

# 上肢運動に着目した HMDVR 空間上における 歩行判定モデルの構築

峯田征和<sup>†1</sup> 河野央<sup>†2</sup>

HMDVR 空間において、移動体験が可能になるとコンテンツ表現の幅が広がる。そこで、大規模なシステムや空間を使用せず、HMDVR 空間上で歩行感覚を得るための手の振りによる上肢運動を利用した歩行判定モデルを開発した。HMDVR 空間上で最も歩行感覚が得られた映像速度と上肢運動のデータを取得・解析し、歩行開始から歩行停止までの条件を定義し、被験者に対して検証実験を行った。実験の結果、上肢運動のみでも歩行感覚が得られ、歩行判定モデルの妥当性についても一定の評価が得られた。

MASAKAZU MINEDA<sup>†1</sup> HIROSHI KONO<sup>†2</sup>

## 1. はじめに

### 1.1 背景

ヘッドマウントディスプレイ(HMD)機器は、娯楽、建築、医療、教育といった様々な現場で活用されているが、映し出された空間内を装着者の意思で歩いたり走ったりといった移動のための動作には制約があり、没入感を高めた 360 度対応モニターに過ぎない。つまり、HMD を使用し、映し出される空間上を自由に移動するためには、HMD 以外の何らかの入力システムが必要となる。

HMD における VR (HMDVR) 空間を移動するための入力機器として、HMD 付属のコントローラを用いた入力や外部システムを用いて実際の人間の動作を入力とする方法が挙げられる。

コントローラ入力による移動は、指先のみを使用するため、小規模スペースでも可能であり、一般的に採用される場合が多い。しかし、実空間の運動動作のように下肢、上肢といった部分を動かさず、その場で操作できるため、視覚から得られる映像移動の情報と身体感覚にずれが生じ、身体に VR 酔いを引き起こす原因となってしまう恐れがある[1]。

下肢を使用した方法は、トレッドミルでの歩行や[2]、足踏みによる足圧を用いたものなどあり[3]、実空間の運動動作と同等の運動感覚を得ることができるが、システムやスペースが大規模化しやすい。

一方、上肢を使用した方法は、実空間の移動を伴わないため、限られたスペースでも実際の運動動作に対応できる。上肢運動を計測する方法として、専用のシステムを用いて計測する研究も行われているが、下肢同様にシステムが大掛かりになり、使用するスペースも大きくなるため、汎用性は低い[4]。そこで、HMD 付属のコントローラを用いて歩行時の上肢の動作を計測し、取得した値を基に歩行判定

を行うことにより HMDVR 空間の移動するインターフェースとして活用できれば、システムとスペースを小規模化でき、システムも構築しやすくなるため、汎用性が高まり、コンテンツ開発の自由度の向上も期待できる。また、上肢運動のみで歩く・走るといった動作が没入感の高い HMDVR 空間上で可能になれば、下肢が不自由な人でも歩行感覚や走る感覚が得られる可能性がある。

### 1.2 関連研究

上肢運動は、歩行時上半身のバランスを取るために無意識に起こる動作ではあるが、歩行動作の一つであり、HMDVR 空間上で違和感なく歩行する手段として有効であるといえる。先行研究では、3 種類の歩行速度を条件として被験者に与え、それぞれに応じた上肢運動を行った結果、上肢運動の速度が歩行速度に影響していることが示されており、上肢運動の速度によって VR 空間上の移動速度を制御するモデル式を構築している[5]。しかし、曲がる、停止といった動作には対応できていないため、上肢運動を使用した歩行判定モデルとして不完全であるといえる。VR 空間上で完全な歩行動作を再現するためには、360° にヨーイング (Yawing) 回転でき、任意のタイミングで移動を開始及び停止できる要素も必要となる。360° のヨーイング回転は、HMD の登場により解決されたが、移動開始、移動停止の問題は解決していない。

### 1.3 目的

本研究では、上肢運動の速度によって HMDVR 空間上での移動速度を制御し、上肢運動に応じた移動開始及び移動停止について判定する歩行判定モデルを構築する。また、被験者による歩行判定モデルの評価を通して上肢運動のみでも HMD 空間上で歩行感覚が得られるのか検証する。

## 2. 研究方法

VR 空間で実空間と同程度の歩行感覚を作り出すために

<sup>†1</sup> 久留米工業大学大学院  
Graduate School of Kurume Institute of Technology.  
<sup>†2</sup> 久留米工業大学  
Kurume Institute of Technology.

は、視覚情報と運動感覚の違和感を少なくする必要がある。はじめに、HMD コントローラを用いた上肢運動に応じて HMDVR 空間の映像を動かす環境を構築する。次に、構築した環境において、歩行時における移動速度を定義する。また、歩行開始・歩行停止を判定する条件式を構築することで、歩行判定モデルを構築する。最後に、構築した歩行判定モデルを用いた実験についてユーザ評価を行い歩行感覚や上肢運動に応じた HMDVR 空間上の映像を動かす歩行判定モデルの妥当性についての検証を行う。

### 3. 実験手法

#### 3.1 概要とシステム構成

本実験では、視覚情報に VR 空間を投影する HMD として床からの正確な高さを取得でき、実空間の身長を VR 空間上で再現可能な HTC VIVE を採用した。また、ハイエンド開発に適した Epic Games 社製の Unreal Engine 4 を用いて、実験用 VR 空間を作成した。上肢動作の計測は、作成した VR 空間上に HTC VIVE 付属のコントローラを同期することで、コントローラを介して座標値、回転値をリアルタイムに取得し、被験者の上肢動作を算出する。HMDVR 空間上での歩行を実現するため、得られた上肢動作の値から、HMDVR 空間上で歩行動作を開始したと判定した時に映像を動かし、上肢の動きが止まった時は映像を停止させ、映像を動かしている間の速度は上肢の振りの速度によって決定する歩行モデルを構築する。開発した歩行判定モデルを利用し被験者に実空間で上肢運動の開始、停止を任意の間隔で繰り返し HMDVR 空間上で自由に移動してもらい、実験終了後、歩行感覚についてユーザ評価を行う。

表 1 コントローラからの取得変数

座標値 (cm)	x	y	z
回転値 (°)	Roll	Pitch	Yaw

#### 3.2 HMDVR 空間上での歩行時における移動速度の実験

HMDVR 空間上で歩行感覚を感じる映像速度は被験者によって個人差があるため一意に定義付けすることは困難である。しかし、上肢の振り速度は歩行速度に関係があることは先行研究により示されているため、事前実験として、被験者 12 名に HMDVR 空間上で最も歩行感覚が得られる映像速度を設定してもらい、設定した映像速度によって HMDVR 空間上を移動しながら上肢を振ってもらうことで、上肢運動の平均速度を計測した。実験結果から上肢運動から映像速度を割り出すために、映像速度と上肢の振りの平均速度による回帰分析を行ったところ、式(1)のような回帰式を得た。本実験における歩行動作開始後、HMDVR 空間上を移動する映像速度を求める際に用いた。

$$v = 0.0009mv + 0.2147 \quad (1)$$

( $v$ : VR 空間上での映像速度  $mv$ : 上肢の振り速度)

#### 3.3 歩行判定モデルの構築

次に、事前実験で得られた被験者の上肢動作の歩行開始時および停止時のコントローラの座標値、回転値の変化に基づき次の仮説を立てた。上肢運動を開始した時、左(右)コントローラの Pitch の値が増加し、右(左)コントローラの Pitch の値が減少していたことから、実空間での歩行における右上肢と左上肢は互いに対となり動作することを示していると捉え上肢運動開始時は、左右のコントローラがそれぞれ逆方向に動作していると仮定した。

また、上肢運動中、上肢が停止動作に入った時に左右のコントローラでは、 $z$  値(高さ)の変化量が、最終的に全て  $-1$  以上または  $1$  以下となった。つまり  $z$  値の変化量が連続的に  $1 < x < -1$  という範囲内であれば、上肢運動は停止していると仮定できる。反対に  $z$  値の変化量が連続的に  $1 < x$  かつ  $-1 > x$  という条件に則していれば、上肢運動をしているとも仮定できる。これらの仮説から、上肢運動による HMDVR 空間上での歩行開始及び歩行停止を判定する条件を、以下のとおりに定義した。

・歩行開始の条件

$$F_1 = \begin{cases} \text{TRUE}, & (Lp_1 > Lp_0 \text{ and } Rp_1 < Rp_0) \\ \text{TRUE}, & (Lp_1 < Lp_0 \text{ and } Rp_1 > Rp_0) \\ \text{FALSE}, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$$F_2 = \begin{cases} \text{TRUE}, & (Lz > 1 \text{ or } Lz < -1) \\ \text{FALSE}, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$F_3 = \begin{cases} \text{TRUE}, & (Rz > 1 \text{ or } Rz < -1) \\ \text{FALSE}, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

・歩行停止の条件

$$F_4 = \begin{cases} \text{TRUE}, & (-1 < Lz < 1) \\ \text{FALSE}, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

$$F_5 = \begin{cases} \text{TRUE}, & (-1 < Rz < 1) \\ \text{FALSE}, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

※左コントローラの Pitch= $Lp$ ,  $z$  値= $Lz$

※右コントローラの Pitch= $Rp$ ,  $z$  値= $Rz$

式 (2) は、左右のコントローラから取得した Pitch を、1 つ前に取得した Pitch と比較した時、左(右)の値が増加し、右(左)の値が減少している場合に TRUE となる。

式 (3), (4) は、左右のコントローラから取得した  $z$  値(高さ)を、1 つ前に取得した  $z$  値と比較した時、変化量が  $1$  以上または  $-1$  以下である場合に、左なら式 (3)、右なら式 (4) がそれぞれ TRUE となる。

式 (5), (6) は、左右コントローラから取得した  $z$  値を、1 つ前に取得した  $z$  値と比較した時、変化量が  $1$  以下かつ  $-1$  以上である場合に、左なら式 (5)、右なら式 (6) がそれぞれ TRUE となる。

これらの式 (2) から (6) の条件式と HMDVR 空間を移動する映像速度を制御するための回帰式 (1) を使い、歩行判定モデルを図 1 のように構築した. 図 1 における IsMove は上肢運動が TRUE なら運動中, False なら停止中という条件になっており, CounterM (S) に関しては, 歩行開始 (歩行停止) の判定において, 複数回判定することで, 誤作動を防ぐ目的で設定している. 判定回数は事前研究で得られた上肢運動のデータをもとに決定した.

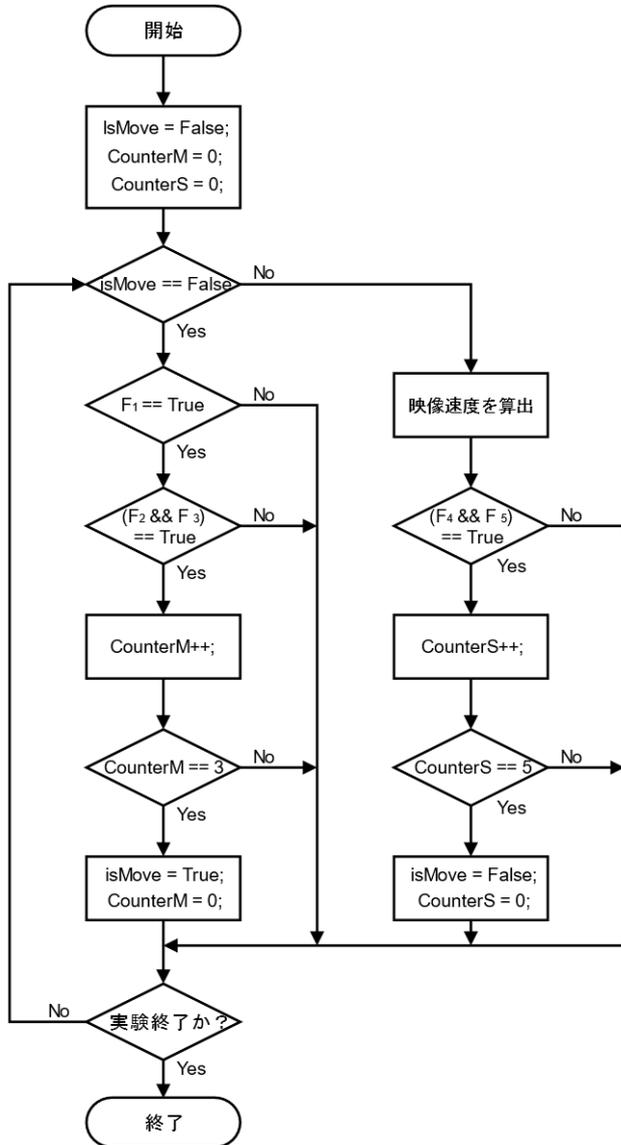


図 1 歩行判定モデルのフローチャート

#### 4. 歩行判定モデルの評価および検証

18 歳から 24 歳までの被験者 12 名に対し, 実験として 3 章で定義した歩行判定モデルを使用し, HMDVR 空間を自由に歩行してもらった.



図 2 実験中の実空間 (左) と HMDVR 空間 (右)

実験終了後, 歩行感覚および歩行判定モデルに関して被験者 12 名によるユーザ評価を実施した. 歩行感覚については, 被験者 12 名全員が感じられたと回答した. 歩行判定に関しては, 上肢運動を開始してから HMDVR 空間上の映像が動き出すまでの時間 (歩行開始), 上肢運動中の HMDVR 空間を移動する映像速度 (移動中), 上肢運動を終了してから, HMD 歩行中の速度が停止するまでの時間 (歩行停止) の 3 種類について, 速い(2)・少し速い(1)・適度(0)・少し遅い(-1)・遅い(-2)の 5 段階で評価した. その評価結果の平均および分散を表 2 に示す.

表 2 歩行判定モデルのユーザ評価

	平均	分散
歩行開始	-0.33	0.22
歩行中	-0.42	0.24
歩行停止	-0.58	0.74

※小数点第 3 位以下四捨五入

歩行判定については, 歩行開始や歩行中の評価は適度(0)に近い, 妥当な判定モデルの可能性がある. しかし, 歩行停止の判定については, 遅延がある. これは, コントローラの値を取得後に判定を行っているためであり, 予測を行うことで評価を改善できると考えられる.

#### 5. おわりに

本研究の歩行判定モデルにより, 上肢運動のみでも歩行感覚が生じることが示された. しかし, 上肢運動を終了してから HMDVR 空間上の映像が停止するまでの時間に対する判定について改善の余地がある. また, 上肢の振り速度から算出する HMDVR 空間上を移動する映像速度についても映像速度が少し遅いと感じている被験者が多いことから, 現状の歩行判定モデルでは上肢運動と視覚情報の間に違和感が生じてしまっている. 今後は, 歩行判定モデルの遅延をなくし, 上肢の振り速度から映像速度を算出する回帰式の精度を向上させ, 自由な散策を利活用した VR コンテンツを開発する.

**謝辞** 本研究の実験にご協力頂いた久留米工業大学工学部情報ネットワーク工学科の皆様, 謹んで感謝の意を表する.

## 参考文献

- 1) 氏家弘裕, 鶴飼一彦, 齋田真也: 映像酔いに対する運動パターンと映像コンテンツの影響, TVRSJ, Vol.9, No.4, pp.377-386(2004).
- 2) Ki Hun Cho, Min Kyu Kim, Hwang-Jae Lee, Wan Hee Lee.: Virtual Reality Training with Cognitive Load Improves Walking Function in Chronic Stroke Patients., Tohoku J. Exp. Med., 236, 4, pp.273-280(2015).
- 3) 針山拓人, 青砥哲郎, 大倉典子: 足踏みによる歩行感覚体感デバイスの開発, 人間工学, Vol.44, No.Supplement, pp.266-267(2008).
- 4) 末田岳, 阪直幸, Yem Vibol, 池井寧, 雨宮智浩, 北崎充晃: 上肢運動ディスプレイによるバーチャルリアリティ歩行の表現, TVRSJ23, 32C-4(2018).
- 5) 久木元伸如: 手の振りをインターフェースとした仮想空間の移動, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.23, No.36, pp.11-14 (1996).