Waraji : 仮想環境のための足を用いた入力インタフェース

Waraji: Input Device for Controlling Movement through Leg Movement

学生会員 増野 智経[†],齋藤 豪^{††},高橋 裕樹^{†††}, 正会員 中嶋 正之^{†††}Tomonori Masuno[†], Suguru Saito^{††}, Hiroki Takahashi^{†††} and Masayuki Nakajima^{†††}

Abstract Various types of interface devices operated with the hands have been developed and are widely used. However, we use our legs for walking in the real world, so it is natural to use an interface devices operated with the legs for moving around a virtual environment. In this paper, we have developed a new interface device "Waraji (Walking, Running, And Jumping Interface)". Using Waraji, users can work at ease in a virtual environment because their hands are free from movement operations. In addition, because Waraji is smaller than other interfaces for movement, it can be easily worn. Experiments have shown that Waraji provides operability similar to that of a joystick. It will be useful for surround-display virtual-environment systems such as CAVE(CAVE Automatic Virtual Environment).

キーワード: 仮想環境, 歩行インタフェース, 重心移動, 足

1. ま え が き

人間の五感, 特に視覚や触覚および聴覚に対するインタラクションを中心に様々な仮想現実感に関する研究が行われている。また, 近年の著しいコンピュータの処理能力の増大に伴い, その処理能力を利用して, ユーザの入力に対し高度な感覚提示を行うことが可能になってきている。今後は, 複数情報の入力をリアルタイムに仮想環境に反映していくことが可能になっていくものと考えられる。

現在までに提案されている仮想環境のための入力インタフェースは, 一般的に手に装着して使用するものが多く, それらは主に, "指示する" という手の機能を実現している。例えば, ジョイスティックで移動操作を行う際, 実際には進みたい方向を指示することで移動操作を行っている。しかし, 人間の手にとって, 指示操作はほんの一

部の機能を実現しているに過ぎない。通常, 人間は手を用いて, ジェスチャによって他人とコミュニケーションを交わし¹⁾, 物体に触れることでその物体の質感を触覚によって体感し²⁾, また物体を設計する³⁾ことができる。それらの機能を仮想環境においても実現するためには, 手は欠かせない部位である。さらに, 仮想環境において移動動作のみを行う場合は, 手を用いたインタフェースによる操作は効果的である。しかし, 実際には上記の様なさまざまな操作を移動しながら行うことが充分予想される。それらのことを移動操作と同時に行う場合, ジョイスティックで行っていた移動操作や物体指示操作を他の部位で行う必要があると考えられる。

そこで, 移動操作についての手の代替として, 足を用いたインタフェースを考えることができる。

仮想環境で移動操作に足を用いる利点としては, まず, 日常では人間は足で移動を行っているため, 仮想環境での移動操作を足に担わせるのは合理的であるということが考えられる。また前述した通り, 移動操作を足に割り当てることで, 手に様々な操作を行わせることができると考えられる。

2. 仮想環境における足を用いたインタフェース

仮想環境における足を用いたインタフェースとしては, Torus Treadmill⁴⁾ や滑べる靴を履いて歩行するインタフェース⁵⁾ など, 歩行機械上で歩行の動作を行う, もしくは, 円盤上での重心移動によって, 仮想環境内の移動を行う方法⁶⁾ が提案されている。しかし, これらのインタフェースは, HMD(Head Mounted Display) で使用する

1999 年 3 月, 映像情報メディア学会映像表現研究会で発表

1999 年 11 月 30 日, 2000 年 3 月 17 日再受付, 2000 年 4 月 6 日採録

[†] 東京工業大学 大学院理工学研究科

(〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, TEL 03-5734-3906)

^{††} 東京工業大学 精密工学研究所

(〒 226-8503 横浜市緑区長津田 4259, TEL 045-924-5083)

^{†††} 東京工業大学 大学院情報理工学研究科

(〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, TEL 03-5734-2183)

[†] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

(2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan)

^{††} Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

(4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan)

^{†††} Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

(2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan)

場合は非常に大きな没入感を与えるが、CAVE⁷⁾システムに代表される、大画面の仮想環境システムでは、ユーザがインタフェース上で固定されてしまい、あるいはインタフェース自体が巨大なものであるため、没入感を損ねてしまう可能性がある。

また、入力インタフェースではないが足の裏面部分を利用した物としては、歩行時の足の裏面の重心移動を計測し、そこからユーザの位置を検出するシステム⁸⁾や、足裏に振動子を利用したファントムセンセーションによって画像とのインタラクションを行うもの⁹⁾がある。

本論文では、手に装着する入力インタフェースと協調して操作が行える移動インタフェースである、靴形のインタフェース“Waraji (Walking, Running And Jumping Interface)”を提案する。Waraji では、仮想空間内の移動に2つのモード(重心移動による高速移動、近接範囲内での歩行)を用いている。

以下の章では Waraji を作成し、評価実験として、従来の手による入力デバイスとの比較実験、および Waraji の仮想環境への反映方法に関する実験を行った。

3. インタフェース“Waraji”について

3.1 Waraji の特徴

Waraji の特徴について述べる。

まず、第一の特徴は、ユーザの仮想環境内での大域的な移動に、足の裏の重心移動を入力として用いる点である。そのための方法として、ユーザの重心の位置変化に応じた圧力の変化を計測するために、感圧センサを使用している。これはユーザの掛けた圧力の大きさを移動操作による速度の大きさとして反映することができ、また、ユーザが重心を掛ける位置に応じて、広大な仮想空間でも楽に移動方向を変化させることができる利点がある。

第二の特徴は、靴の形をした小形のインタフェースであることである。ユーザはこのデバイスを装着したまま、ある程度の局所的な仮想空間(図1にある Virtual Subspace とある部分)を実際にその足で歩行移動することができる。本論文では、この移動を局所的移動と呼ぶことにする。

これは CAVE⁷⁾システムのような、大画面の仮想環境システムでは有効である。例えば、位置入力センサと同時に用いることにより、Waraji を履いたまま、実際に立つ位置を変えて、仮想物体の周りを歩くように詳細に観察を行ったり、触れたりすることが簡単に行える。また、Waraji ではその靴形のインタフェースであるという特徴から、床面の映像表示を阻害することがないため、高度の没入感を保つことが可能である。

Waraji で実現可能な移動動作を図1に示す。図において、Whole Virtual Space とあるのは仮想空間全体のことを指し、Virtual Subspace とは、CAVE システムなどの没入型仮想環境システムにおける、下面に投影され

図1 Waraji を用いた移動
Movement using Waraji.

表1 Waraji の主な仕様
Specification of Waraji.

ユーザ装着部	G.T. Hawkins 社製 サンドル
底面成形部	スタイルフォーム(厚さ 20mm)
衝撃吸収部	ゴム製スポンジ(厚さ 10mm)
感圧センサ	イナバゴム IESR-12B

表2 感圧センサ(IESR-12B)の諸元
Specification of pressure sensor(IESR-12B).

サイズ	縦 12mm × 横 12mm × 高さ 6mm
無負荷抵抗値	500K オーム以上
最大負荷抵抗値	500 オーム
最大許容負荷	4.0 kgf

る領域の部分の部分を指している。ユーザは、Virtual Subspace 内では、ユーザ自身の足で仮想空間内を歩行することで、前にも述べたような手を用いた高度な感覚提示を受けることが可能である。また、大域的な移動を行う場合には重心移動を利用することで、ユーザがかけた重心の大きさに比例した速度で移動を行うことが可能である。このようにして、Waraji では2つの移動モードを同時に実現することができるが、後に述べる、今回行った一連の実験では大域的な移動モードのみを対象としている。

3.2 Waraji の構造

図2に Waraji の外観を示す。Waraji はサンダルをベースとして3層構造(上から順にユーザ装着部、底面成形部、衝撃吸収部)をなしている。ユーザ装着部としてサンダルを使用し、その下に底面成形部としてスタイルフォームの層があり、裏面部分を成形している。これはユーザの重心移動を、仮想環境での移動に反映するためである。さらに下にはスポンジ層がある。スタイルフォーム層に付けた感圧センサに対し、過度の圧力や衝撃が掛かるのを防ぐためである。Waraji の主な仕様を表1に示す。また使用した感圧センサの諸元を表2に示す。

今回の Waraji の実装において、感圧センサの位置は成人男性の重心移動による圧力の掛かり具合を計測して決定している。このため、現時点ではおおむね足の大きさが25~28cmの人が Waraji を装着して操作することを想定している。

3.3 底面部の形状

人間の重心は必ずしも安定しているとは限らず、一番安定していると考えられる10~20歳前後の人でも直立

図 2 Waraji の外観
Exterior of Waraji.

図 3 底面の寸法図
Dimensional drawing of shoe sole.

図 4 実際の底面部 (スポンジを取り除いたもの)
Shoe sole(exclude sponge).

時で平均して 3cm 位, 60 歳代では 10cm 近くも重心の位置が動揺していることがわかっている¹⁰⁾。よって重心位置を検出する場合, 重心動揺の影響を考慮する必要がある。例えば, ユーザが移動を意図していなくても, 重心動揺の影響を受け, ユーザの仮想空間内での位置が前後左右に揺れ動く可能性がある。一般に, 仮想環境で利用されるアプリケーションプログラムではユーザとのインタラクションを行うことが多く, その性質上, 動きの大きな映像が表示される場合が多い。その中で, 特に動揺する画像をユーザに提示した場合, さらに重心の揺れが大きくなることが知られている¹¹⁾。そのため, ユーザの重心変化を直接移動操作に用いることは困難である。

そこで直立時には, ほぼ足の裏の中央部に重心が位置している¹⁰⁾ 特性を利用し, 直立時に, 図 3 に示す裏面中央部以外のセンサが圧力を受けずに済むように底面部を成形した。

このようにすることで, ユーザの重心動揺による影響を受けるのは, 裏面の中央部にある, 足が接地しているかしていないかを判断するセンサだけになるため, それほどユーザの操作に影響を及ぼすことはないと考えられる。今回の実装では, ほぼ意図的に重心を移動させない限り, 直立時に重心動揺の影響を受けないようにできた。図 3 に底面部の寸法図を, また, 図 4 に実際の形状を示す。

3.4 体重移動の速度への変換

センサの配置についての試行を行った。Waraji の場合, 仮想環境での没入感を深めるためには, 重心の移動を計測し, それをほぼリアルタイムに方向データとして反映する必要がある。センサの個数が多ければ多いほど, 足の裏の圧力分布が明確になり, ユーザがどの方向に重心を掛けようとしているかを推測することが容易になるが, センサ数があまりに多くなると, 時分割システムでのセンサの計測時間の遅延によってリアルタイム性が失われる恐れがある。今回は, 図 5 のように, 比較的操作が行いやすいと思われる, 足の爪先およびかかとの部分に左右の感圧センサを配置した。

この配置では, 各センサの出力がそのまま四方向 (前後左右方向) それぞれのデータとして反映される。例えば, 図 5 において, センサ A はユーザの前方向への重心移動を検知し, 仮想環境における前方向への移動として反映される。センサ B および C は右方向へのユーザの重心移動を検知し, 仮想環境における右方向への移動として反映される。また, 10 個のセンサから計測するだけでよい。ため, サンプルングの間隔は 1 秒間あたり 25~30 回程にすることができる。これらのセンサからユーザが任意の方向へ操作の指示が行えるかどうかを確認するため, 被験者に Waraji を装着し, 右足を全方向にわたって傾けてもらった。図 6 は, その際のセンサ出力を前および右方向を 100, 後ろおよび左方向を -100 として, -100~100 程度の数値で表し, 前後・左右方向にプロットしたものである。センサの個数が片足 7 個と非常に少ないにもかかわらず, 方向指示に関してはほぼ 360° にわたる方向操作を可能にしていることがわかる。よって, 今回の実装方式を用いて仮想空間の移動操作を行う場合は, 数個程度のセンサを用いることで十分にユーザの意図している方向への操作が可能であると考えられる。

今回使用した感圧センサは, 約 3.0kgf 以上の加重に対してはほぼ一定の抵抗値を示す。そこで, センサの受けた圧力が 3.0kgf までならば抵抗値の増加に対応して速度を増加させ, 3.0kgf 以上の場合, ある一定時間までは速度値を 3.0kgf の場合の速度値で一定とし, その一定時間を超えても 3.0kgf 以上の力が加わる場合は, 一定値 $\times 1.5$ 倍の速度値としている。このように Waraji では, isometric rate scheme¹²⁾ の方法を用いて移動操作を行っ

図 5 感圧センサの配置と方向の関係
Relationship between positions of sensors and directions of movement in virtual environment.

図 6 方向指示操作実験の結果
Result of direction indication test.

ている。

4. Waraji の移動操作割り当てに関する比較実験

Waraji の評価を行うため、まず、仮想環境内において、実世界での移動動作と同様な移動操作方法を得るために、デバイスへの移動操作機能の割り当てに関する比較実験を行った。

4.1 実験の目的

ユーザが自然かつ直観的な操作を行うためには、デバイス以外にも、ユーザの動作とその動作による仮想環境の変化が自然なものでなければならない。

この実験では、自然かつ直観的であると考えられるデバイスへの操作割り当て 2 種類用意し、それらについて、直観性・操作性に関する比較実験を行った。比較を行う 2 つの操作割り当てを次に述べる。ユーザの操作と仮想環境での動作の対応を図 7 に示す。

両足操作 被験者は両足を使って操作を行う。右足では仮想環境での前後左右の移動を行う。具体的には、右足の前後方向への重心移動は、仮想環境内での視線の正面方向への前進および後退に反映される。同様に右足の左右方向への重心移動は、仮想環境内での視線方向は変わることなく、横歩きをしている様な状態で、左右に移動するように反映される。左足では、被験者の視線の変更を行う。左足の左右方向の重心移動は、仮想環境では視線の左右方向への回転として反映される。

図 7 センサの位置と仮想環境での操作方向の関係
Relation between position of sensors and direction of movement in virtual environment.

片足操作 被験者は右足のみを用いて操作を行う。右足の前後方向の重心移動は、視線正面方向の前進および後退として反映される。また、右足の左右方向への重心移動は、被験者の視線の左右方向への回転として反映される。

仮想環境の 2 次元的な変位には、平行移動と回転の 2 つがある。これらと、Waraji における操作との組合せは多様なものがある。しかし、Waraji の前後方向の操作は、前後方向への平行移動を割り当てるのが妥当であると考ええる。Waraji の左右方向の操作に関しては、左右方向への平行移動 (視点は変化しない) と、ユーザの視点の左右方向への回転の 2 つの割り当てが考えられる。両足操作では両方の割り当てを両足を使って実現している。片足操作の場合は、回転のみを実現している。

また、今回実験の対象とした操作方式は、3.1 節において説明した、局所的移動に関して考慮を行っている。歩行を行う際は、足に加わる圧力量が左右で大きく異なることになる。そのため、今回の実験ではどちらかの足に重心移動を行えば、重心移動を行った方向に曲がる、といったような操作割り当ては行わなかった。また、両足に対称的に操作割り当てを行った場合、前後方向の操作に関しては左右の足のどちらの足の出力を優先するかが問題となる。それらの事項を踏まえた上で、実験の対象とする操作方式を決定している。片足での操作は、ユーザにとって直観的であると思われる操作方法を考慮した。両足での操作は、視点方向への移動に加え、視点を変えずに移動を行うこともできるよう、左足は視点の回転を行うことにし、右足は視点を固定したまま 360° 方向に移動できるように操作割り当てを行った。

なお、ユーザの前後左右方向の移動速度は各センサが受ける圧力に応じて変化する。左右方向の回転 (視点変更) はセンサが受けた圧力によらず一定の各速度 (0.7rad/sec) で回転を行う。

4.2 実験概要

被験者が行う実験内容を次に示す。

図 8 実験に用いた仮想環境
Virtual environment for experiment.

表 3 アンケートの結果:() 内は分散値
Result of anquete.

質問	両足操作	右足操作
1. 操作は簡単でしたか?	1.25 (0.19)	3.80 (0.16)
2. 違和感なく操作できた と思いますか?	1.50 (0.25)	4.00 (0.40)
3. この操作方法は直観的だ と思いますか?	1.75 (0.19)	4.40 (0.64)
4. 使用後の疲労感は どうですか?	1.50 (0.25)	3.40 (0.24)

図 9 被験者の移動軌跡
Tracks of subjects' motion in virtual environment.

- (1) Waraji を装着し, CAVE⁷⁾ に入る.
 - (2) 操作方法にある程度慣れるように, 30 秒間自由に操作する.
 - (3) 30 秒の操作終了後, 仮想環境の中を目的とする地点まで移動する.
 - (4) 実験終了後, 表 3 に示すアンケートに回答する.
- 仮想環境は, 図 8 に示すような建物が並んでいるような環境である. 狭い空間でも正確に操作できるかを確認するため, ユーザは必ず建物の間を通り抜けて, ゴール目標である右上の建物まで進む. 実験は, 仮想環境に慣れた, 20 歳前半の男性 5 人を対象として各人 1 回のみ行った.

4.3 実験結果

表 3 はアンケートの質問に対し, 5 段階評価で回答してもらった結果を単純平均したものである. なお, 各質問の回答とも評価の高い方が 5, 逆に評価が低い方が 1 に対応している. また, 図 9 に移動の軌跡を表す. 図中, 被験者は左下からスタートし, 右上付近にある建物に向けて進んでいる.

4.4 考 察

表 3 を見ると, 明らかに右足のみを使用した操作方法が良い評価を得ていることがわかる.

1 番目の質問“操作は簡単でしたか?”では操作性に関しての評価であるが, 2 種類の方法の間で評価が明確に出た. 片足だけで操作を行う場合は, 操作性がかなり良かったという結果が出ているが, 両足操作ではすべての被験者が一様に, 操作が非常に不安定になってしまうと答えた.

操作が不安定になる理由として 2 つの原因が考えられる. 第一に両足を使用して操作することで, 被験者のバランスが取り難くなることが挙げられる. 日常生活において靴を履いている場合, 片足に重心を移動させたとしても,それほどバランスは崩れない. しかし, Waraji の裏面部分は, 被験者の重心動揺による影響をなくすために小さくなっている. すなわち被験者のバランスを保つためにある, 平面部分が通常の靴より小さい. そのため, 片足に重心を移動させようとするとき被験者は大きくバランスを崩してしまう. 第二に, 両足同時に入力を行おうとした場合, 思うような入力操作を行う事が困難であった.

2 番目の質問“違和感無く操作できたと思いますか?”に関する回答を見ると, 被験者は両足を使った操作では著しく違和感を感じていることがわかる. “両足を使用した場合, それぞれの足の機能が異なるのは違和感を感じる”とコメントを書いている被験者がいたが, 左足と右足で機能を分けることは, 片方の足ですべての動作を行うのに比べて大きく違和感を感じるようである. また, 右足だけで操作を行う場合は視点方向に直進しながら同時に右や左に方向を変えて進むことができるため, 違和感のない操作が可能になっている. 3 番目の質問“本デバイスは直観的だと思いますか?”では, 2 つの操作体系の間で最も大きな差が生じた. これは 2 番目の項目で書いた内容と似ているが, 右足と左足で機能が異なるものは被験者から見た場合, 直観的ではないという結論に達する. しかし, 右足または左足にすべての操作を集中し, なおかつ被験者の重心移動の方向と同じ方向に移動または回転を行う場合は非常に直観的であると感じられるようである.

4 番目の質問“使用後の疲労感はどうですか?”では, 両足を用いた場合に上記の 3 つの項目で明らかになった操作の不安定さによって, 疲労感が大きいという事を示している. 被験者の中には両足を用いて操作を行った際, 平均 2 分くらいで操作を終えるところ, 5 分近く掛かった者もいた.

4.5 まとめ

本実験では, 重心移動を用いた場合において, 両足を用いた操作よりも右足のみを用いた操作の方がより簡単であり, 直観的であることが明らかとなった. Waraji は一事例に過ぎないが, 立った状態での足の操作において,

図 10 実験用の道
A road for experiment.

両足への異なった操作を割り当てるのが大きな負担になることを示していると考えられる。なぜなら、それぞれの足に同時に異なった方向へ体重をかける必要が生じ、不自然な姿勢を強要することになるからである。

さらに、現在の Waraji の形状では両足を用いた操作はユーザにとっては快適どころか、むしろ苦痛になることがわかった。片足での操作でも、多くのユーザはそれほど快適には操作ができていない。例えば移動速度に関しては、本実験では受けた圧力の大きさを速度に変えているため、力を緩めると急に移動が止まってしまう。また、両足操作程でないものの、操作後の疲労が大きいことも問題である。

ユーザが快適に操作を行うには、ソフトウェアも含め更に検討の余地があるといえる。

5. 手を用いたインタフェースとの比較実験

次に Waraji を用いて、代表的な手を用いた操作デバイス (joystick) との操作性に関する比較実験を行った。joystick は仮想環境でよく使用されている入力デバイスであり、それだけに操作性に優れているものと考えられる。実験の目的は Waraji を、そのような優れた、手を用いたインタフェースと比較することで、操作性や仮想環境に対する没入感の度合などを評価するためである。被験者が行う実験内容を次に示す。

- (1) 操作デバイスを持つ、あるいは装着する。
- (2) ある程度操作デバイスに慣れるように、30 秒間自由に操作を行う。
- (3) その後、図 10 左に示すコースを、図 10 右にある丸からスタートして、仮想の円盤の上を 1 周するように、デバイスを用いて移動操作を行う。
- (4) 円盤を 1 周後、表 4 のアンケートに回答する。

実験に使用した道は幅約 4m、円周約 100m である。被験者は、前回の実験と同様、仮想環境に慣れた 20 歳前半の男性 5 人を対象として、CAVE およびモニタ画面前で 1 回ずつ操作を行った。なお、モニタ画面の前でも実験を行ったのは、CAVE に限らず、モニタで提示されるような、より一般的な仮想環境システムにおいても、Waraji が有用であるかどうかを確認するためである。

また、Waraji の操作については、前回の実験結果に基づき、片足による操作を行った。重心移動による速度変

表 4 アンケートの結果:() 内は分散値
Result of anquete.

質問	A	B	C	D
1. 操作は簡単でしたか?	3.60 (1.04)	3.00 (0.00)	3.60 (1.04)	3.80 (1.36)
2. 違和感なく操作できた と思いますか?	3.00 (0.80)	3.40 (0.24)	2.40 (1.04)	3.80 (2.16)
3. 本デバイスは直観的だ と思いますか?	3.00 (0.80)	3.20 (0.56)	3.20 (0.56)	4.00 (0.80)
4. 使用後の疲労感は どうですか?	3.80 (2.16)	3.40 (0.24)	2.80 (1.36)	2.60 (0.64)

化は前回と同様である。joystick に関しては機器の特性上、前後方向へ stick を傾けた場合、3.5m/sec の速度でユーザの視線方向の前後に進行する設定にし、左右方向へ joystick を傾けた場合は、一定の角速度 (0.7rad/sec) で回転を行う。多少条件が異なってしまいが、joystick, Waraji 共に、ユーザが与えた力を速度に反映するという点では同じである。

5.1 実験結果

5 人の被験者に対して実験を行った。実験の結果を表 4 に示す。なお、表中の記号の意味は以下の通りである。

- ・ A … モニタ前で joystick を使用
- ・ B … モニタ前で Waraji を使用
- ・ C … CAVE 内で joystick を使用
- ・ D … CAVE 内で Waraji を使用

表 4 の結果は、前回同様アンケートの結果 (5 段階評価) を単純平均したものである。前節の実験アンケートと同様、評価の高い方が 5、評価の低い方が 1 に対応している。

5.2 考察

表 4 に示した 1 番目の質問から、Waraji が現在使用されているデバイスと比較してもさほど変わらない操作性を持っていることがわかる。joystick は前述したように、仮想環境で入力を行うインタフェースとしては操作性で優れている。アンケートから、Waraji は joystick と遜色ない操作性であるとの結果が得られたことで、Waraji の様な足を用いた入力インタフェースは充分有効なものであるといえることができる。

第 2 番目の項目では、joystick による、仮想環境中のユーザの移動操作において、何らかの操作に関する違和感を感じていることがわかる。ユーザはモニタを見ながら操作を行うため、視野が完全には仮想環境に没入しないからである。このため、ユーザは仮想環境に置ける自分の位置を明確に捉えることができない。一方、CAVE で Waraji を使用して操作を行った場合、ユーザはまさに自分自身が仮想の道に立って移動している感覚を得ながら操作を行うことができるため、違和感を感じることは少ない。これは普段我々が移動の手段に使用しているその足を用いて、仮想環境内でも移動を行うことができるからである。仮想環境で移動を行う際には、ユーザの足元付近の映像が、没入感に非常に大きく係わっていると考

えられ、本実験の例では、同じ足を用いた例(BとD)で評価に差があるということによって示されている。

3番目の項目は、実世界でのユーザの動作が、仮想世界での操作に反映されているかどうかの質問である。これはどちらの方が“移動する”という動作に対して直観的な操作であるかを示している。joystickとWarajiの操作とその操作の仮想世界への反映方法は同様であるが、実際には手と足という違いがあるため、joystickに比べてWarajiの方がより直観的な操作デバイスであるといえる結果になった。特に、CAVEにおける操作の比較では、床面にも道が投影され、自分の位置が明確にわかり、また足を使つての移動であるため、より一層直観的であるということがこの表から考えられる。

4番目の項目は、joystick、Warajiを使用した後のユーザの疲労度を示すものである。この項目を見ると、モニタ前・CAVEを問わずWarajiの方が数値が小さくなっている。これは全般的にWarajiの方が使っている時に疲労しやすいことを示している。

この実験から、Warajiがjoystickとほぼ同等あるいはそれ以上に移動操作に向けたインタフェースであることが明らかとなった。joystickには疲労面から操作性で若干劣るものの、今回の実験での没入感の高さや直観性の高さを考慮すると、joystickに代わるユーザの仮想環境移動インタフェースとして充分使用することができると考えられる。疲労の大きさに関してはまだ改良の余地があるが、少なくとも、手を移動操作以外の操作に使用する必要がある場合、Warajiを用いることで足で移動動作を行うことは可能であると考えられる。

6. む す び

本論文では、足を用いた重心移動によって仮想環境を移動するインタフェース“Waraji”を試作した。

まず、重心移動を用いた両足同時の操作では、ユーザのバランスが極めて不安定になることがわかった。次に、現在市販されている仮想環境のための入力インタフェースと、操作性や没入感などについての比較実験を行い、Warajiが移動のためのインタフェースとして十分な能力を有することを示した。これによって仮想環境内のユーザの移動には、現在使用されている、手を用いたインタフェースを使用する場合と、さほど変わらない操作性、および仮想環境に対する没入感を感じることができるといふ結果が得られた。

仮想環境においては、手に装着したデバイスを用いて仮想環境とのインタラクションを行うことが多い。そのため、仮想環境における操作を他の部位に分散させることで、仮想環境での作業のしやすさや、没入感を増やすことが考えられる。今後はWarajiを他のインタフェースと同時に利用し、複合インタフェースを実現した場合の各インタフェース間の機能割り当てについて検討を行う予定である。

Warajiを試作するに当たって、助言を下された、東京工業大学大学院情報理工学研究科 亀井研究室の森 正人に、心から感謝の言葉を述べさせていただきます。

〔文 献〕

- 1) 西野 浩明, 凍田 和美, 宇津宮 孝一: “オンライン学習機能を備えた対話型両手ジェスチャインタフェース”, 信学論, **J81-D-II**, 5, pp.897-905 (1998)
- 2) Masahiro Ishii, Yi Cai and Makoto Sato: “Integration of Binocular Stereopsis and Haptic Sensation in Virtual Environment”, 信学技報, **IE97-134**, pp.41-46 (1998)
- 3) 橋本 直己, 中嶋 正之: “CAVEにおける直観的操作手法と動的自由度制御を用いた3次元モデル”, 日本バーチャルリアリティ学会論誌, **4**, 3, pp.487-494 (1999)
- 4) 岩田洋夫, 吉田陽子: “無限平面を用いた仮想歩行装置”, 日本バーチャルリアリティ学会第2回論文集, pp.254-257 (1997)
- 5) Hiroo Iwata and Takashi Fujii: “VIRTUAL PERAMBULATOR: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment”, IEEE Proceedings of VRAIS'96, pp.60-65 (1996)
- 6) 小林 稔, 志和 新一, 北川 愛子, 市川 忠嗣, 一之瀬 進: “体重移動によるサイバースペース内移動インタフェース”, 信学論, **J81-D-II**, 5, pp.933-943 (1998)
- 7) C.Cruz-Neira, D.J.Sandin, T.A. DeFanti, R.V.Kenyon and J.C.Hart: “Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE”, Computer Graphics(Proceedings of SIGGRAPH'93), ACM SIGGRAPH, pp.135-142 (1993)
- 8) 村瀬 雅哉, 木島 竜吾, 小嶋 丈夫: “足装着型デバイスによる歩行情報システムの構築”, 第14回 Human Interface Symposium 論文集, pp.131-136 (1998)
- 9) 白井 曉彦, 佐藤 勝, 久米 祐一郎, 草原 真知子: “ファンタスティック・フントム・スリッパ”, 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, T1-2 (1997)
- 10) 平沢 彌一郎: “日本人の直立能力について”, J. Anthropol. Soc. Nippon, **87**, 2, pp.81-92 (1979)
- 11) Hajime Takada and Motoki Ohba: “Postural Stability of human body gazing at moving pictures”, J. Acoust. Soc. Jpn.(E) **19**, 1, pp.33-38 (1998)
- 12) Shumin Zhai, Paul Milgram: “Human Performance Evaluation of Manipulation Schemes in Virtual Environments”, Proc. of VRAIS'93, pp.155-161 (1993)

増野 智経 1999年、東京工業大学工学部情報工学科卒。現在、東京工業大学大学院理工学研究科 修士課程に在学中。バーチャルリアリティ、コンピュータビジョンの研究に従事。学生会員。

齋藤 豪 1994年、東京工業大学工学部情報工学科卒。1996年、同大学院修士課程修了。1999年、同大学院博士課程修了。同年、同大精密工学研究所助手。画像処理、コンピュータグラフィックスの研究を行う。博士(工学)。

高橋 裕樹 1990年、東京工業大学工学部制御工学科卒。1992年、同大学院博士前期課程(物理情報工学専攻)修了。1994年、同大学院博士後期課程中退。同年、同大工学部情報工学科助手。現在、同大学院情報理工学研究科助手。ニューラルネットワーク、Genetic Algorithmなどの研究に従事。

中嶋 正之 1969年、東京工業大学工学部電気工学科卒。1975年、同大学院博士課程修了。同年、同大勤務。1983年、同大情報工学研究施設助教授。1992年、同大電気電子工学専攻教授。1994年、同大学院情報理工学研究科教授。現在に至る。コンピュータグラフィックス、コンピュータアニメーション、画像処理の研究に従事。工学博士。1996年、テレビジョン学会業績賞受賞。1998年、情報処理学会ベストオーサーズ賞受賞。正会員。