動作の分析	31
3.3.1	遷移前と遷移後の両方が共通する遷移	31
3.3.2	遷移前のみが共通する遷移	32
3.3.3	遷移後のみが共通する遷移	33
3.4	分析結果に基づく簡易飛行体験システム	34
第4章	むすび	37
	謝辞	38
	参考文献	39

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

古来より、人類は空を自由に飛び回ることには強い憧れを抱き続けてきた。17世紀以前には、タワージャンパーと呼ばれる人々が、自作の翼を腕や足に装着し、はばたきながら高所から飛び降りることで、鳥のような飛行を試みていた [1]。また、レオナルド・ダ・ヴィンチは、パイロットがレバーを押し引きすることで翼を操作する羽ばたき機の構想を残した。これらから、当時から人力による飛行への関心が存在していたことが分かる。18世紀に入ると、飛行を実現するためのアプローチは、人体による直接的な羽ばたきから、装置や機体に搭乗する航空機の開発へとその主眼を移し、多様な試行錯誤がされることとなった。18世紀末には、熱気の揚力を利用した気球による飛行が成功し、人類はついに空中へと上昇する手段を手にした。これにより、風に依存する形ではあるものの、空中を移動することが可能となった。さらに19世紀には、固定翼によって揚力を発生させるグライダーが登場し、人類は滑空という形で空中を移動する手段を獲得した。ただし、自力で高度を上昇させることはできず、飛行は重力や気流の影響を大きく受けるものであった。20世紀になると、グライダーにエンジンが搭載されることで動力飛行が実現され、人類は自ら推力を生み出しながら空中を移動する手段を獲得した。これに加えて、ピッチ・ヨー・ロールの三軸すべてにおける姿勢制御技術が確立されたことで、気流の影響を受けつつも飛行状態を維持・回復しながら、高度や飛行経路を意図的に選択できるようになり、空中移動の自由度は大きく向上した。さらに、ジェットエンジンの実用化により、高速・高高度での飛行や長距離移動が可能となった。

航空機による飛行は可能となったが、それらはコックピット内での機械操作を伴う飛行体験であり、自身の身体そのもので空中を移動する体験とは異なる。一方、ハンググライダーやスカイダイビングはより直接的に風や高度

を感じられる体験であり、自身の身体そのものという状況、あるいはそれに近い状況を感じられる体験である。しかしスカイダイビングは自由落下が中心の体験であり意のままに上昇や静止を行えない。ハンググライダーでは上昇気流を利用した上昇や、モーター付きのハンググライダーであれば動力による上昇も可能であるが、前者は自然の状況に左右されるためにやはり意のままに上昇や静止を行う飛行体験とは性質が異なる。後者は外部装置を制御する航空機による飛行体験であり、自身の身体そのものによる空中移動からかけ離れている。

生身で空を飛ぶという行為は、アニメ・映画・小説・漫画などの空想の物語や、ビデオゲーム等の世界では一般的な描写となっている。背中の翼や超常的な身体能力を駆使して空中を移動するキャラクターが数多く描かれ、人々はその擬似体験に強い魅力を感じてきた。例えば、小説・テレビアニメ・アニメ映画「ソードアート・オンライン」では、背部から生えた翅（はね）を自身の身体の一部として動かし、翅を羽ばたかせて急上昇したり、翅を広げて滑空したりして三次元空間を自由に動き回る描写 [2-4] がある。ここでは、本来人間に備わっていない翅を、仮想空間における自己身体の一部として利用した飛行が描かれている。また、アニメ映画「ハウルの動く城」では、魔法によって身体を浮遊させ地上での歩行と同じように空中を移動する描写 [5] がある。さらに、映画「スーパーマン」においては、跳躍に近い動作によって空中へ急上昇する描写や、片手を前に突き出して体を水平にした状態で空中を高速移動する描写 [6] がある。映画「シン・ウルトラマン」では、両手を真上に突き上げて上空へ急上昇したり、仰向けの状態で浮遊し相手を攻撃したりする描写 [7] がある。漫画・アニメ「ドラゴンボール」では、身ひとつでの空中の移動や戦闘が描かれており、前傾あるいは水平姿勢での空中の高速移動や、任意の姿勢で空中に静止する様子 [8,9] も見られる。ゲーム「原神」では、直立に近い姿勢を保ったまま、身体の大きな傾きや明確な推進動作を伴わずに、空中を水平あるいは垂直方向へ移動することが可能なキャラクターが [10] 存在する。このような描写は、飛行において必ずしも大きな身体運動を必要とせず、姿勢変化を最小限に抑えた移動様式であっても飛行体験が成立し得ることを示している。以上の例以外にも、多様な作品において空中を移動するキャラクターが描かれている。本研究で参照した作品においては、飛行開始

時には跳躍に近い身体動作が、飛行中には水平あるいは前傾姿勢が、空中停止時には直立姿勢が用いられるといった、飛行の各局面に応じた姿勢表現が共通して見られる。

これらの作品では、身体動作や姿勢に基づいて直感的な飛行が表現されている一方で、その多くは重力や慣性といった現実の物理法則を超越したものであり、現実の物理空間において同様の体験を再現することは不可能である。近年、そのような現実では不可能な体験を実現する手段として、VRを用いた飛行体験の研究 [11–13] が行われている。VR空間における飛行体験は、物理的危険性が低い、かつ身体能力や資格に依存しないだけでなく、物理法則に縛られない自由な移動を実現できる。

1.2 現状と課題

VR空間における飛行体験を実現するために、これまで多くの研究やコンテンツ開発が行われてきた。例えば、体験者の身体を物理的に吊り下げることによって、空中での身体挙動を模擬する手法が挙げられる。Eidenbergerらは、 $3 \times 3 \times 3\text{m}$ の鉄骨構造と機械的なシステムを用いて身体を吊り下げ、パラシュート降下時の触覚・力覚フィードバックを提示するシステム [11] を開発した。また、特殊な環境を利用するアプローチとして、小林らは流水プールと水中HMDを用いた手法を提案している。これは水中の浮力による浮遊感と、水流による速度感を組み合わせることで飛行感覚を提示するもの [12] である。さらに、着座姿勢における足裏の感覚に着目した研究もある。伴らは、VR空間での離着陸に合わせて足元の床面を物理的に昇降させる装置を開発し、足裏の接地・非接地を切り替えることで、着座状態での浮遊感を向上させる手法 [13] を提案した。これらは前庭感覚や体性感覚へのフィードバックを与えることで高い臨場感を実現するが、大掛かりな専用設備を要するため、一般家庭への導入や日常的な利用は困難である。

一方、現在普及しているMeta Quest等のスタンドアロン型HMDを用いたVRゲームでは、特定の設定に基づいた移動手法が採用されている。「Marvel's Iron Man VR」では、手部に仮想的な推進器を備えることで、ハンドコントローラの物理的な角度とトリガー操作を同期させることで移動を制御する。一方

で、「Eagle Flight」では、鳥の飛翔を模倣することで、頭部の傾きを旋回や高度変更の入力として割り当てている。これらは特別な設備を必要としないため手軽である。しかし、これらの飛行操作は開発者が設計した操作体系に基づくものであり、ユーザが直感的に想起する身体動作に基づいて設計されたとは限らない。そのため、ユーザが直感的に抱く飛ぶための身体イメージと、システムが要求する操作との間に乖離が生じる場合がある。この乖離は、VR空間への没入感を損なうだけでなく、操作習熟への学習コストを高める要因となる場合がある。

ところで、デバイスを介した意図入力の新たな形態として、脳波や筋電位などの生体信号を用いて、外部機器や身体拡張デバイスを制御する研究も盛んに行われている。例えば、CNNを用いた脳波分類により、生来の手と第3の手を独立して制御することを目指した研究がある [14]。この研究では、実際に手を動かす「実手」の脳波と、動作をイメージするだけの「付加手（ロボットアーム）」や「想像手（生来の右手を握る動作を想像するが、実際には握らない）」の脳波を高い精度で識別できる可能性を示しており、将来的な身体拡張デバイスの多自由度操作に向けた基礎的な知見を提供している。筋肉から発生する電気信号を利用する研究も進んでいる。例えば、ヒトの神経・筋制御系の仕組みを模倣することで、より自然な操作感を持つ筋電義手の制御方式が提案された [15]。この研究では、筋電信号の処理に最適なフィルタを設計するとともに、筋肉の収縮力に応じて指の柔軟性を自動的に調節する機能を実装した。これにより、外力に対してヒトの手のように柔軟に反応し、壊れやすい物体を扱うような高度かつ繊細な作業を可能にする制御手法を確立した。こうした知見を応用すれば、VR空間内における飛行動作を、特定のコントローラ操作ではなく、自身の脳波や筋肉の活動によって直接的に実現できる可能性がある。しかし、これらの手法は高精度な生体信号計測のための特殊な機材や、電極の装着といった煩雑な前準備を必要とする。そのため、前述した物理的な大型設備と同様に、一般家庭への導入や日常的な利用は困難である。

1.3 研究の目的

本研究では最終的には、現実では物理的に不可能な外部装置を使わない生身の身体での意のままな飛行移動を、VR で体験できるシステムを作りたい。それも、一般家庭で日常的に体験できるように HMD や Web カメラ程度の最小限の構成で、身体動作をベースとする体験システムを実現したい。誰もが、飛びたいと意図した際に自然と発現する身体動作により飛行移動できれば、体験システムのユーザーは直感的に飛行移動でき、VR 空間への没入感も高まるだろう。しかし、自由な発想に基づく VR 空間での空中移動において、人々がどのような身体の使い方をするのか、またそこに個人を超えた共通性が存在するのか、明らかにされていない。

そこで本研究ではまず、飛行のための外部装置を使わない、空想の物語やゲームなどに登場するような生身の身体ひとつでの飛行移動をユーザーに自由に想像してもらい、その発想に基づく身体動作を抽出する。具体的には VR 環境下で、参加者に特定の動作を指示せずに空中移動タスクを課し、その空中移動の際に現れる身体動作を収集する。複数の参加者から身体動作を収集して分類することで、共通する直感的な飛行移動のための身体動作を抽出する。この飛行のための動作に基づき、誰もが意のままに飛行できる、ひいては没入感の高い VR 飛行移動システムを実現する。

第2章 自発的な飛行動作の収集

2.1 動作の収集目的

多くのユーザーを対象にした VR 空間における直感的な飛行移動体験システムを設計するためには、ユーザーに共通して想起される飛行のための身体動作を把握する必要がある。しかし、ユーザーが飛行移動に対してどのような動作を想定し、想起するか、十分に明らかにされていない。そこで、例えば腕を伸ばす、屈伸するなどの、ユーザーの自由な発想に基づく身体各部の動作（身体動作）を抽出したい。そのためには、上昇、旋回などの飛行に関連する動作（飛行動作）を分析する必要がある。身体動作の共通性に関する分析を行う前段階として、まずユーザーが想起する飛行のための飛行動作を収集する必要がある。そこで、多くのユーザーの自由な発想に基づく飛行動作から、共通する身体動作のパターンを抽出するための、分析のためのデータを収集する。本章では、その身体動作抽出のための飛行動作の収集について述べる。

2.2 動作収集の方法の概略

ユーザーの自由な発想に基づく身体動作からなる飛行動作を制限なく収集するため、特定の動作体系を収集のためのシステム側で規定したくない。そこで、Wizard of Oz 法（WoZ 法）[16]により、ユーザーにとっては自身の身体動作で VR 空間内での挙動が決定されていると感じられるようにシステムは振る舞いながら、しかし実際には調査のために動作収集する実施者が一部、あるいは全部の挙動を決定する。具体的には、実施者が目視でユーザーの動作やその測定値を確認して手元のコントローラで移動の開始トリガーを入力することで、ユーザーの動作のタイミングに合わせてユーザーの VR 空間内の移動を開始させる。WoZ 法では、実際には実施者が関与していることを参加者に事前に周知しないこともあるが、本調査における WoZ 法は、ユーザーの意

図したタイミングに合わせて実施者がシステムを動かすことを事前に周知した上で行う、「透明性のある WoZ 法」である。WoZ 法により、実施者は技術的な実装の制約を排除することができ、ユーザー側はおおよそ意図した通りのタイミングでタスクを遂行できる。

2.3 動作収集のための飛行タスク

ユーザーが 3 次元空間内を自在に移動できる VR 飛行移動システムを実現したい。自在に移動できる、すなわち 3 次元空間内の任意の地点へ到達できる必要がある。そこでまず、任意の移動を可能にするような上昇、旋回などの収集すべき飛行動作を選定する。ところで、本来、摩擦や重力が存在する物理環境下での移動動作では、運動状態を維持（動作を継続）するために能動的なエネルギーの供給が必要である。例えば歩行は、静止状態から最初の踏み出しによって運動状態へと移行し、その後は同様の身体運動を反復・維持することで成立する。VR 空間における移動もまた、一度の合図で完結する離散的な操作ではなく、特定の運動状態を維持し続ける連続的な動作として捉えられる。一方で再び歩行に例えれば、停止状態から歩行状態、歩行状態から走行状態へと変化する場合、各状態間の切り替わり（遷移）と各状態の維持の連続と捉えることもできる。そこで、ユーザがある状態（停止や前進）から異なる状態へ遷移させようとする動作に注目して動作を選定する。続いて状態を遷移させる動作を収集するための飛行タスクを設定する。

2.3.1 収集する飛行動作

3 次元空間内での自由な移動とは、3 自由度の並進移動と 3 自由度の回転移動と考えることができる。しかし、歩行時を例に考えれば、真横に歩く（カニ歩き）ことは可能でも普段はしないだろう。前進後、停止して方向だけを換え（回れ右）、再び前進することもないだろう。歩行では上下方向の移動は階段などを除けば不可能であり 3 次元空間内での移動と単純に同一視できないかもしれない。ヘリコプターであれば空中で停止し、方向だけを変えることも可能であり、また真横へ飛行することも可能である。しかし救難などの特殊業務時や狭い場所での離着陸などを除けば、一般には飛行機のような

な移動をするのが常である。真に自由に移動できる必要がある状況も想定することが可能だが、一方で、任意の地点への到達可能性に限定することもあり得るだろう。そこで、1章の空想の物語などでの飛行の描写も考慮して、以下に限定する飛行動作要素にのみ着目し、収集する。

- 前進およびその制動としての停止
後退は考慮しない、停止動作は以下の動作にも関連する
- 上昇および下降
前進要素を含む斜め移動に限定する、鉛直移動は考慮しない
- 左旋回および右旋回
位置移動を伴わない回転は考慮せず、前進要素を含む円運動とする

2.3.2 収集のための飛行タスク

前述の動作要素において、ユーザーが運動状態を変更させる際の状態遷移に着目し、その境界となる動作をを観察、収集するため、以下の4種類の飛行タスクを設定する。全てのタスクにおいて、参加者はVR空間内に設定されたスタート地点から出発して決められたルートを飛行する（図2.1）。スタートは地面や床の上で足をつけている状態からではなく空中浮遊状態から行う。図2.2のように、飛行ルート上には一定間隔でリング状のオブジェクトが配置されており、参加者はそのリングの中を順に通り返けるように移動する。また、図2.3のように、各タスクのゴール地点には円柱状のオブジェクトが配置されている。スタートと同様にゴールも地面や床の上に足をつけているのではなく空中で浮遊したままである。

上昇ルート : スタート地点から前方斜め上へ直線的に移動し、ゴール地点で停止する。静止状態から上昇状態への遷移、上昇状態から静止状態への遷移の動作を収集する。

下降ルート : スタート地点から前方斜め下へ直線的に移動し、ゴール地点で停止する。静止状態から下降状態への遷移、下降状態から静止状態への遷移の動作を収集する。

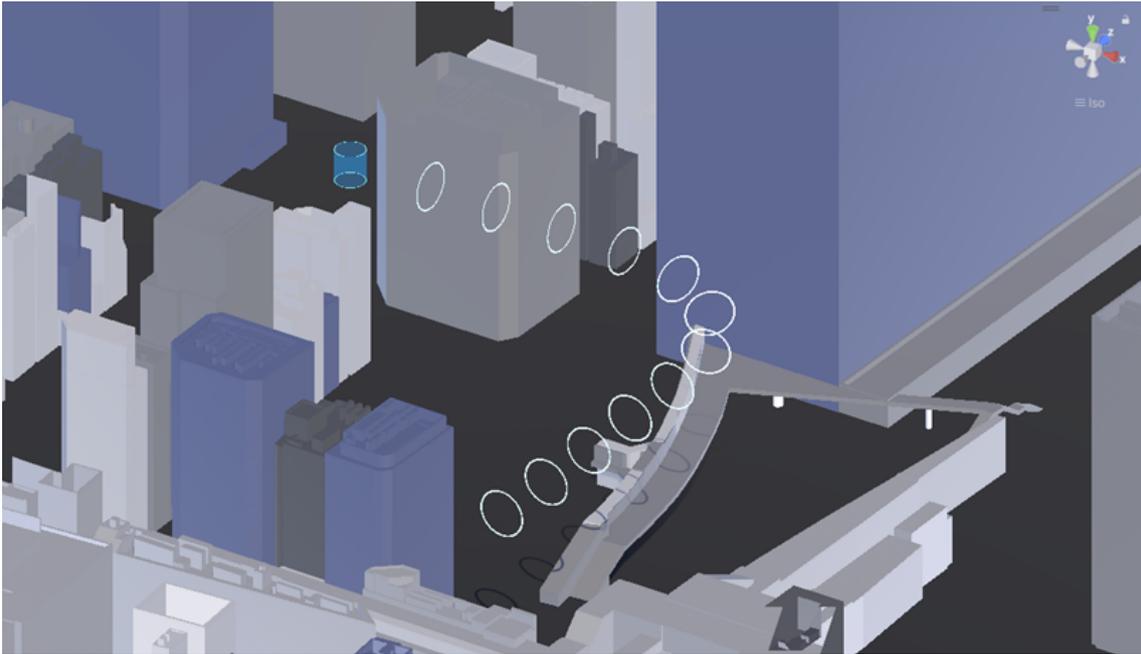


図 2.1: 飛行ルート of 例

左旋回ルート: スタート地点から前方に水平に移動したのち左へ 90 度旋回（半径 20m 程度を想定）し、旋回終了後に再度前方に移動してゴール地点で停止する。静止状態から前進状態への遷移、前進状態から左旋回状態への遷移、左旋回状態から前進状態への遷移、前進状態から静止状態への遷移の動作を収集する。

右旋回ルート: スタート地点から前方に水平に移動したのち右へ 90 度旋回（半径 20m 程度を想定）し、旋回終了後に再度前方に移動してゴール地点で停止する。静止状態から前進状態への遷移、前進状態から右旋回状態への遷移、右旋回状態から前進状態への遷移、前進状態から静止状態への遷移の動作を収集する。

2.4 収集のための環境及び装置

動作収集のためのシステムを、VR サブシステム、計測系、制御系により構成する。VR サブシステムでは、参加者の視線移動（頭部の回転）に応じて視覚刺激を提示する。視覚刺激により風景や、風景から得られる位置情報、さらにはその変化としての移動感覚を提示する。計測系では、参加者の身体動

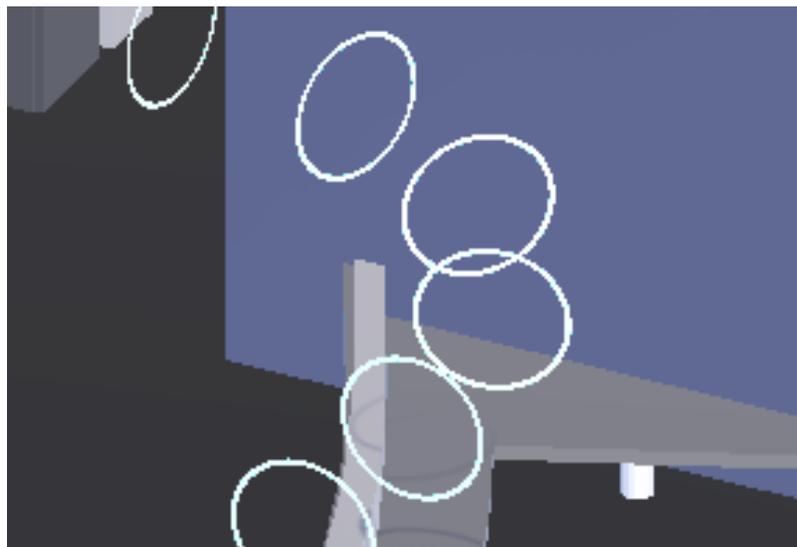


図 2.2: 飛行ルート上のリング状のオブジェクト

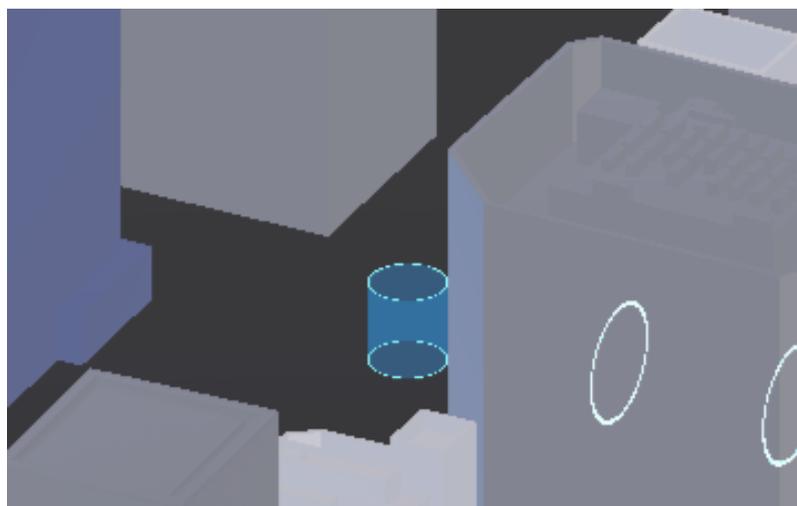


図 2.3: ゴール地点の円柱状のオブジェクト

作を、各部の位置や角度として定量的に取得する。制御系では、調査実施者が WoZ 法で制御するための移動トリガーを入力する。

2.4.1 VR サブシステム

VR 映像の提示には、ヘッドマウントディスプレイである Meta Quest 3 を使用する。VR 空間はゲームエンジン Unity を用いて構築し、Steam VR で提示した。リアルな都市空間を提示することで、具体的な飛行の距離感やスケール感をユーザーに想起させることを意図して、国土交通省が主導する Project PLATEAU の 3D 都市モデルの秋葉原駅周辺エリア（図 2.4）を飛行環境として

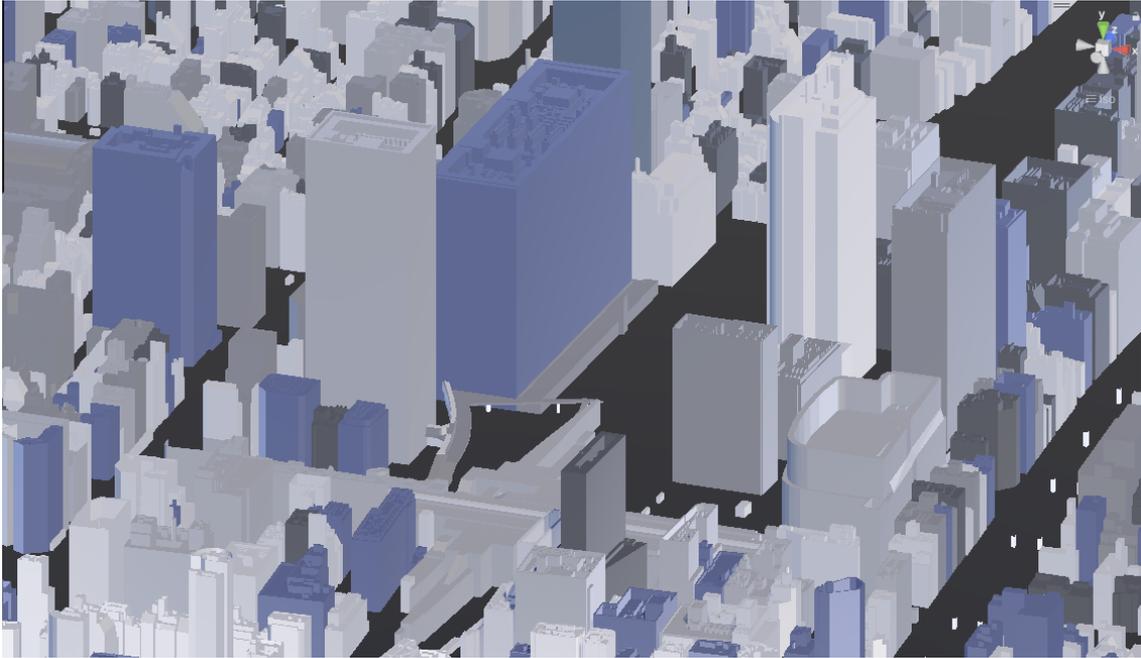


図 2.4: Unity に実装した Project PLATEAU の秋葉原エリア

提示する。なお VR 空間での正面は常に進行方向に設定する。その上で実空間での正面に対する視線方向、すなわち左右への頭部回転に従い VR 空間での風景を提示する。VR 空間内での参加者のアバターを、実空間での参加者の姿勢と同じ姿勢で描画すると、基本的に直立に近い姿勢になってしまう。仮に身体を水平にした状態での飛行を想定しても、実空間で身体を水平にすることは困難だろう。そこで、ユーザー自身の身体の描画は行わない。

2.4.2 計測系

HMD による頭部トラッキングに加え、2 台の Web カメラ (Logicool C270n) によりユーザーの身体動作を計測する。カメラはユーザーの正面に左右に並べて配置し、ステレオカメラ構成とする (図 2.5)。撮影された映像から Google の MediaPipe [17] を用いて骨格推定を行い、2 台のカメラ映像を利用した三角測量により深度情報を補正することで、単眼カメラよりも高精度な 3 次元座標データとして身体特徴点を取得する。カメラと参加者の距離は約 2.5m とする。



図 2.5: 2 台の Web カメラ (Logicool C270n)

2.4.3 制御系

ユーザーが飛行をスタートするかのような動作に合わせて実施者が手元のコントローラで移動の開始トリガーを入力することで、ユーザーの VR 空間内の飛行移動を開始させる。実施者は参加者の動作開始の動作がよく見える位置で操作する。飛行開始後は、あらかじめ設定されたルートに沿って指定された速度で自動的に飛行する。この際、移動速度は一定（時速約 15km）とするが、移動開始時および停止前には速度が滑らかに変化するように制御し、急激な加減速を抑制する。ゴール付近に接近すると徐々に減速し、ゴールの位置で完全に静止する。

2.5 記録項目

本調査では、ユーザーの身体動作およびその意図を捉えるため、以下の 3 項目を記録する。そのうち参加者のインタビュー記録としての自己申告と、映像記録としての実施者の観察を主に分析に利用する。頭部、身体をトラッキングした実測データは分析結果の妥当性の検証、および体験システムシステム実装時の入力トリガーを検討に利用する。

- インタビュー記録

収集システムによる飛行体験後に、参加者が抱く飛行イメージおよび動作の意図と、それに伴う具体的な身体の動かし方を直接把握するための

主要なデータとして記録する。飛行イメージとは、参加者が飛行動作を行う際、その抛り所としたイメージを指す。例えば「鳥のように羽を広げる」「超能力で浮遊する」など、どのような存在になりきって身体を動かしたのか特定する。動作の意図とは、「なぜその動きをすれば、その飛行状態になるのか」という参加者独自の解釈を指す。例えば、停止の際に「手のひらを広げて空気抵抗を大きくして止まる」、「手のひらからジェットを前に噴射して止まる」といった、イメージに基づき参加者が独自に定義した動作の理屈を把握する。具体的な体の動かし方とは、参加者が自己申告した、動作に使用した部位とその動かし方を指す。例えば、「腕を前方に突き出す」、「胴体を前に傾ける」といった、本人による説明に基づく使用部位やその動かし方を理解する。

- 記録映像

収集システムによる飛行体験中に、インタビューでは言語化が困難な無意識の動作や、身体運動の空間的な広がりや第三者の視点から補完するために記録する。外部カメラを用いて参加者の全景を撮影し、インタビューでの自己申告内容と実際の挙動を照らし合わせることで、発話内容と身体動作の整合性の確認を目的とする。また、手足の細かな軌道や、動作に伴う姿勢の変化など、数値データだけでは読み取りにくい定性的な特徴を抽出するための資料として活用する。

- 頭部・身体トラッキングデータ

収集システムによる飛行体験中に、HMD およびステレオカメラを用いて計測された、頭部および上半身の各部位における 3次元座標の時系列データを記録する。これらのデータは、観察によって得られた知見を数値的観点から裏付け、分析の客観性を高めるための根拠として活用する。また、身体動作をベースとする飛行体験システム構築時の飛行動作遷移のトリガーの参考にする。

2.6 動作収集方法の詳細

動作収集では、参加者に着座した状態で飛行体験してもらった。実際の収集前に参加者に事前説明をした。その後、実際に飛行体験してもらい、動

作を収集した。

2.6.1 参加者の姿勢

回転式オフィスチェアに着座した状態で動作収集した。広い空間が確保された大規模な VR システムではなく、一般家庭で日常的に利用できるような VR 飛行移動体験システムを想定した場合、限られたスペースで実現する必要がある。そこで着座状態に限定し、VR 空間での飛行移動を主に上半身や腕の動作により行うことを想定した。

2.6.2 事前説明

実際の動作収集の前に、HMD を装着していない状態の参加者に対し、実験の全体像と手順について以下の説明を行った。

- タスクの説明

まず、あらかじめ設定されたルートに沿って HMD の映像が変化し、あたかも自身が飛行しているかのような景色が提示されることを伝えた。その上で、実行すべきタスクは配置されたリングの中を通り抜けるように飛行移動を行い、ゴール地点の円柱の中で停止することであると説明した。

- 動作の指示

あたかも自身が飛行しているかのように提示される景色に合わせて、しかし「もし自分が自由に飛行移動できるなら、どのような体の動きで飛行を開始し、移動し、空中で停止するか」想像してもらい、そのイメージに合わせて自由に体を動かすよう求めた。提示される景色から感じられる加速、減速に合わせて、自身も加減速をするように動作を調整し、ゴールの円柱に到達したタイミングで停止動作を完了させてもらった。なお、操作方法については特定のジェスチャーの強制につながるような説明は行わなかった。着座状態での飛行ではあるが、ユーザーの自然な発想を妨げないため、「上半身のみを使ってください」といった身体部位の制限も行わなかった。分析対象外である下半身の動作が自然発生的に

現れる可能性も排除せず、そのような動作が見られた場合は観察記録として定性的に扱った。

- システムの説明

移動開始のタイミングは、参加者が移動を意図して起こした動作に合わせて、実施者が操作を行うことを伝えた。また、一度移動が開始されたら、停止ポイントに到達するまでは止まらないことを伝えた。なお、体調不良などの事情においてはその限りでないことも伝えた。

- 安全上の注意事項

実験中の安全確保のため、実験中は椅子から立ち上がらないように指示した。また、VR 酔い等で途中で気分が悪くなった場合は、直ちに中止するため速やかに申し出るように伝えた。

2.6.3 動作の収集手順

事前説明の後、前述の 4 つのルートを飛行するタスクをランダムに割り当てて、以下の手順で各ルートでの動作を収集した。

1. 練習：違和感のない動作の探索

HMD を装着した参加者に対し、VR 映像の挙動と合致する飛行動作の練習、探索を求めた。参加者は、自身の動作と映像の動きとの間に違和感がないか確認し、違和感がある場合は練習、探索を繰り返して動作の修正を行った。また、実施者は参加者の意見を聞きながら、参加者の飛行開始動作に合わせた飛行開始の操作タイミングを調整した。参加者が VR 映像の挙動に対して違和感のない動作を見つけるまで、かつ実施者が参加者に合わせた飛行開始の操作タイミングを見つけるまで練習を続けた。

2. 本試行：データ収集

参加者に、練習により見つけた違和感のない動作により実際に飛行してもらった。参加者が違和感なく自身の意図通りに飛行できた場合をタスク達成と判定し、そのデータを記録した。3 回タスク達成するまで同じルートを飛行してもらった。これを 1 試行とし、すなわち 1 人の参加者

表 2.1: ある参加者の左旋回ルートにおける動作のインタビュー記録の例

	遷移の種類	動作
左旋回ルート	静止状態から前進状態	背筋は伸ばした状態で、上半身を前かがみにする。腕は後ろにのばす。
	前進状態から左旋回状態	上半身を左に曲げる。上半身よりも大きく、首を曲がりたい方向に曲げる。
	左旋回状態から前進状態	上半身と首を旋回前の状態まで戻す。
	前進状態から静止状態	上半身と腕を移動開始前の状態に戻す。

1つのルートに対して3つの飛行データを収集した。なお、試行の途中で動作を変更したくなった場合は、何度でも練習に戻ってもらった。

3. 事後インタビュー

各ルートのデータ収集終了後、HMDを外した状態で直前の動作に関するインタビューを行った。まず、自身で行った動作の根拠となった飛行イメージについて確認した。続いて、飛行移動において主に使用した身体部位とその動作について口頭で確認した。

2.6.4 動作の収集

前述のシステム、手順に従い、実際に動作を収集した。動作収集の様子を図 2.6 に示す。なお、計測対象は座位における上半身および大腿部付近までの動作とし、カメラ位置もそれに合わせて調整した。参加者は10人の大学生または大学院生だった。参加者1人あたり各飛行ルートを1試行ずつ、計4試行行ってもらった。1試行に3回分の飛行動作データが含まれる。全10人で合計40試行、120の動作データを収集した。図 2.7 に飛行の身体動作記録の例を示す。例えば左上は体のロール、ピッチ、ツイスト角の時系列変化を示している。点線は飛行時の速度であり、中央の橙色は旋回中を表す。表 2.1 に飛行のインタビュー記録の例を示す。左旋回ルートの飛行における、各状態間の遷移時の動作に対する参加者本人の説明である。図 2.8 には、映像記録の例を示す。左旋回を開始したところの様子である。



図 2.6: 動作収集の様子

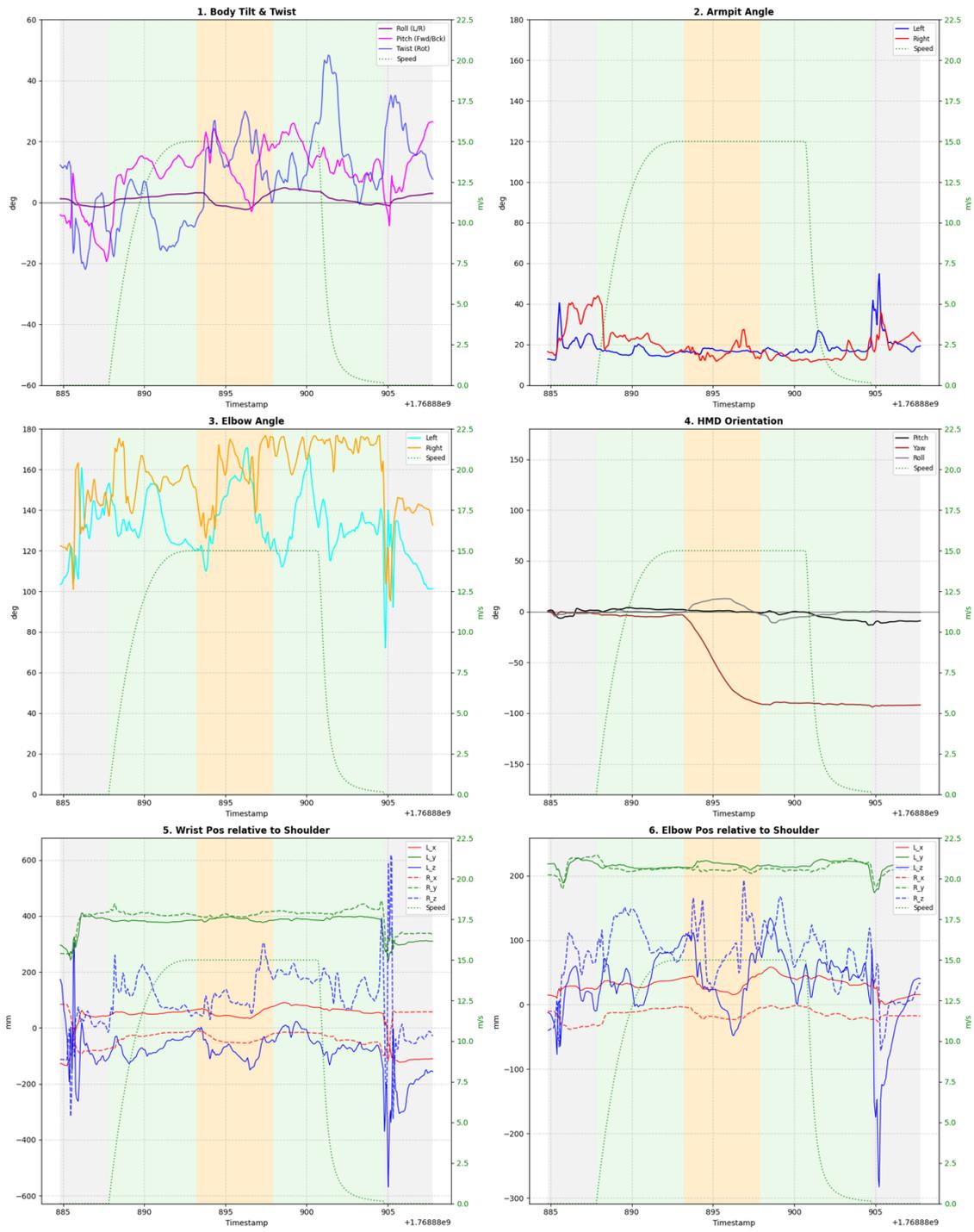


図 2.7: ある参加者の左旋回ルートにおける飛行の身体動作記録の例



図 2.8: 映像記録の例

第3章 ユーザー自発動作の分析

3.1 分析の目的と前処理

この分析の目的は、収集した動作について、複数の参加者に共通して見られる身体動作を明らかにすることである。そのため、収集した各参加者の身体動作を比較したい。しかし収集した身体動作は、参加者ごとに表現や動きの細部が異なっており、そのまま比較すると動作間の共通性を把握することが難しい。そこで、個々の動作を細部まで区別して比較するのではなく、複数の参加者間で比較可能となる粒度で動作を抽象化した上で、比較する前に分類したい。動作を分類するために、参加者が主に使用した身体部位と、その部位の動かし方に着目して整理した。具体的には、頭部、胴体、腕などの身体部位や、前後の動き、左右の動きなどの局所的な動作で整理した。例えば、「体の軸を前に少し倒した」や「上半身の重心を前に落とした」、「腕は後ろにのぼす」といった自己申告の収集データは、それぞれ「胴体、前方傾斜」と「胴体、前方重心」、それから「腕、後方伸長」のように整理した。その上で特徴が近いものを同一の表現として、トラッキングデータを参考にしつつ前者2つは「胴体を前に倒す」、3つ目は「腕を後ろに伸ばす」のように分類した。表現上は異なるが同一の動作意図を示していると解釈できるものについては、同一のカテゴリとして分類した。以上のように、収集した身体動作を整理・分類し、参加者間で比較可能な形にまとめた。

3.2 各飛行ルートごとの身体動作の分析

前述の分類を行ったのちに、各飛行ルートにおいて、移動や静止などの状態の遷移ごとの身体動作を分析した。各表に、各参加者ごとに分類された動作を示すとともに、複数の参加者に共通して見られる身体動作を色分けして、各飛行動作において頻出した身体部位の動作に着目し、参加者間に共通する動作の傾向を述べる。

3.2.1 上昇ルート：静止から上昇

表 3.1 に、上昇ルートにおいて静止状態から上昇状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。なお空欄は身体各部を顕著に動かさなかったことを示す。頭部については、参加者の 60 % が上方に向ける動作をした。胴体については、参加者の 70 % が前に倒す動作をした。腕については、参加者の 60 % が後ろに伸ばす動作をした。

表 3.1: 上昇ルート：静止から上昇

参加者番号	頭	胴体	腕
1	上に向ける	前に倒す	
2		前に倒す	進行方向に伸ばす
3	上に向ける		
4	上に向ける	前に倒す	後ろに伸ばす
5		前に倒す	後ろに伸ばす
6	上に向ける	前に倒す	
7	上に向ける		後ろに伸ばす
8		前に倒す	後ろに伸ばす
9	上に向ける		後ろに伸ばす
10		前に倒す	後ろに伸ばす

3.2.2 上昇ルート：上昇から静止

表 3.2 に、上昇ルートにおいて上昇状態から静止状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。頭部については、参加者の 60 % が正面に向けた。胴体については、参加者の 40 % が起こし、30 % が後ろに倒した。腕については、参加者の 30 % が広げ、20 % が胴体の側面に下ろした。

表 3.2: 上昇ルート：上昇から静止

参加者番号	頭	胴体	腕
1	正面に向ける	後ろに倒す	
2		後ろに倒す	肘を引く
3	正面に向ける		
4	正面に向ける	後ろに倒す	前に出す
5		起こす	胴体側面に下ろす
6	正面に向ける	起こす	
7	正面に向ける		広げる
8		起こす	広げる
9	正面に向ける		胴体側面に下ろす
10		起こす	広げる

3.2.3 下降ルート：静止から下降

表 3.3 に、下降ルートにおいて静止状態から下降状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。頭部については、参加者の 50 % がを下に向けた。胴体については、参加者の 80 % が前に倒した。腕については、参加者の 40 % が後ろに伸ばした。

表 3.3: 下降ルート：静止から下降

参加者番号	頭	胴体	腕
1	前に出す	前に倒す	
2		前に倒す	進行方向に伸ばす
3	下に向ける		
4		前に倒す	後ろに伸ばす
5		前に倒す	後ろに伸ばす
6	下に向ける	前に倒す	
7	下に向ける	前に倒す	後ろに伸ばす
8	下に向ける	前に倒す	
9	下に向ける	前に倒す	後ろに伸ばす
10		後ろに倒す	広げる

3.2.4 下降ルート：下降から静止

表 3.4 に、下降ルートにおいて下降状態から静止状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。頭部については、参加者の 60 % がを正面に

向けた。胴体については、参加者の40%が起こし、40%が後ろに倒した。腕については、参加者の30%が広げ、20%が胴体の側面に下ろした。

表 3.4: 下降ルート：下降から静止

参加者番号	頭	胴体	腕
1	正面に向ける	後ろに倒す	
2		後ろに倒す	後ろに引く
3	正面に向ける		
4		後ろに倒す	前に出す
5		起こす	胴体側面に下ろす
6	正面に向ける	起こす	
7	正面に向ける	起こす	広げる
8	正面に向ける	起こす	広げる
9	正面に向ける	後ろに倒す	胴体側面に下ろす
10		前に倒す	広げる

3.2.5 右旋回ルート：静止から前進

表 3.5 に、右旋回ルートにおいて静止状態から前進状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。胴体については、参加者の100%が前に倒す動作をした。腕については、参加者の50%が後ろに伸ばす動作をした。頭については顕著に動かさなかった参加者が多数であったが、積極的な動作ではないため以降では記述を省略する。

表 3.5: 右旋回ルート：静止から前進

参加者番号	頭	胴体	腕
1	進行方向に出す	前に倒す	
2		前に倒す	進行方向に伸ばす
3		前に倒す	
4		前に倒す	後ろに伸ばす
5		前に倒す	後ろに伸ばす
6		前に倒す	
7		前に倒す	後ろに伸ばす
8		前に倒す	広げる
9		前に倒す	後ろに伸ばす
10		前に倒す	後ろに伸ばす

3.2.6 右旋回ルート：前進から右旋回

表 3.6 に、右旋回ルートにおいて前進状態から右旋回状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。頭部については、参加者の 20 % が右に傾ける動作をした。胴体については、参加者の 80 % が右に傾け、20 % が右に捻る動作をした。

表 3.6: 右旋回ルート：前進から右旋回

参加者番号	頭	胴体	腕
1	右に傾ける	右に傾ける	
2		右に傾ける	
3		右に傾ける	
4		右に捻る	
5	右に傾ける	右に傾ける	
6		右に傾ける	
7		右に捻る	
8		右に傾ける	右手下げる、左手上げる
9		右に傾ける	
10		右に傾ける	

3.2.7 右旋回ルート：右旋回から前進

表 3.7 に、右旋回ルートにおいて右旋回状態から前進状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。なお「前の状態に戻す」とは、参加者ごとに別の動作であるが各参加者において直前の状態、例えば前進、旋回、再び前進した時の旋回から前進に注目している場合には、当初の前進の状態に戻したことを意味する。頭部については、参加者の 20 % が旋回前の状態に戻す動作をした。胴体については、参加者の 100 % が旋回前の状態に戻す動作をした。

表 3.7: 右旋回ルート：右旋回から前進

参加者番号	頭	胴体	腕
1	旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す	
2		旋回前の状態に戻す	
3		旋回前の状態に戻す	
4		旋回前の状態に戻す	
5	旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す	
6		旋回前の状態に戻す	
7		旋回前の状態に戻す	
8		旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す
9		旋回前の状態に戻す	
10		旋回前の状態に戻す	

3.2.8 右旋回ルート：前進から静止

表 3.8 に、右旋回ルートにおいて前進状態から静止状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。胴体については、参加者の 50 % が起こし、50 % が後ろに倒す動作をした。腕については、参加者の 20 % が前に出し、20 % が胴体側面に下ろし、20 % が広げる動作をした。

表 3.8: 右旋回ルート：前進から静止

参加者番号	頭	胴体	腕
1	起こす	後ろに倒す	
2		後ろに倒す	後ろに引く
3		起こす	
4		後ろに倒す	前に出す
5		起こす	胴体側面に下ろす
6		後ろに倒す	
7		起こす	広げる
8		起こす	胴体側面に下ろす
9		後ろに倒す	前に出す
10		起こす	広げる

3.2.9 左旋回ルート：静止から前進

表 3.9 に、右旋回ルートにおいて静止状態から前進状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。胴体については、参加者の 100 % が前に倒す動作をした。腕については、参加者の 50 % が後ろに伸ばす動作をした。

表 3.9: 左旋回ルート：静止から前進

参加者番号	頭	胴体	腕
1	進行方向に出す	前に倒す	
2		前に倒す	進行方向に伸ばす
3		前に倒す	
4		前に倒す	後ろに伸ばす
5		前に倒す	後ろに伸ばす
6		前に倒す	
7		前に倒す	後ろに伸ばす
8		前に倒す	広げる
9		前に倒す	後ろに伸ばす
10		前に倒す	後ろに伸ばす

3.2.10 左旋回ルート：前進から左旋回

表 3.10 に、左旋回ルートにおいて前進状態から左旋回状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。頭部については、参加者の 30 % が左に傾ける動作をした。胴体については、参加者の 80 % が左に傾け、20 % が左に捻る動作をした。

表 3.10: 左旋回ルート：前進から左旋回

参加者番号	頭	胴体	腕
1	左に傾ける	左に傾ける	
2		左に傾ける	
3		左に傾ける	
4		左に捻る	
5	左に傾ける	左に傾ける	
6		左に傾ける	
7		左に捻る	
8		左に傾ける	右手上げる、左手下げる
9	左に傾ける	左に傾ける	
10		左に傾ける	

3.2.11 左旋回ルート：左旋回から前進

表 3.11 に、左旋回ルートにおいて左旋回状態から前進状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。頭部については、参加者の 30 % が旋

回前の状態に戻す動作をした。胴体については、参加者の 100 % が旋回前の状態に戻す動作をした。

表 3.11: 左旋回ルート：左旋回から前進

参加者番号	頭	胴体	腕
1	旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す	
2		旋回前の状態に戻す	
3		旋回前の状態に戻す	
4		旋回前の状態に戻す	
5	旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す	
6		旋回前の状態に戻す	
7		旋回前の状態に戻す	
8		旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す
9	旋回前の状態に戻す	旋回前の状態に戻す	
10		旋回前の状態に戻す	

3.2.12 左旋回ルート：前進から静止

表 3.12 に、左旋回ルートにおいて前進状態から静止状態へ遷移する際の身体動作の分類結果を示し、分析する。胴体については、参加者の 50 % が後ろに倒し、50 % が起こす動作をした。腕については、参加者の 30 % が胴体側面に下ろし、20 % が広げる動作をした。

表 3.12: 左旋回ルート：前進から静止

参加者番号	頭	胴体	腕
1	正面に向ける	後ろに倒す	
2		後ろに倒す	後ろに引く
3		起こす	
4		後ろに倒す	前に出す
5		起こす	胴体側面に下ろす
6		後ろに倒す	
7		起こす	広げる
8		起こす	胴体側面に下ろす
9		後ろに倒す	胴体側面に下ろす
10		起こす	広げる

3.3 全飛行ルートでの身体動作の分析

各飛行ルートにおける状態遷移ごとの身体動作の分析結果をもとに、異なる飛行ルートでの共通する、あるいは類似する飛行動作を横断して共通する身体動作の傾向を分析した。具体的には、遷移の開始状態および終了状態に着目し、それらが共通する遷移同士をグループ化した上で、各グループにおいて参加者間に共通して見られる身体動作の傾向を分析する。

3.3.1 遷移前と遷移後の両方が共通する遷移

遷移前の状態および遷移後の状態の両方が共通する遷移同士を比較する。飛行ルートの旋回方向が異なる場合においても、身体動作に共通した傾向が見られるかどうか分析する。

静止状態から前進状態への遷移では、右旋回ルート、左旋回ルートいずれの旋回前の場合でも、胴体を前に倒す動作が全参加者に共通して見られた（表 3.13）。また、腕についても、後方へ伸ばす動作が半数の参加者で確認された。旋回ルートの左右の違いによらず、前進開始時には類似した身体動作が行われていた。

前進状態から静止状態への遷移においても、旋回ルートの左右の違いによらず、胴体を起こす、あるいは後方へ倒す動作が同程度の割合で見られた（表 3.14）。また、腕についても、胴体側面に下ろす、広げる動作が同程度の割合で見られた。旋回ルートの左右の違いによらず、移動を停止する際には類似した身体動作が用いられていた。

飛行ルートが異なっても、遷移前の状態および遷移後の状態の両方が共通する遷移の場合は、身体動作も共通していた。

表 3.13: 静止から前進への遷移

遷移	頭	胴体	腕
右旋回：静止から前進	－	前に倒す：100%	後ろに伸ばす：50%
左旋回：静止から前進	－	前に倒す：100%	後ろに伸ばす：50%

表 3.14: 前進から静止への遷移

遷移	頭	胴体	腕
右旋回：前進から静止	－	後ろに倒す：50% 起こす：50%	前に出す：20% 胴体側面に下ろす：20% 広げる：20%
左旋回：前進から静止	－	後ろに倒す：50% 起こす：50%	胴体側面に下ろす：30% 広げる：20%

3.3.2 遷移前のみが共通する遷移

遷移前の状態が共通する遷移同士を比較し、身体動作に共通した傾向が見られるかどうか分析する。

静止状態から各移動状態への遷移を比較した結果、上昇、下降、前進のいずれの遷移においても、胴体を前に倒し、腕を後方へ伸ばす動作が共通して用いられていた（表 3.15）。上昇、下降には前進も含まれているためと考えられる。ただし、頭部の向きについては、上昇時には上方、下降時には下方を向ける傾向があり、移動方向に応じて頭部の動きが使い分けられていた。

前進状態から旋回、あるいは静止へと遷移する場合には、遷移先の状態に応じた身体動作が見られた（表 3.16）。旋回への遷移では、旋回方向に対応して胴体を左右に傾ける、または捻る動作が多くの参加者に共通していた。静止への遷移では、胴体を起こす、あるいは後方へ倒す動作が行われていた。

遷移前の状態によらず、遷移後の状態が本質的に異なる場合には、身体動作も異なるようである。

表 3.15: 静止からの遷移

遷移	頭	胴体	腕
上昇：静止から上昇	上に向ける：60%	前に倒す：70%	後ろに伸ばす：60%
下降：静止から下降	下に向ける：50%	前に倒す：80%	後ろに伸ばす：40%
右旋回：静止から前進	－	前に倒す：100%	後ろに伸ばす：50%
左旋回：静止から前進	－	前に倒す：100%	後ろに伸ばす：50%

表 3.16: 前進からの遷移

遷移	頭	胴体	腕
右旋回：前進から右旋回	右に傾ける：20%	右に傾ける：80% 右に捻る：20%	—
左旋回：前進から左旋回	左に傾ける：30%	左に傾ける：80% 左に捻る：20%	—
右旋回：前進から静止	—	後ろに倒す：50% 起こす：50%	前に出す：20% 胴体側面に下ろす：20% 広げる：20%
左旋回：前進から静止	—	後ろに倒す：50% 起こす：50%	胴体側面に下ろす：30% 広げる：20%

3.3.3 遷移後のみが共通する遷移

遷移後の状態が共通する遷移同士を比較し、身体動作に共通した傾向が見られるかどうか分析する。

前進状態への遷移を比較すると、静止状態から前進する場合には、胴体を前に倒す動作が全参加者に共通して見られた（表 3.17）。一方、旋回状態から前進へ戻る場合には、胴体において「旋回前の状態に戻す」動作が全参加者で確認された。旋回ルートでの旋回前は前進状態であり、すなわち同様の動作であったと判断できる。

静止状態への遷移を比較した結果、上昇、下降、前進のいずれの遷移においても、胴体を起こす、あるいは後方へ倒す動作が一定の割合で見られた（表 3.18）。また、腕についても、胴体側面に下ろす、あるいは広げる動作が共通して確認された。状態遷移前の動作に関わらず、静止状態へ移行する際には類似した身体動作が選択される傾向があった。

遷移前の状態によらず、遷移後の状態が本質的に同じ場合には、身体動作も共通しているようである。

表 3.17: 前進への遷移

遷移	頭	胴体	腕
右旋回： 静止から前進	—	前に倒す：100%	後ろに伸ばす： 50%
左旋回： 静止から前進	—	前に倒す：100%	後ろに伸ばす： 50%
右旋回： 右旋回から前進	旋回前の状態に戻す： 20%	旋回前の状態に戻す： 100%	—
左旋回： 左旋回から前進	旋回前の状態に戻す： 30%	旋回前の状態に戻す： 100%	—

表 3.18: 静止への遷移

遷移	頭	胴体	腕
上昇から静止	正面向ける：60%	後ろに倒す：30% 起こす：40%	胴体側面に下ろす：20% 広げる：30%
下降から静止	正面向ける：60%	後ろに倒す：40% 起こす：40%	胴体側面に下ろす：20% 広げる：30%
右旋回：前進から静止	—	後ろに倒す：50% 起こす：50%	前に出す：20% 胴体側面に下ろす：20% 広げる：20%
左旋回：前進から静止	—	後ろに倒す：50% 起こす：50%	胴体側面に下ろす：30% 広げる：20%

3.4 分析結果に基づく簡易飛行体験システム

様々な飛行動作の状態遷移時における身体動作の分析結果をもとに、特定の状態へ移行する際に多くの参加者に共通して見られる身体各部の動作に着目し、これらの動作をその状態への遷移の条件とした簡易飛行体験システムを構築した。例えば、前進状態へ移行する際に見られた胴体の前傾動作に着目し、この動作を前進状態への遷移の条件とした。具体的には、カメラやHMDのトラッキングシステムにより取得した体験者の胴体の前傾姿勢が一定以上である場合には前進飛行する。数人の飛行体験参加者に体験してもらい（図3.1、図3.2）、動作時の印象について口頭で意見を得た。その結果、例えば前進を意図した動作を行うと、概ね適切なタイミングで前進できた、などの意見が得られた。しかし、自身の動作に対して遅れて前進が開始するよう感じられるという意見もあった。また、左右方向の身体動作に対して意図と異なる



図 3.1: 飛行体験参加者の体験中の様子

る反応をするなど、好ましくない挙動が生じる場合も確認された。分析、抽出した生身の身体での意のままな VR 飛行移動に関係する身体動作は、飛行状態の遷移の条件として利用可能であることが示唆された。一方で、遷移のタイミングや検出条件については、今後さらに検討・調整が必要であると考えられる。

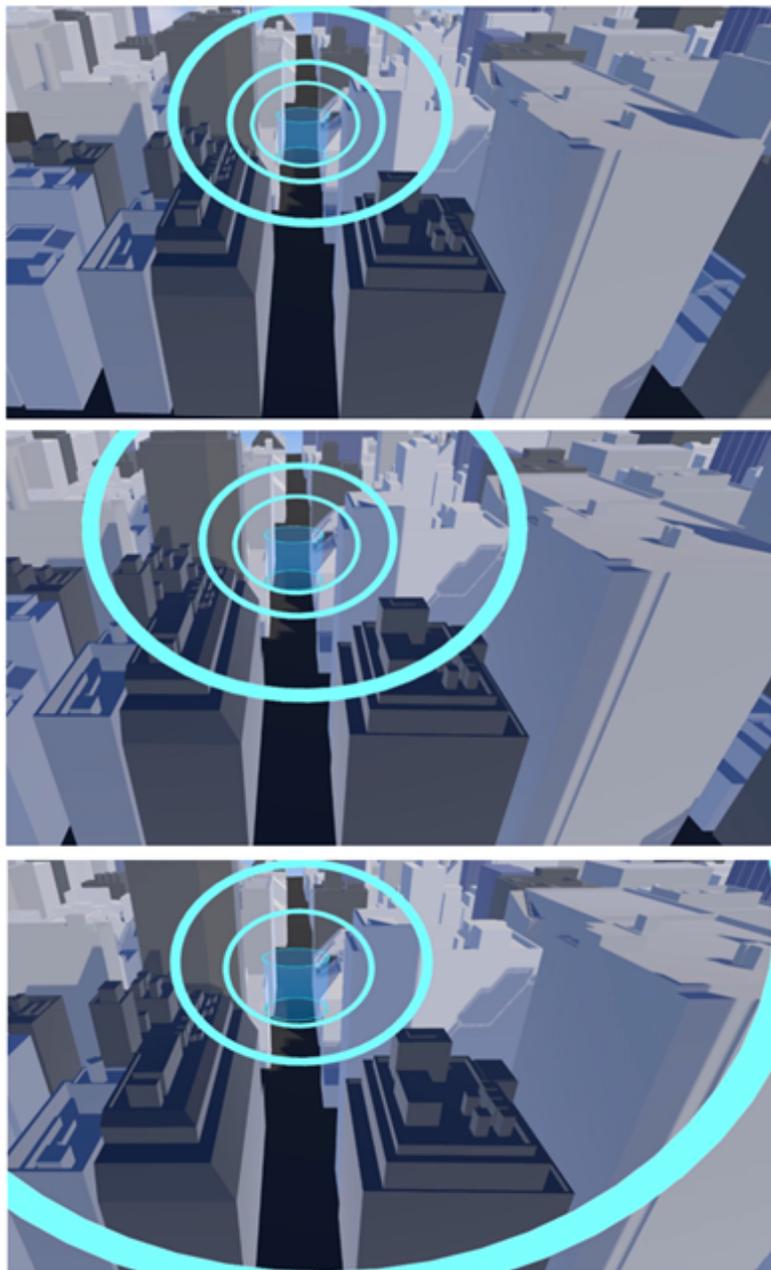


図 3.2: 飛行体験参加者が見る VR 映像の例（上から時系列順）

第4章 むすび

本研究では、外部装置を用いず、生身の身体だけで飛行移動を体験できるVRシステムを構築した。まず自由な発想に基づくVR空間での飛行移動において、参加者がどのような身体の使い方を行うのか明らかにし、個人を超えた共通の身体動作が存在するか検討した。具体的には、参加者に特定の操作方法を指示せず、自由に空中移動を行うタスクをVR環境で実施し、その際の身体動作を収集・分析した。分析の結果、各飛行形態ごとに、複数の参加者に身体動作の共通性、あるいは身体動作の傾向に一定の共通性が見られた。

本研究で得られた分析結果をもとに、HMDとWebカメラだけの構成で、飛びたいと意図した際の自由な発想に基づく身体動作によるVR飛行移動システムを簡易的に実装し、数名の体験者に試してもらった。その結果、例えば前進を意図した身体動作に対して概ね適切に前進が開始されるなど、本研究で抽出した身体動作は、飛行状態の遷移の条件として利用可能であることが示唆された。一方で、体験者の初期姿勢や身体動作の方向によっては、タイミングが遅れたり、意図しない挙動が生じたりする場合があることも確認された。

今後は、本研究で得られた知見をもとに、身体動作の検出方法をさらに検討し、より自然な身体動作でVR空間を飛行移動できるシステムの実装を目指す。

謝辞

本研究を進めるにあたって、日ごろから多大なご尽力をいただき、ご指導を受け賜りました名古屋工業大学、舟橋健司 准教授、伊藤宏隆 助教に心から感謝致します。最後に本研究に多大なご協力をいただきました舟橋研究室諸氏並びに評価参加者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] John D.Anderson Jr (織田剛訳). 「飛行技術の歴史」. 京都大学学術出版会. 2013.
- [2] 川原礫. 「ソードアート・オンライン3 フェアリィ・ダンス」 [小説]. アスキー・メディアワークス. 2009.
- [3] 伊藤智彦監督. 「ソードアート・オンライン」 [テレビアニメ]. A-1 Pictures. 2012.
- [4] 伊藤智彦監督. 「劇場版 ソードアート・オンライン オーディナル・スケール」 [アニメ映画]. A-1 Pictures. 2017.
- [5] 宮崎駿監督. 「ハウルの動く城」 [アニメ映画]. スタジオジブリ. 2004.
- [6] James Gunn 監督. 「SUPERMAN」 [映画]. DC Universe. 2025.
- [7] 樋口真嗣監督. 「シン・ウルトラマン」 [映画]. TOHO スタジオ, シネマバザール. 2022.
- [8] 鳥山明. 「ドラゴンボール」 [漫画]. 集英社.
- [9] 鳥山明 (原作) . 「ドラゴンボール超」 [テレビアニメ]. フジテレビ, 読売広告社, 東映アニメーション.
- [10] miHoYo (開発会社) 「原神」 [ビデオゲーム]. HoYoverse (販売会社) . 2020.
- [11] Horst Eidenberger and Annette Mossel. Indoor Skydiving in Immersive Virtual Reality with Embedded Storytelling. Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '15), pp. 9-12, 2015.
- [12] 小林 誠人. 流水プールと水中 VR を用いた飛行感覚の提示. 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, 2021.

-
- [13] 伴 祐樹, 吉田 健人, 宇治土公 雄介. 足底の接地・非接地制御による着座状態での VR 飛行体験の臨場感向上. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1B4-4, 2022.
- [14] 三島 大輝. BMI による第 3 の手制御実現のための CNN による脳波分類における精度の調査. 2023 年度 名古屋工業大学卒業論文, 2024.
- [15] 赤沢 堅造, 滝沢 文則, 林 義昭, 藤井 克彦. ヒトの運動制御機構を模擬した義手の制御方式および筋電位処理方式の開発, バイオメカニズム 9, pp. 43-53, 1988.
- [16] Minkyung Lee, Mark Billingham. A Wizard of Oz study for an AR multimodal interface. ICMI '08: Proceedings of the 10th international conference on Multimodal interfaces, pp. 249-256, 2008.
- [17] Google. MediaPipe. <https://developers.google.com/mediapipe> (最終アクセス 2026/02/05)