



## 半姿勢・半拘束型フルダイブの研究

清水比路<sup>1)</sup>, 真柄智輝<sup>1)</sup>, 脇田 航<sup>1)</sup>

Hiro SHIMIZU, Tomoki MAKARA, and Wataru WAKITA

1) 広島市立大学 (〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1, shimizu@vr.info.hiroshima-cu.ac.jp)

**概要:** 本研究ではフルダイブの実現に向けた半姿勢・半拘束型デバイスを提案する。具体的には全身のあらゆる姿勢の中間の姿勢(半姿勢)および関節自由度を多少残して拘束(半拘束)した状態において、身体動作や VR 空間内での接触に応じたアバタ姿勢を推定することにより、VR 空間内での身体動作や疑似触覚呈示等を定位置で可能にする。本論文では手始めに腰と足先を半拘束した状態において、足先を含む下半身の姿勢推定を行うことで、足の動作や立つ、しゃがむ動作を実現する。

**キーワード:** フルダイブ, 半姿勢, 半拘束, アバタ, 姿勢推定

### 1. はじめに

近年、メタバースという言葉とともに VR は身近なものになりつつある。また、フルダイブと呼ばれる五感情報を持ったまま VR 空間に入る技術が昨今の SF 作品では語られており、その実現が待たれている。このような技術は脳とマシン間の五感情報の入出力可能な BMI (ブレインマシンインタフェース) が手軽に実用可能となれば実現に近づくと考えられる。近年、微小電極アレイを脳に埋め込み、腕と手の運動意図を読み取ることでロボットアームを動作させ、ロボットアームの動作を一次体性感覚野への刺激として入力する双方向型 BMI が開発されており[1]、今後全身のアバタ制御や五感知覚へと拡張することが可能となればフルダイブの実現に近づくと考えられる。一方で、近年のメタバースのような等身大 VR においてはモーションキャプチャ技術によってユーザの身体動作に応じたアバタの姿勢を制御可能なシステムが主流になっている。

しかしながら、モーションキャプチャ技術には問題点がある。主な問題点として、実空間の制約によってユーザの身体動作に応じて VR 空間内で自由に動ける範囲に限りがある点と、様々な感覚呈示をシームレスに行えない点である。これらの問題により、広大な VR 空間を自由に歩き回りながら VR 空間のものに触れたり、乗り物に乗り込んだり、乗り物を操作したり等といった様々な感覚をシームレスに呈示することはできない。

前者の問題を解決する方法として、歩行デバイスの使用が挙げられる。歩行デバイスを使用することでユーザが現実空間の定位置に留まったまま VR 空間内を歩行することが可能になる。しかしながら、歩行装置を使用した状態では乗り物に座って乗り物を操作する感覚や寝転がるとい

った感覚をシームレスに呈示することはできない。現状の VR 技術においては、歩行デバイスや触力覚呈示デバイス、モーションベース等によって VR 空間を歩きまわったり、触った感覚や乗り物に乗った感覚を個々に呈示することは可能であるが、これらのデバイス間の連携は困難である。

このように、現状のデバイスによってモーションキャプチャの問題点を補い、フルダイブ技術に近づけることは困難であるため、モーションキャプチャに代わるユーザの身体動作を入力するための装置や様々なデバイスをシームレスに繋げるような手法が必要となる。

そこで本研究では、ユーザの全身をあらゆる姿勢の中間の姿勢(半姿勢)および各関節自由度を多少残せるような中間の硬さで拘束(半拘束)にした状態において、ユーザの身体動作に応じた力などの情報をセンサによって読み取り、読み取った値を入力として VR 空間のアバタを制御し、映像等によって触力覚や歩行感覚、搭乗感覚などを呈示可能な接地型のシステムを提案する。ユーザの身体を半拘束することでユーザは定位置からほとんど動かずアバタを制御できるため、モーションキャプチャの問題点であった空間的な制約が解決され、モーションベース等の他の感覚呈示装置との連携も容易くなる。また、ユーザの身体をあらゆる姿勢の半姿勢及び半拘束することで、例えばグーとパーの半姿勢で半拘束し、映像等によってそれぞれの状態を錯覚させる。手だけではなく、全身の身体動作と映像呈示等が組み合わせることで、様々な身体姿勢、身体を動かす感覚、触覚などの様々な感覚を呈示することが期待できると考える。本論文では手始めに腰と足先を半拘束した状態において、足先を含む下半身の姿勢推定を行うことで足の動作、立つ、しゃがむ動作を実現する。

## 2. 関連研究

### 2.1 ブレインマシンインタフェース

ブレインマシンインタフェース (BMI) は脳とマシンを繋ぎ、両者の間で信号を送受信することで、機械の操作や感覚を得ることができる技術である。BMI は侵襲型 BMI と非侵襲型 BMI に分けられる。侵襲型 BMI は頭蓋内電極を用いるため侵襲性があり、電極を刺入することにより炎症が起こる場合がある。しかしながら、高い精度があり、ロボットアームのリアルタイム制御などが可能になっている。非侵襲型 BMI は頭皮脳波などを用いることで脳への電極の刺入を行わない侵襲性のない BMI である。しかしながら、侵襲性 BMI より精度が劣る。現状 BMI によるフルダイブ実現は困難である。

### 2.2 大腿部支持型歩行装置

大腿部支持型歩行装置[2]は進行方向へ大腿部を支持することによって拘束されるため、実際に足が前に出ることはないが、歩行動作に応じた映像呈示によって歩行感覚を錯覚させる手法である。この装置は立位で歩行感覚を呈示可能だが、本研究ではこのシステムにおける大腿部支持部を全身に拡張し、立位ではなく半姿勢・半拘束状態において身体動作に応じた歩行感覚や立位・座位等の様々な姿勢や触知覚や搭乗感覚等の様々な感覚を呈示する。

### 2.3 モーションベース

モーションベース[3]はユーザに前庭感覚、体性感覚を呈示する装置として用いられる。座席を様々な方向へ動作させることでユーザに乗り物に搭乗している感覚を呈示できるが、座った状態で立って歩く感覚を呈示することは困難である。

本研究では、モーションベースを座位ではなく半拘束・半姿勢で使用することで、搭乗感覚だけでなく、歩行感覚や触知覚などの様々な感覚を呈示可能にする。

### 2.4 Pseudo-haptics

Pseudo-haptics は視覚からの情報が体性感覚に影響を与える現象である。この現象によって、ユーザの実際の身体の位置からずらした身体の位置を映像呈示することで疑似的な触力覚を呈示することができる。しかしながら、ユーザの身体の位置から視覚呈示する身体の位置をずらすほど違和感が増大し、Pseudo-haptics の効果が薄れてしまう。そのため、ユーザの違和感を減少させるには VR 空間上のアバタの身体の位置を実際のユーザの身体位置と大きくずらさないことが必要となる。このため、アバタの関節角を補正し、関節毎のずれを減少させることで違和感を低減する手法も提案されている[4]。

本研究では、ユーザの身体を半姿勢で半拘束した状態における身体動作等に応じてアバタ姿勢を推定していくため、従来手法のような位置入力ではなく力を入力として Pseudo-haptics を生起させる。また、Pseudo-haptics だけでなく、振動等による力触覚呈示やモーションベース等との組み合わせによる揺動感や慣性力といった搭乗感呈示等も行っていく。

## 3. システム概要

### 3.1 目標となる提案システム

図 1 に目標となる提案システムの概要図を示す。

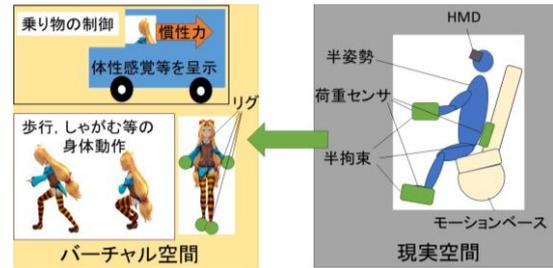


図 1: 提案システムの概要図

提案システムではユーザの身体が拘束された状態において Pseudo-haptics やアバタの身体動作呈示を錯覚しやすくするため、ユーザの姿勢をあらゆる姿勢の中間状態 (半姿勢) とし、なるべく拘束される部分が少なくて済むよう、足先 (スリッパ型デバイス)、手先 (グローブ型デバイス)、腰 (イス型デバイス) の 3 点を動かさないように完全に拘束するのではなく、ある程度自由度を残した状態、すなわち、硬いと柔らかいとの中間となるように拘束 (半拘束) する。足先、手先、腰部分にかかる力と HMD の動きをセンサによって読み取り、対応するアバタの身体部位のリグを制御することで、IK によってアバタ姿勢を制御する。また、制御したアバタの視点をユーザの HMD に出力することで映像呈示を行い、モーションベース等の他の感覚呈示装置と組み合わせることで、Pseudo-haptics だけでは生起困難な感覚呈示や歩行感覚、搭乗感覚等の呈示も行っていく。

半姿勢・半拘束状態でユーザが思い通りにアバタを制御することが可能になれば、身体動作と映像その他の感覚呈示によって、高臨場な体験が可能になることが期待できる。

### 3.2 現状のシステム

図 2 は、本論文で現状実装を行ったシステムの概要図である。

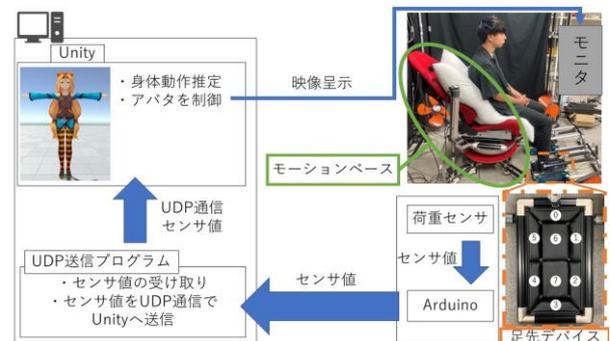


図 2: システム概要図

本システムではユーザの身体を立位としやがんだ姿勢の半姿勢で半拘束する。そのため、ユーザの姿勢は図 2 のような立位寄りの座位に近い姿勢となる。図中のモーションベースは前方に 5 度傾けて使用し、さらにクッションを

挟むことにより座位感を和らげている。この姿勢で足先と腰を半拘束する。足を動かそうとしたときの荷重を荷重センサで取得し、Arduino からシリアル通信で PC へと送り、UDP 送信プログラムから Unity に送られる。Unity 内で身体動作を推定する処理を行い、アバタの身体を動作させる。現状ではアバタの身体動作を部分的に実装しているため、装着が煩わしい HMD は用いず、アバタの姿勢を確認しやすいよう大型モニタを鏡代わりに使用する。Unity 内では SAFullBodyIK と呼ばれるアセットを使用し、アバタの間接の曲がり具合を足先と腰のリグを使用した IK によって制御する。

### 3.3 足先デバイス

図 3 左は現状実装している足先デバイスである。図中の①から⑦は load0 から load7 の荷重センサを表す。また、図 3 右は、load0 から load5 の荷重センサの配置位置および各荷重センサ値から足先の動く方向を推定するためのベクトルを表す。

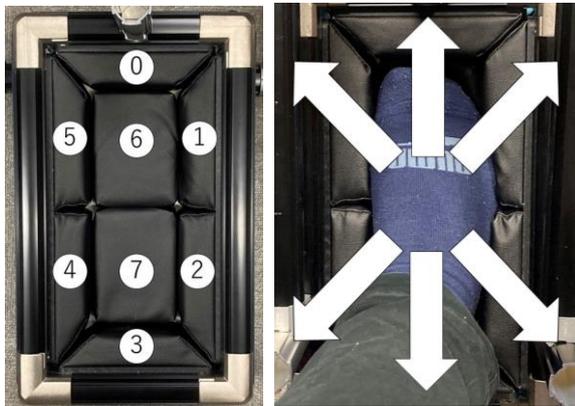


図 3: 足先デバイスおよび足先の動く方向を決めるためのベクトル

ユーザは load6 と load7 の位置に足を乗せて使用する。この際、まず足を動かすことでキャリブレーションを行う。次に、それぞれの荷重センサの入力値をベクトルに変換し、すべてのベクトルを合成することで足先のリグの位置を推定する。

足の前後左右の移動を推定する際は、まず、前方向へのベクトルの最大値、後ろ方向へのベクトルの最大値、右方向へのベクトルの最大値、左方向へのベクトルの最大値をキャリブレーション時に取得しておき、現在のベクトルの値を最大値で割ることで値を正規化する。

足の上下方向の移動については、足を伸ばそうとすると load6 と load7 の荷重が増加し、足を曲げようとする荷重が減少することから load6 と load7 を足した値を使用する。キャリブレーション時に load6 と load7 の合計の最大値を取得し、現在の値を最大値で割ることで値を正規化し、その値でアバタのリグを上下に移動させる。

次に足の回転について説明する。まず、ピッチ方向の回転は load6 と load7 の荷重のバランスによって推定を行い、

load6 を load6 と load7 の合計で割ることで正規化した値を取得する。このとき、重心位置によって load6 と load7 のバランスが最初から偏っている場合があるため、キャリブレーション時にユーザにバランスよく立とうとしてもらい、そのときの load6 の値が load7 と等しくなるように補正値をかける。正規化した値の大きさによって、値が大きければアバタの足先が下、小さければ上を向くようにリグを回転させる。ヨー方向の回転については、右に回転させる際は、load1 と load4 に荷重が集中し、左に回転させる際は、load2 と load5 に荷重が集中することから、右回転は load1 と load4 の値の合計、左回転は load2 と load5 の値の合計によって計算を行う。キャリブレーション時にそれぞれの最大値を取得し、現在の値を最大値で割ることで値を正規化し、値の大きさによってリグを左右に回転させる。また、load1 と load4 の合計と load2 と load5 の合計を比較し、大きい方の回転が優先されるように処理を行う。ロール方向の回転については、現状のデバイスでは推定することが困難であるため、今回は実装を行っていない。解決策として、ユーザの足裏に面した位置の荷重センサを load6 と load7 の横に増設する方法がある。これにより、ロール方向に回転させようとしたときの荷重の変化を読み取ることが可能になり、推定可能となると考えられる。

また、足先の荷重からアバタの腰の位置の推定も行う。腰の高さの推定は足の上下方向の移動で正規化した値を使用して腰のリグを動かす。腰の前後の位置は足の上下回転に使用する正規化された値を使用する。load6 に荷重が集中していれば、身体が前傾になっており、load7 に荷重が集中していれば身体が後傾していると判定する。なお、身体を横に傾ける姿勢は現状のセンサ配置では推定困難であるため、今回は実装していない。この問題は前述の足をロール方向に回転させるときと同様に足裏に面した荷重センサを増設することで解決されると考えられる。

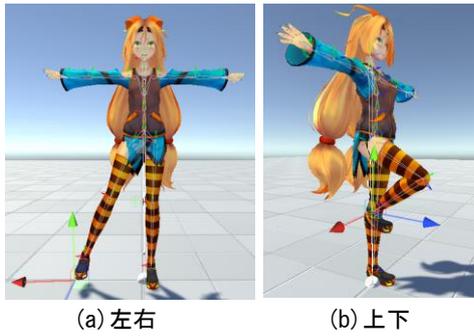
## 4. 実装結果

実装結果を図 4~6 に示す。

図 4 はデバイスを用いてアバタの足を移動させたときの図である。これらの動作はアバタの右足のみ動かせる状態かつ(a)はアバタの足を左右のみに動かせる状態、(b)は上下のみに動かせる状態、(c)は前後のみに動かせる状態における実行結果である。

図 5 は足先の回転に関する実装結果である。これらの動作はアバタの右足のみ回転させられる状態かつ(a)はアバタの足先がヨー方向のみに回転する状態、(b)はピッチ方向のみに回転する状態における結果である。ヨー方向に動かすときは足を移動させるときと異なり、足とセンサとの距離が近くならないため、ある程度力を入れる必要がある。

図 6 は腰の移動に関する実行結果である。(a)は腰のリグの上下移動、(b)は腰のリグの前後移動のみ可能な状態における実行結果である。(a)は膝を曲げる動作、(b)は足をピッチ方向に回転させる動作を行っている。



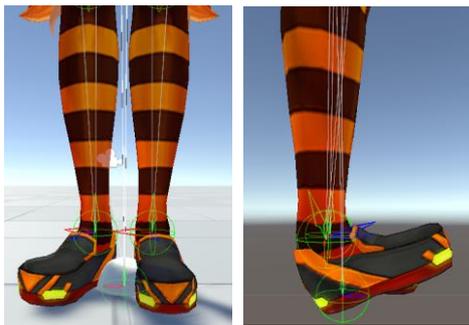
(a) 左右

(b) 上下



(c) 前後

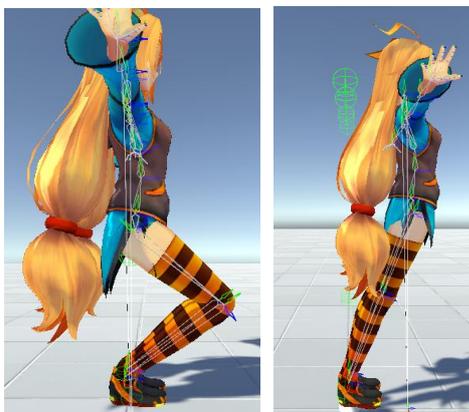
図 4: 足の移動に関する実装結果



(a) ヨー回転

(b) ピッチ回転

図 5: 足の回転に関する実装結果



(a) 上下

(b) 前後

図 6: 腰の移動に関する実装結果

図 4~6 はアバタの足と腰の動作を制限した状態で行っているためうまく動作させることができた。しかしながら、アバタの動作を制限しない状態で足を動作させると、意図しないセンサへの入力が起こることで思い通りにアバタの足腰を動かすことが困難であった。原因としてデバイスのクッションが大きく、足の動きによって周囲のセンサに影響が出ている可能性がある。また、足を動かした後にニュートラルの位置に自然に戻らないことで、センサに力が入り続けてしまうなどの問題が発生した。今後はユーザーの思い通りにアバタの足腰を動作させられるようにデバイスの改良を行っていく。

## 5. むすび

本研究では、ユーザーの全身をあらゆる姿勢の中間の姿勢（半姿勢）および各関節自由度を多少残せるよう中間の硬さで拘束（半拘束）にした状態において、ユーザーの身体動作に応じた力などの情報をセンサによって読み取り、読み取った値を入力として VR 空間のアバタを制御し、映像等によって触力覚や歩行感覚、搭乗感覚などを呈示可能な接地型のシステムを提案した。本論文では手始めに腰と足先を半拘束した状態において、足先を含む下半身の姿勢推定を行うことで、VR 空間内での足の動作と立つ、しゃがむ、前傾、後傾などの身体動作を実現するシステムの実装を行った。現状ユーザーの思い通りにアバタを制御することは困難だが、デバイスを改良することで思い通りに制御することも可能になると考える。今後の課題として、今回実装することができなかった歩行動作の実装と、足のロール方向への回転、センサへのクッションの干渉、足の動作後自然とニュートラルの位置に戻らないことでセンサに力がかかり続けるといった問題を改善するためにデバイスを改良することが挙げられる。また、今後実際に身体を動かしている感覚を呈示できるか知覚評価を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Sharlene N. Flesher, John E. Downey, Jeffrey M. Weiss, Christopher L. Hughes, Angelica J. Herrera, Elizabeth C. Tyler-Kabara, Michael L. Boninger, Jennifer L. Collinger, Robert A. Gaunt : A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control, Science 372, 831-836, 2021.
- [2] 脇田 航: 歩行感覚呈示装置及び呈示方法, 日本国特許第 6795190 号, Nov. 16, 2020.
- [3] 脇田 航: モーションベース, 日本国特許第 6788303 号, Nov. 4, 2020.
- [4] 茂山丈太郎, 小川奈美, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: アバタの関節角補正による疑似抵抗感提示, TVRSJ, Vol. 22, No. 3, pp. 369-378, 2017.