

Virtual ISU: 座位姿勢での擬似歩行運動による 歩行感覚提示インタフェース (第 3 報)

大島登志一^{†1} 枝元螢^{†1} 舘脇望^{†1} 柴田龍輝^{†1}

本論文では、両足を動かすことによる歩行運動感を高く維持したまま、座位姿勢での歩行感覚提示インタフェースを提案する。典型的なロコモーションインタフェースは、立位姿勢で可動床や滑走面上で実際に歩行動作をする形式である。このような形式のロコモーションインタフェースでは、実利用上、安全面の配慮が必要であり、設置場所の制約もある。本研究では、椅子型デバイス Virtual ISU (バーチャルイス) を開発し、座った状態で、楽に安全に、バーチャル空間内の歩行を実現する。Virtual ISU の座面に圧力センサを配置し、両足大腿部の上下運動を検出することにより、方向や速度などの歩行状態を推定する。足に装置を装着したり、床にセンサ類を配置したりする必要もなく、子供からお年寄りまで、家庭でも安全かつロバストに使用することが可能である。

Virtual ISU: A Locomotion Interface for Immersive VR Gaming in Seating Position (3)

TOSHIKAZU OHSHIMA^{†1}
HOTARU EDAMOTO^{†1} NOZOMI TATEWAKI^{†1} RYUKI SHIBATA^{†1}

This paper describes a new locomotion interface which is suitable for immersive Virtual Reality (VR) gaming in seating position. Typical locomotion interfaces for VR experience are used in standing position, and a user actually walk on a sliding surface or moving floor. When the typical device is used, there needs consideration of safety and installation space. In our approach, a user can walk around in a virtual space while seating on a chair type device, Virtual ISU (Intuitive Striding Unit). Virtual ISU is equipped with pressure sensors on its seat surface. The sensors detect movement of legs of the user. Walking direction and speed are estimated from the movement of legs and body. It is not necessary to attach sensors to user's body or floor, and Virtual ISU can be used for people of wide age at home.

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) におけるロコモーションインタフェースでは、実際の歩行動作により、高い没入感でバーチャル空間の移動を行う。典型的な従来方式では、立位姿勢両足で実際に歩く動作を行い、移動量を接地面の逆方向への移動や滑りによって相殺している [1] (図 1(a))。VR の文脈では、感覚モダリティの整合性の観点から実際の歩行動作を自然に行えることを重視している。一方で、Oculus Rift[9]などパーソナルユースを主な対象とした廉価な VR デバイスが注目を集めており、家庭用ゲーム機で身体動作をインタフェースとして利用する流れと共に、VR 体験の民生応用への普及が進みつつある。

本研究は、このような状況を背景として、HMD (Head-Mounted Display; 頭部装着型表示装置) を装着する没入型の VR 体験を前提に、一般のユーザが自宅などで利用するのに適したロコモーションインタフェースを実現することを目的とする。立位で歩行動作をする形式のロコモーションインタフェースでは、家庭での利用を想定すると、安全

面の配慮と設置場所の制約などが考えられる。

本研究では、両足を動かすことによる歩行運動感を高く維持したまま、座位姿勢で歩行感覚を提示する方式 Virtual ISU (Intuitive Striding Unit) 「バーチャルイス」を提案する。

(図 1(b))。本手法では、通常の椅子の座面に圧力センサなどを配置し、両足大腿部の上下運動を検出することにより、自然な歩行動作を入力することを可能とする。

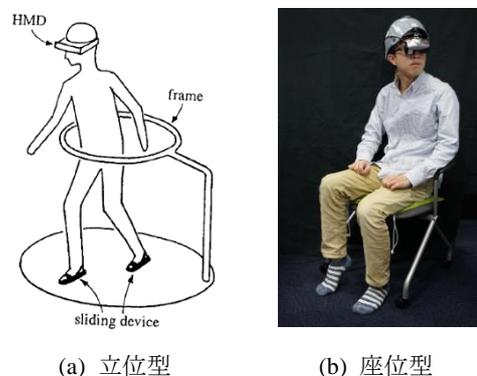


図 1 ロコモーションインタフェースの体験形式
Figure 1 Styles of locomotion interface usage

^{†1} 立命館大学 映像学部
College of Image Arts and Sciences, Ritsumeikan University

Virtual ISU では、足や身体に装置を装着したり、床にセンサ類を配置したりする必要がない。また、座った楽な姿勢で体験でき、可動する機械機構はなく、子供からお年寄りまで、家庭でも安全に気軽に使用できることが期待される。著者らは、本研究に関する第2報[2]においてプロトタイプシステムについて報告するとともに、国際会議 Laval Virtual 2016 のデモセッションにて展示実験を行った[3]。本報告では、本手法の概要を改めて示すとともに、先の展示実験を踏まえた方式の改良について述べる。

2. 関連研究

自然な歩行動作を実現するためには、一般的に大掛かりな装置機構となる[4][5]。代表的な研究事例としては、岩田らの Virtual Perambulator [1]や GaitMaster [6]、歩行面が全方位に循環するトーラストレッドミル [7] などがある。Virtual Perambulator およびその基本機構に基づいた民生用市販製品 Cyberith Virtualizer [10]や Virtuix Omni [11]では、足裏と歩行面の滑り摩擦を利用し、複雑な機構を排しているが、それでも 1.5m 四方の運用スペースは必要そうであるし、安全のためハーネスなどを装着する。

雨宮らの足踏み式空間移動インタフェース (WARP)[8]では、股関節の角度を検出して足踏み運動から歩行速度の推定を行っている。これは本研究と同様の趣旨で大掛かりな機構なく、簡便に歩行に近い動作で移動できる方式を目指すものである。異なる点としては、WARP では従来の VR 的文脈での動作のリアリティを重視している一方で、本研究では自然な歩行動作ができることは重視しつつも、前述のような観点から、PC ゲームや家庭用ゲームなどでの利用において総合的に好適な方式を目指している点である。

3. 座位型ロコモーションインタフェース

ホームユースの観点では、没入感の高い体験を重視しつつも、立位型の従来方式が必ずしも適さないケースが想定される。すなわち、以下の3点が課題となると考えられる。

1) 設置と運用スペース：立位で歩行動作を行うので、装置自体と安全対策を含めて設置運用のための一定の占有スペースが必要とされる。住居環境によっては、生活空間の割愛が問題となる。

2) HMD との併用における安全性：転倒や周囲環境との接触を防止するなどの安全対策が必要とされる。前述の市販製品では手すりや手すり対策や、腰や脚付け根回りにタイトなハーネスを装着する。腰へのハーネス装着は、脱着の手間がかかることのほかに、服装の適否や、個人により抵抗を感じることも考えられる。

3) 身体疲労と運動能力：一般に PC ゲームや家庭用ゲーム機では、1 時間以上連続してプレイする状況も珍しくない。身体動作による疲労感自体は、リアリティの要素として本質的に重要である。しかしその一方で、広大な空間を

ひたすらに駆け回るような種類のゲームで、その身体疲労レベルを忠実に再現するようなことは、当該ゲームの趣旨には必ずしも添わないとも考えられる。通常の VR の文脈とは異なり、非現実体験を楽しむ類のゲーム用のインタフェースとしては、実際の運動よりも負荷の少ない動作による入力が望ましいと考えられる。

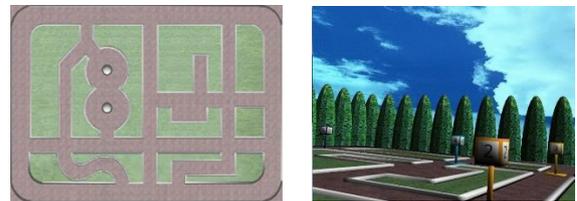
また、概して立位型では、方式の本質上、前提として両足が健常であって自立でき、普通に歩行動作できることが要求される。前述の製品事例では、むしろバランス感覚が良く順応力のあるユーザに適する側面もある。

これらの課題を鑑み、また対象とするユーザ層をより幅広く視野に入れ、本研究では座位姿勢でのロコモーションインタフェースを提案するにいたった。試作したロコモーションインタフェース Virtual ISU では、椅子の座面にクッション型の圧力センサモジュールを設置し、大腿部の上下運動を検出することによってバーチャル空間内での歩行動作を実現する。

上記の課題(1)スペースの問題に関しては、通常の椅子を利用し必要時のみ設置すればよいので、ことさらに専用スペースを必要としない。(2)安全性については、着座する中で転倒や衝突の心配はない。(3)運動能力と身体疲労について、運動能力としては背もたれに寄りかかってでも着座することができ、両足大腿部を上下に動かすことができれば、体験することが可能である。脚力や脚の膝以下に何らかの不都合があっても自立もしくは歩行に差し支える状況でも、大腿部さえ動かせれば機構上利用可能と考えられる。また、操作感度と歩幅の調整は任意に行うことができるので、身体能力や利用目的に合わせた負荷体験が可能である。

4. 前システムの評価実験と改良点

先の第2報[9]の試作システムを用いて LavalVirtual2016 ReVision のデモ展示において評価実験を行った[3]。実験内容は、図 2(a)に示すようなテストコースのチェックポイント通過タイムを計測するものである。



(a) コースレイアウト (b) 主観視点映像

図2 バーチャル歩行テストコース

Figure 2 Virtual Walking Test Course

5 日間のデモで 326 名の体験者があった。評価アンケートでは、「歩行操作性」「旋回操作性」「総合評価」の3点についての5段階評価と自由記載のコメントを収集した。歩行操作性については平均 4.03/標準偏差 0.72、旋回操作性

については平均 3.74/標準偏差 0.90, 総合評価では平均 4.17/標準偏差 0.67 であった. 総じて良い評価は得られたと考えられるが, 旋回操作性は歩行操作性に比して評価が低くばらつきも大きく, またコメントにおいても改善の必要性が示唆された.

以下のようにアンケート結果と観察を踏まえて改良を図ることとした. なお, いくつかの項目については, 椅子をガス圧で高さを調整できる回転椅子とすることで改善対策の選択肢が増える部分もあるが, 今回はどこにでもある椅子を使うという前提にこだわることとした.

4.1 多様な体格への対応

海外での一般にも公開している展示会であったということもあり, 身長 120cm 程度の子供から 190cm を超える大柄な男性まで, 体験者の体格の差は非常に大きいものであった. クッション型の圧力センサモジュールは思いのほかロバストに機能し, 相当な体重と思われる体験者でも利用可能で, 故障の発生もなかった. しかしながら原理的に膝下が長くクッションと大腿部との間に空間のできる長身の体験者では, 意識的に脚でクッションに圧力をかける必要があった. 以上を鑑み, 厚みが調整できるようにすることと, 圧力センサ部分をより適切な部位に容易に当てられるようクッションの形状とサイズを変更することとした.

4.2 見回しと旋回動作の改良

座位姿勢での歩行運動は足踏みであって, 擬似的な運動にすぎない. また, 座位では上半身の回転動作が制約されるため, 見回し動作を補完するための旋回動作が要求されている状況も明らかになった. そのため, 座位姿勢特有の状況をより詳細に分析し, 見回しと旋回動作とを改良することとした.

立位姿勢で左右に大きく見回す場合, 両足を床に固定したままでも身体全体をひねることによって, 真後ろでも視界に入れることができる. さらに, 足を自然に踏みかえて体ごと向きを変える. しかし, 座位姿勢では腰が座面上に固定されるため, 見回し角度が制限され, より頻繁に旋回動作が必要となる. その旋回動作にしても, 旋回方向を向きつつ足踏み動作を行うこととしたが, その場で足を踏みかえて向きだけを変える「方向転換」は歩行しながら旋回する動作とは別の仕組みと考えるべき必要性が見られた.

以上により, 以下のようなアルゴリズムやシステムの改良を試みることにした.

(1) 見回し範囲の拡大

座位姿勢での左右見回し範囲の制約を緩和するため, 頭部の回転角に応じて, バーチャル空間での視界方向の変位を非線形に大きく誇張する.

(2) 旋回運動と方向転換

一定角度以上頭を回したときは, その場での方向転換を意図していると判断し, 足踏みを行わなくても, 自動的に向きを変えるようにする.

(3) HMD の広画面角化

実験ではチェックポイントを探すために頻繁に見回し行動が観察された. 見回しや旋回に関わる操作性には視野の広さも大きく影響すると思われるため, より画面角の大きい HMD を採用することとする. また併せて装着性の向上にも配慮することとする.

(4) ヘッドトラッカの変更

ジャイロセンサを用いて実験を行ったが, 体験者の頻繁な見回し動作に伴うドリフトによる不具合と考えられる状況も見られたため, 6 自由度のヘッドトラッカを用いる. 本研究はパーソナルユースを目的とするものであるが, 基本的な方式の有効性を確認するため, 一旦廉価な民生品にこだわらないこととする.

4.3 歩行運動の負荷調整

だれでも体験できるという訴求点であったが, 実際には比較的強度の高い運動となった状況が確認できた. 中には, 一週間分の運動をしたという感想や, リハビリに使えるという意見もあった. 疲労感については総じて好意的に評価されたものの, 運動負荷の高さから研究目的との乖離の懸念や, 負荷の調整機能を望むコメントが多く寄せられた.

多様な運動能力のユーザや利用目的に応じて, 操作感度とバーチャルな歩幅の調整を行う機能を実装する.

4.4 多感覚的なフィードバック

擬似的な歩行動作をバーチャル空間での歩行移動に転換する上で, その身体動作の不整合を補強して没入性を向上させる仕組みとして, 音響の工夫や力触覚的なフィードバックの併用を検討する.

4.5 コンテンツ面での工夫

今後本手法の有効性を十分に活用しうる応用分野の魅力的なアプリケーションを示す必要がある. 機能検証用のバーチャルテストコースにしても, グラフィックスの質の改善やコースシナリオの工夫を検討する.

5. 実験システム

5.1 システム構成と試作デバイス

Virtual ISU は, 図 3 に示すように, PC, 6 自由度ヘッドトラッカ (Polhemus, FASTRAK), HMD, マイクロコントローラ (Arduino), 圧力センサモジュールから構成される.

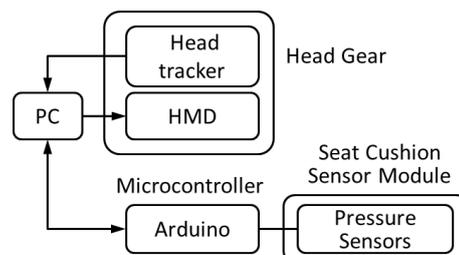
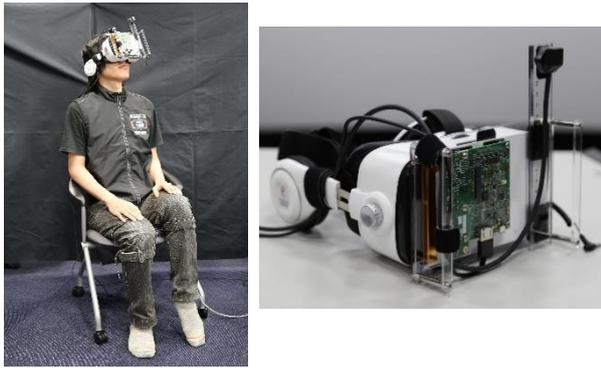


図 3 システム構成図

Figure 3 System Configuration



(a) 体験の様子 (b) 自作HMD

図4 Virtual ISU システムの外観

Figure 4 Appearance of the system

図 4(a)に本システムを体験している様子を示す。前システムでは、HMD として視野角が対角 40 度のもの (eMagin, 3DVizor Z800) であったが、今回視野角の拡大を図った。図 4(b)に示す HMD は、スマートフォン用の VR ゴーグルアタッチメントを改造し、7 インチの液晶ディスプレイユニット (シャープ製 IGZO LCD, 解像度 1920×1200) を組み込んでいる。円形の視界で画角は約 110 度、有効画素数は縦横各 800 画素程度である。視界周辺に歪みはあるが、画角と解像度の点では改善されている。また、6 自由度のヘッドトラッカとして磁気式位置姿勢センサ (Polhemus, Fastrak) を使用し、そのレシーバを HMD に装着している。

図 5 にクッション型デバイスの外観と内部の圧力センサの様子を示す。両足の大腿部の下にそれぞれ 1 つずつ圧力センサユニットを配置している。各圧力センサユニットは 3 つの PTF (Polymer Thick Film) 圧力センサ (Interlink Electronics, FSR402) から構成される。圧力センサユニットは、図 6 に示すように、緩衝性の天然スポンジゴムと高反発弾性の EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) スポンジゴムの二層で挟んでおり、センサ本体への圧力伝達を調整している。前試作では、圧力変化の平滑化を意図して低反発性ウレタンフォームを用いたが、必要以上に圧力を吸収分散してしまうことが明らかになり変更を行った。

脚を上下するときの圧力センサの値を分析し、ステップ運動 (足踏み運動) を検出する。これらの状態に基づいて、ユーザの歩行動作を推定する。



(a) デバイス外観 (b) 内部の圧力センサ

図5 圧力センサクッション

Figure 5 Cushion device

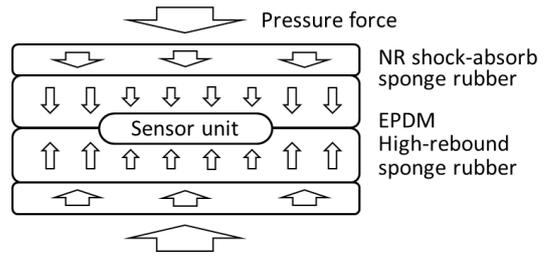


図6 クッションデバイスの構造

Figure 6 Structure of cushion device

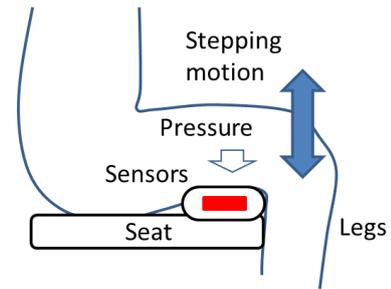


図7 ステップ運動の検出

Figure 7 Detecting stepping motion

前のバージョンでは、さらに追加の 2 個のセンサによって身体の左右重心移動を検出し、旋回動作に利用するとしていたが、実験にて有効性が認められなかったため、機能から外すこととした。

5.2 歩行動作推定のアルゴリズム

2 つの圧力センサユニットの値から歩行状態を推定するアルゴリズムの基本的処理は下記の通りである。

- 1) 歩行速度: 左右の大腿部膝側の圧力センサで検出した両大腿部の上下運動と頭部方向によって歩行速度を求める。
- 2) 旋回角度: 頭部の方向と基本歩行速度から、左右の旋回角度を算出する。
- 3) 頭部の見回し角度: 計測された頭部の方向を元に、バーチャル空間での見回し角度を算出する。

このような考え方にに基づき実装したアルゴリズムでの処理の流れを図 8 に示す。

図 8 では A, B, C, D, E の 5 段階の処理を行う。

- 処理 A: 右脚センサ値から右脚ステップ運動成分を求める。
- 処理 B: 左脚センサ値から左脚ステップ運動成分を求める。
- 処理 C: 左右脚ステップ運動成分と頭部の方位角を用いて前進移動量を求める。
- 処理 D: 頭部の方位角と左右脚ステップ運動成分を用いて旋回角度を求める。
- 処理 E: 頭部の方位角を用いて、視界方向を求める。
- 処理 F: ユーザのバーチャル空間での位置と方向とを更新する。位置と方向は、共有メモリ経由あるいはソケット通信でアプリケーションプログラムに渡される。

処理 A と B はマイクロコントローラにて処理される。

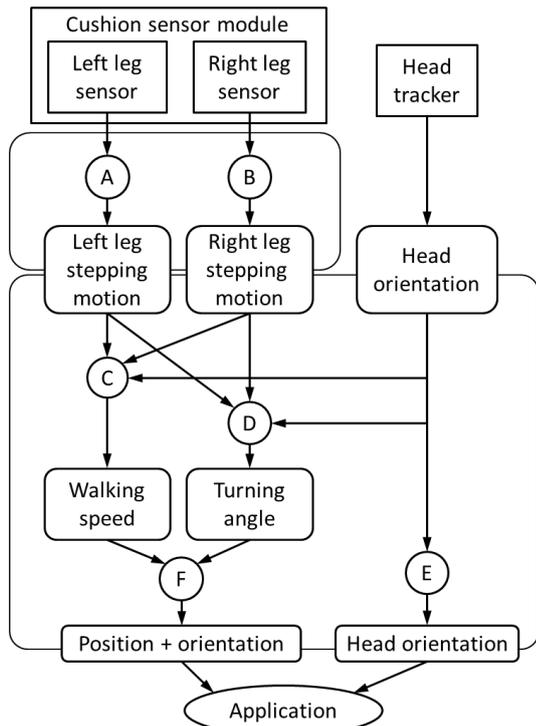


図 8 処理の流れ
Figure 8 Flowchart

図 9 に前記の処理により推定した歩行の足跡を示す。三角形の領域は視野方向を表し，上部のグラフは圧力センサによる足の上下動を示す。

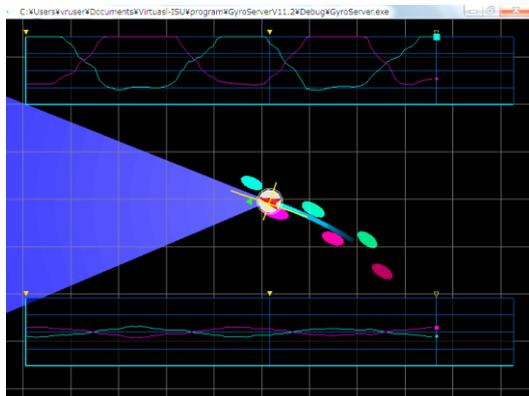


図 9 歩行運動状態のグラフ
Figure 9 Monitor graph of walking

進む方向を変える旋回操作の推定処理について説明する。現実世界の歩行動作では，歩きながら周囲を見回すことが自然に行われる。すなわち，本来歩行動作と頭を動かして周りを見る動作とは独立した行動である。しかし実験を重ねる中で被験者からのフィードバックで明らかになったのは，旋回操作を行う際には，明示的に意図して，旋回したい方向に頭部正面を向ける傾向が強いということであった。そのため頭の向きを旋回操作の主な要因とすることとした。実際の運動と異なる課題は，頭部運動が歩きながら見回し

ているのか旋回の意図であるのかの識別である。今回採用した方式は，定性的には図 10 に示すように，頭部の方位角の変位が小さいときには，見回し動作を優先して旋回速度を小さくし，頭部の方位角の変位が大きときには，旋回動作を優先して旋回速度を大きくするとした。また，頭部の方位角が正面方向から一定以上大きくなった場合には，足踏みなしでも自動的に方向転換することとした。各カーブのモデル化については，定性的な挙動の有効性を確認しながら試行錯誤を行っている。

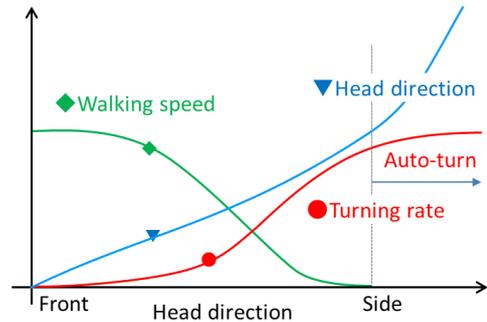


図 10 頭部の方向と旋回角度・歩行速度
Figure 10 Head rotation and angler speed of turn

5.3 実験用バーチャルテストコース

Virtual ISU の機能を評価するために，図 11 に示すような迷路型の実験用バーチャルテストコースを制作することとしている。前回の実験では，様々な道路の形状を体系的に取り込んでいる自動車教習所のコースを参考としたテストコースを用いたが，コースを外れることを許す仕様としたこともあって，意図したコース形状の効果は確認できなかった。コースを外れないよう衝突判定を設定するとしても，視覚的には段差を乗り越えても歩くことができそうに感じるので，ルートを厳しく拘束する違和感否めない。そのため，新しいテスト用コンテンツとしては，先の見えない迷路型とすることとした。体験内容としては，このコース上に順路を示すフラグをチェックポイントとして配置し，それらを取得しながらゴールまで向かうものとする。EC2016 での展示実験を予定している。

なお，コースの設計にあたっては，一般的な建物の廊下程度の幅を想定し，建築基準法施行令第 119 条「廊下の幅」に基づき，病院・共同住居の廊下の幅を参考とする。両側に居室がある場合の廊下の幅である 1.6m と，それ以外の廊下の幅である 1.2m を通路の幅として採用する。

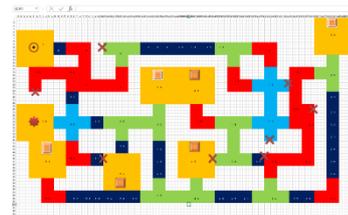


図 11 迷路型テストコース
Figure 11 Virtual maze for test

6. まとめと今後の予定

座位型ロコモーションインタフェース Virtual ISU のプロトタイプシステムの評価実験を行い、考察を踏まえた改良について報告した。本システムの展示実験を EC2016 にて実施する。その結果に基づき、さらに歩いて移動することの必然性を活かしたアプリケーションシステムの事例開発を行いながら実験と改良を重ね、本座位型ロコモーションインタフェースの有効性を検証していく。アプリケーションの目的に集中する中で、意識せずに移動操作ができる自然なインタフェースであることが試されるものを事例案として検討したい。

Virtual-ISU に必要な運動能力としては、背もたれに寄りかかってでも着座することができ、両足大腿部を上下に動かすことができれば、体験することが可能である。脚力や脚の膝以下に何らかの不都合があつて自立もしくは歩行に差し支える状況でも、大腿部さえ動かせれば機構上利用可能と考えられる。また、操作感度と歩幅の調整は任意に行うことができるので、身体能力や利用目的に合わせた負荷体験が可能である。立位の歩行がむずかしい状況でのバーチャルな歩行体験の提供や、フィジカルなりハビリにも有効である可能性があると考えられる。また、車両や航空機内の座席から動けない状況など、狭小な空間でいわゆるエコノミー症候群の予防や、精神的ストレスの軽減にも適用しうる可能性もある。

デバイスの完成度を上げることと併せて、ゲームなどの娯楽用途以外でも、発展的な応用を検討することとしたい。

謝辞 本プロジェクトでの開発および展示実験に協力いただいた立命館大学映像学部の大島研究室各位、特に本プロジェクトのサポートメンバー(沖末翔馬氏, 水谷圭介氏)に謝意を表す。本研究は、JSPS 科研費 24220004, 16K00288 の助成により行われた。

参考文献

- 1) Hiroo Iwata: VIRTUAL PERAMBULATOR: A novel interface device for locomotion in virtual environment, Proc. of VRAIS'96, pp. 60 - 65 (1996)
- 2) Virtual ISU: 座位姿勢での擬似歩行運動による歩行感覚提示インタフェース (第2報), 石原大貴, 北野貴士, 柴田龍輝, 大島登志一, インタラクション 2016 論文集, 3B24, pp. 867 - 871(2016)
- 3) Virtual ISU: Locomotion interface for VR gaming in seated position, Toshikazu Ohshima, Hiroki Ishihara and Ryuki Shibata, VRIC'16: Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference, DOI: 10.1145/2927929.2927941 (2016)
- 4) 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)
- 5) Harrison P. Crowell III, Jim A. Faughn, Phuong K. Tran, Patrick W. Wiley: Improvements in the omni-directional treadmill: summary report and recommendations for future development, Army Research Laboratory, ARL-TR-3958 (2006)
- 6) 岩田洋夫, 中泉文孝: 凹凸面を呈示するロコモーションインタフェース GaitMaster, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 5, No. 2, pp. 863 - 866 (2000)
- 7) 岩田洋夫: 全方向無限平面を用いたロコモーションインタフェース, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 5, No. 2, pp. 853 - 862 (2000)
- 8) 雨宮慎之介, 八木寿浩, 塩崎佐和子, 藤田欣也, 渡部富士夫: 足踏式空間移動インタフェース (WARP) の開発と評価, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 6, No. 3, pp. 221 - 228 (2001)
- 9) Oculus Rift, <https://www3.oculus.com/en-us/rift/> (2016年8月10日閲覧)
- 10) Cyberith Virtualizer, <http://cyberith.com/product/> (2016年8月10日閲覧)
- 11) Virtuix Omni, <http://www.virtuix.com/> (2016年8月10日閲覧)