



足の半拘束状態におけるアバタの全身姿勢推定

Full-body Pose Estimation of an Avatar under Semi-Restrained Foot Conditions

真柄智輝¹⁾, 脇田 航¹⁾

Tomoki MAKARA 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, makara@vr.info.hiroshima-cu.ac.jp)

概要: 本研究ではユーザの足を半拘束した状態において 6 点トラッキングのようにアバタの全身の姿勢を推定する手法を提案する. 具体的にはスリッパ型のデバイスを使い, 足の動きを力センサで入力することによって, アバタの足と腰のリグの位置と姿勢を推定し, 疑似的なトラッカーの位置姿勢とすることによって, HMD と両手コントローラによる 6 点トラッキングされた状況に見せかける.

キーワード: 半拘束, アバタ, 全身姿勢推定, 歩行感覚

1. はじめに

近年, VR 技術の普及により, アバタを介した他者との交流が可能なソーシャル VR が広く利用されている. これらのサービスでは, ユーザの動作に応じたアバタ制御が重要となるが, 一般的なモーションキャプチャには, トラッキング範囲の制約や装着の煩雑さといった課題がある. 特に一般家庭のような限られた空間では, 家具などの障害物との衝突や, 狭い範囲でしかトラッキングできないといった問題が顕在化しやすい. そのため, 限られた物理空間でも手軽にアバタを操作できる手法が求められている.

空間的な制約がある中でアバタを制御する手法としては, 歩行装置の利用が挙げられる. スライディングサーフェス型[1]は足が滑る構造のため, 自然な歩行感覚を得るのが難しい. トレッドミル型[2]は進行方向とは逆に床を動かしてユーザの位置を維持するが, 装置が大規模かつ高コストであり, ユーザの動作に応じた床面制御も困難である. これに対し, 我々はこれまでにユーザの進行方向に大腿部半拘束することで歩行感覚を錯覚させる手法[3]を提案してきた. ここで, 半拘束とは, 完全に動作を制限するのではなく, 硬いと柔らかいの中間の硬さで拘束する状態を指す. この手法では, 身体を前方に預けることで歩行を知覚できる一方, 進行方向に対応する荷重センサの設置が必要であり, 全方向の歩行に対応させるには装置が大規模化し, コストも増大してしまう. そこで現在, コストを抑えた小規模な構成でアバタ制御を実現することを目指し, 大腿部ではなく足先を半拘束し, 足裏荷重から歩行動作を推定する手法の研究を進めている[4].

しかしながら, 現状では足裏荷重のみで, 並進歩行およ

び旋回動作が可能かどうかについては未検証であり, その有効性は明らかになっていない.

そこで本研究では, ユーザの足を半拘束した状態において 6 点トラッキングのように旋回動作も含めた全身の姿勢を推定する手法を提案する. 具体的には, 足裏の前後左右 8 点に配置された荷重センサを搭載するデバイス (以下, 足裏デバイス) を用い, 足の動きを力センサで入力することによって, アバタの足と腰のリグの位置と姿勢を推定し, 疑似的なトラッカーの位置姿勢とすることによって, HMD (ヘッドマウントディスプレイ) と両手コントローラによる 6 点トラッキングされた状況に見せかける.

2. システム概要

図 1 に本システムの概要を示す.

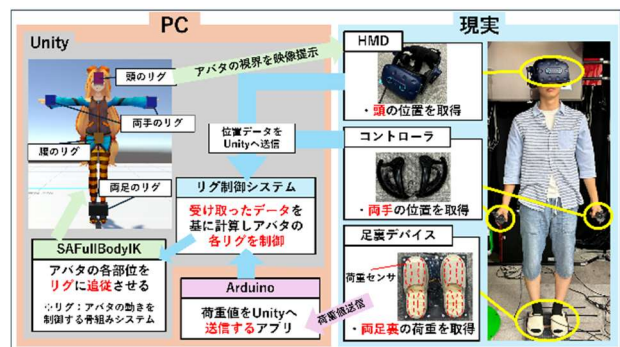


図 1: システム概要図

足裏デバイスはユーザがスリッパを履くような形で装着する. 装着時, ユーザの荷重変動はスリッパを通じて伝

達され、デバイス内部に配置された 8 個の荷重センサによって計測される。この荷重データは Arduino を介して Unity へ送信される。HMD および両手コントローラから取得される位置データと、Arduino から送信される足裏デバイスの荷重データを Unity 上で統合的に受信する。これらのデータは「リグ制御システム」へ送信され、リグの制御が行われる。リグ制御システムの詳細については後述する。

制御されたリグには、「SAFullBodyIK」と呼ばれるアバタの各部位をリグに追従させるシステムを用いることで、6 つのリグのみでアバタの全身姿勢を推定可能とする。また、ユーザが装着している HMD には、アバタが見ている視界をリアルタイムに提示することで、ユーザとアバタが同一の景色を共有できるようにしている。

3. リグ制御システム

3.1 リグ制御システム概要

アバタの姿勢推定を行うにあたって、不可欠となるのが「リグ」である。リグとは、アバタの 3D モデルに対して骨格や関節構造を付加し、それらを動作させるための仕組みである。リグにアバタの各部位を追従させることで、姿勢の制御が可能となる。

本研究では、6 つのリグを用いてアバタの姿勢制御を行う。具体的には、アバタの頭部、両手、腰部、両足にリグを配置し、それぞれの位置・姿勢を制御することで全身の動作を再現する。次節以降では、各リグの制御方法について詳細に述べる。

3.2 頭部のリグ制御

頭部のリグ制御は、まず基準として腰部リグの位置および回転情報を参照する。その上で、ユーザの頭部の動きを反映させるために、HMD から取得した位置および回転のトランスフォーム情報を加味し、最終的な頭部リグのトランスフォームを算出する。これにより、ユーザの実際の視線や頭部動作が、アバタの頭部に自然に反映されるようにする。

3.3 両手のリグ制御

両手のリグ制御においても、頭部と同様に腰部リグの位置および回転を基準とし、そこにユーザが操作する両手のコントローラから取得したトランスフォーム情報（位置・回転）を加味することで、最終的な左右の手のリグのトランスフォームを算出する。これにより、ユーザの実際の手の動きがアバタに自然に反映されるようにする。

3.4 ユーザの重心位置計算

腰のリグおよび両足のリグの制御は、ユーザの重心位置を基に行っている。したがって、制御手法の説明に先立ち、まず重心位置の算出方法について述べる。足裏デバイスに搭載された荷重センサ値は右足のつま先右側が L_0 、かかと右側が L_1 、かかと左側が L_2 、つま先左側が L_3 、左足のつま先右側が L_4 、かかと右側が L_5 、かかと左側が L_6 、つま先左側が L_7 である。

重心位置の計算は、全身 ($AllCOG$)、右足 ($RCOG$)、左

足 ($LCOG$) の 3 種類に対して行っている。以下では、まず全身の重心位置の計算方法について説明する。

全身の重心位置は、(1)～(3)式に示すように、足裏デバイスに搭載された 8 つの荷重センサの出力値を用いて算出する。ここで、 $AllG_x$ 、 $AllG_y$ 、 $AllG_z$ はそれぞれ全身重心用のゲイン、 L_{k1} は各荷重センサ ($k1 = 0 \sim 7$) が読み取った現在の荷重値、 NL_{k1} はユーザが静止状態 (立位) で入力する基準荷重値である。

$$AllCOG_x = AllG_x * \left(\frac{L_0+L_1+L_2+L_3}{4} - \frac{L_4+L_5+L_6+L_7}{4} \right) \quad (1)$$

$$AllCOG_y = -AllG_y * \frac{1}{8} \sum_{k1=0}^7 (L_{k1} - NL_{k1}) \quad (2)$$

$$AllCOG_z = AllG_z * \left(\frac{L_0+L_3+L_4+L_7}{4} - \frac{L_1+L_2+L_5+L_6}{4} \right) \quad (3)$$

次に、右足の重心位置 ($RCOG$) の計算は(4)～(6)式に示す通りである。ここで、 G_x 、 G_y 、 G_z は右足専用のゲインを表す。また、 L_{k2} および NL_{k2} は全身と同様に荷重センサ ($k2 = 0 \sim 3$) の値および基準荷重値を示す。

$$RCOG_x = G_x * \left(\frac{L_0+L_1}{2} - \frac{L_2+L_3}{2} \right) \quad (4)$$

$$RCOG_y = -G_y * \frac{1}{4} \sum_{k2=0}^3 (L_{k2} - NL_{k2}) \quad (5)$$

$$RCOG_z = G_z * \left(\frac{L_0+L_3}{2} - \frac{L_1+L_2}{2} \right) \quad (6)$$

左足の重心位置 ($LCOG$) の計算式は、使用する荷重センサの位置が異なる点を除いて右足と同様であるため、ここでは詳細な記述を省略する。

3.5 腰部のリグ制御 (並進)

腰のリグの並進制御は、両足が地面に接地している場合と、片足のみが接地している場合で計算方法を分けている。以下に、まず両足が接地している場合の計算方法を説明する。

式で表すと、(7)式のようにになる。ここで、 WBP は腰のリグの基準位置を示す変数であり、本研究では簡易的に両足の中間位置と定義している。 WG は腰のリグ制御専用のゲイン、 MA_{AllCOG} は 3.4 節で求めた全身の重心位置の過去 100 フレーム分の移動平均値である。また、 θ_{waist} については腰の向きであり、算出方法は 3.7 節で後述する。なお、腰の y 座標については、足裏の荷重情報からの推定が困難であったため、本研究では x および z 方向のみを対象として制御を行っている。

$$W_{x,z} = WBP_{x,z} + \theta_{waist} * WG_{x,z} * MA_{AllCOG_{x,z}} \quad (7)$$

次に、片足のみが地面に接地している場合の計算方法について説明する。この場合は、(7)式の移動平均を計算する際に、参照する重心データを変更する。すなわち、右足が接地している場合は $RCOG$ を、左足が接地している場合は $LCOG$ を用いる。

3.6 両足のリグ制御（並進）

両足のリグの並進制御は、基本的に足が地面から離れているとき（すなわち空中にあるとき）のみに行う。これは、現実においても足が地面に接地している際には位置が固定されていることを反映したものであり、地面接地中はリグの位置を更新しない。

接地していない足のリグ位置は、反対側の接地足の重心位置と、直前まで接地していた自身のリグ基準位置を用いて算出する。(8)～(11)式に示すように、x および z 方向については、接地足の重心位置 (RCOG または LCOG) と、直前に接地していた足のリグ位置 (RFBP または LFBP) に基づいて制御を行う。y 方向については、接地している側の重心位置の y 成分を参照することで高さを決定する。また、足の向き（リグの回転）については、接地中に取得した旋回角度を用いることで制御する。この旋回角度 (θ_{Rfoot} または θ_{Lfoot}) は 3.7 節で後述する手法により算出し、接地していない側の足の回転として適用する。これにより、足の向いている方向がアバタの進行方向に反映され、旋回動作を含んだ自然な移動制御を可能とする。なお、(8), (9) 式は右足の制御、(10), (11) 式は左足の制御を表す。

$$RF_{x,z} = RFBP_{x,z} + \theta_{Rfoot} * FG_{x,z} * LCOG_{x,z} \quad (8)$$

$$RF_y = FG_y * RCOG_y \quad (9)$$

$$LF_{x,z} = LFBP_{x,z} + \theta_{Lfoot} * FG_{x,z} * RCOG_{x,z} \quad (10)$$

$$LF_y = FG_y * LCOG_y \quad (11)$$

3.7 旋回制御手法

3.7.1 旋回角度の推定

本研究では、足裏に配置した 8 つの荷重センサ（右足： $L_0 \sim L_3$, 左足： $L_4 \sim L_7$ ）から得られる圧力分布に基づいて、ユーザの身体の旋回動作を推定する。旋回動作は、足裏の左右方向における圧力の非対称性に着目することで検出可能である。本手法では、対角線上に位置するセンサ値の差分を用いて、それぞれの足における旋回寄与を計算する。右足および左足の差分 ΔR , ΔL は (12) 式のように定義する。

$$\Delta R = \frac{L_0+L_2}{2} - \frac{L_1+L_3}{2}, \Delta L = \frac{L_4+L_6}{2} - \frac{L_5+L_7}{2} \quad (12)$$

各差分はキャリブレーション時に取得された最大差分 ΔR_{max} , ΔL_{max} により正規化され、さらに足全体の加重量 W_R , W_L に基づく荷重比 ω_R , ω_L を乗算することで、回転への寄与度を調整する。最終的な旋回角度 $Final_{rot}$ は (13) 式により定義する。

$$Final_{rot} = \theta_{max} \left(\frac{\Delta R}{\Delta R_{max}} * \omega_R + \frac{\Delta L}{\Delta L_{max}} * \omega_L \right) \quad (13)$$

ここで θ_{max} は最大回転角（本研究では 90 度）を表す。

3.7.2 リグへの回転制御の適用

推定された旋回角度 $Final_{rot}$ は、両足および腰の各リグに対し、足の支持状態に応じて異なる方式で適用される。

両足支持脚時は、腰リグの回転角 θ_{waist} のみを更新し、両足リグの回転角は固定する。更新式は (14) 式のような

る。なお、 i は時間差分を表しており、 i が現在のフレームだとすると、 $i-1$ は一個前のフレームを表す。

$$\theta_{waist_i} = \left(\frac{\theta_{Rfoot_{i-1}} + \theta_{Lfoot_{i-1}} + Final_{rot_i}}{2} \right) \quad (14)$$

片足支持時においては、遊脚（浮遊している脚）および腰の旋回角度をそれぞれ個別に更新することにより、実際の歩行動作に近い旋回挙動を再現する。腰の旋回角度は、1 フレーム前における両脚リグの中間角度に基づいて決定され、これを (15) 式に示す。

$$\theta_{waist_i} = \left(\frac{\theta_{Rfoot_{i-1}} + \theta_{Lfoot_{i-1}}}{2} \right) \quad (15)$$

両脚の旋回角度制御においては、各脚の基準角度 ($\theta_{Base_{R,L}}$) を支持脚の切り替え時に更新し、遊脚にはこの基準角に最終的な旋回角 $Final_{rot}$ を加算する方式を採用する。支持脚が切り替わった際には、 $Final_{rot}$ を基準角度に加算し、両脚の基準角度を同一の値に揃える。最終的な両脚の角度は (16) 式に示す通りである。

$$\theta_{Rfoot,Lfoot} = \theta_{Base_{R,L}} + Final_{rot} \quad (16)$$

4. 実装結果

本章では、ユーザが足裏デバイス上で実行した歩行および旋回動作に対して、アバタが意図通りに動作するかを検証する。

4.1 前後歩行

ユーザが前後方向に荷重を移動させつつ足踏み動作を行った際のアバタの姿勢推定結果を図 2 に示す。



(a) 前進歩行



(b) 後退歩行

図 2: 前進および後退歩行時の姿勢推定結果

図 2(a) は前進歩行、図 2(b) は後方歩行の結果である。それぞれに応じたアバタの前進および後退動作が確認できる。本システムでは、足裏デバイスにより両足および腰のリグを、HMD および両手のコントローラにより頭部および両手のリグを制御しており、これにより自然な前進・後退歩行が実現されていることが図から読み取れる。

4.2 左右歩行

ユーザが左右方向に荷重を移動させながら足踏み動作を行った際のアバタの姿勢推定結果を図3に示す。

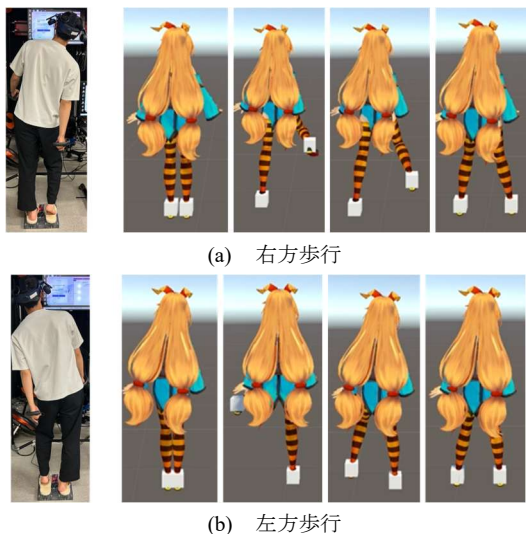


図3: 左右歩行時の姿勢推定結果

図3(a)は右方向への歩行、図3(b)は左方向への歩行結果である。左右方向の荷重偏移に基づいて、アバタが左右に移動する挙動が確認できる。足裏デバイスにより両足と腰の位置情報を取得し、アバタの重心移動を制御することで、横方向の移動動作も違和感なく再現されていることがわかる。

4.3 旋回動作

ユーザが足裏デバイス上で旋回操作を行った際のアバタの姿勢推定結果を図4に示す。

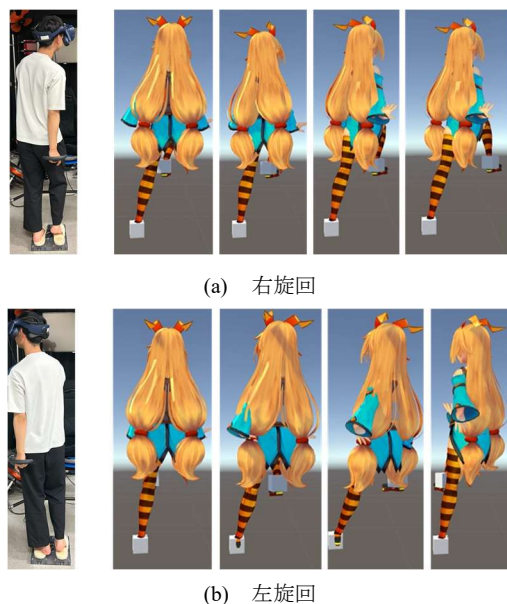


図4: 旋回動作時の姿勢推定結果

図4(a)は右旋回、図4(b)は左旋回時の結果である。荷重

の左右対角差分に基づいてアバタの回転が制御されている。片足支持時の遊脚および腰リグの角度更新により、現実に近い旋回挙動を実現しており、アバタがユーザの旋回意図に応じて滑らかに回転する様子が確認できる。

4.4 考察

前後および左右方向の歩行に関しては、ユーザの意図に応じて高い精度でアバタを制御することができた。しかしながら、旋回動作を加えた際には、旋回のノイズにより、ユーザが旋回を意図していない場面でもアバタが回転動作を行う場合が散見された。特に後退歩行時においてこの傾向が顕著であった。これは、現状のデバイスではかかと側が固定されない通常のスリッパを用いているため、かかと側の姿勢が変動しやすく、後方に荷重をかけた際に重心の位置が不安定になりやすいことが一因であると考えられる。その結果、足裏の荷重分布にばらつきが生じ、旋回動作の誤検出につながったと推察される。したがって、今後の改善策として、かかと側の移動自由度を制限するような拘束機構を導入することで、不安定な荷重変化を抑制し、誤動作を低減できる可能性がある。

5. むすび

本研究では、ユーザの足を半拘束した状態において6点トラッキングのように旋回動作も含めた全身の姿勢を推定する手法を提案した。具体的には、足裏デバイスを用い、HMDおよび両手コントローラと組み合わせることで、アバタの全身姿勢を推定した。この結果、前後左右の歩行に関しては、高精度な動作が可能であることを確認した。一方、旋回動作では、特に後退時に意図しない回転が発生することがあり、かかと部の荷重検出の不安定さが一因と考えられる。

今後は、かかとの拘束や重力・当たり判定の導入により、より安定した制御を目指す。また、現状ではUnity内のアバタの姿勢推定に留まっているため汎用性に乏しいが、clusterやVRChat等といったメタバースプラットフォームへの対応も視野に研究開発を行っていく。

参考文献

- [1] H. Iwata and T. Fuji: VIRTUAL PERAMBULATOR: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment, Proc. of the 1996 Virtual Reality Annual International Symposium(VRAIS '96), pp.60-65, 1996.
- [2] 野間春生: ロコモーションとバーチャルリアリティ, 計測と制御, Vol.43, No.2, pp.133-138, 2004.
- [3] W. Wakita, T. Takano, and T. Hadama: A Low-cost Omnidirectional VR Walking Platform by Thigh Supporting and Motion Estimation, ACM VRST 2018, Tokyo, Japan, 2018.
- [4] 三宅勇輝, 脇田 航: 足裏荷重を用いた足の半拘束型アバタ歩行システム, 知覚情報研究会, 2024.