

# 歩行による状態変化を考慮した仮想壁面力覚提示システム

ウィアンスイマ・ポンチャイ\*<sup>1</sup> 藤田 欣也\*<sup>1</sup> 本多 庸悟\*<sup>1</sup>

## A Walk-Through-Compatible Virtual Wall Haptic Display System

Pornchai Weangsima\*<sup>1</sup> Kinya Fujita\*<sup>1</sup> and Tsunenori Honda\*<sup>1</sup>

**Abstract** – The objective of this study is to develop a virtual wall haptic display system that is compatible with walk-through interface device for a fire escape simulator. The encountered-type haptic device combined with locomotion interface device allowed the user to touch a large virtual wall continuously while walking. However, it caused some difficulties in the control of the panel that is the end-effector of the haptic device to display the virtual wall. The integrator output adjustment of the position controller was proposed for the smooth switching from the slip state force control to the stick state position control. The dynamic control gain adjustment was also introduced to attain the rapid wall panel acceleration that is to represent the hand stopping in the virtual space. The experimental evaluation demonstrated the successful representation of the frictional force in slip state, the stationary virtual wall in stick state and rapid and smooth state switching.

**Keywords** : Virtual wall, Haptic display, Locomotion interface, Relative motion, Encountered-type

### 1. はじめに

現代建築物においては、火災発生時には煙によって著しく視認性が低下する。このような状況において、避難経路を認知しながら非常口まで避難することは容易ではない。視認性が低下した状況下での避難行動に関する実験においては、95%の被験者が手探りで壁を認識しながら経路を選択し、通常の倍以上の避難時間を要した、とする報告がある[1]。視認性が低下した状況においても許容時間内に避難が可能な建造物とするためには、設計段階において避難所要時間を適切に推定する必要がある。特に、手探りのみに依存する避難を考えると、同程度の大きさの部屋でも、曲がり角の数など部屋の形状によって大きく避難時間が異なることが予想される。しかし、例えば建設省告示第1441号において、避難時間が建築物又は居室の用途に応じて定められた歩行速度と歩行距離から算出されているように、現状では、人間の認知や行動を適切に反映した避難時間推定になっているとは言い難い。この問題に対して、体験型のVR避難シミュレータ[2]が実現されれば、現状よりも正確な避難時間の建築前推定が実現される可能性が期待される。そのためには、仮想空間のシミュレータ、仮想空間を移動するためのインタフェース、ならびに壁面との接触を表現する力覚提示装置などが必要となる。

仮想空間を用いた避難シミュレーションの先行研究には、被験者にジョイスティックを用いて仮想ビ

ルの中を特定の位置まで移動させ、避難行動を解析した報告がある[5]。FreeWalk/Qシステムは、仮想都市空間内の参加者をアバタとして表示することで、遠隔地にいる複数の参加者がネットワーク経由で共同避難シミュレーションを行うことを可能とした[6]。しかし、これらのシステムでは、歩行や手探りといった個々のユーザの行動は、マウス操作などに簡略化されているか省略されているため、避難時間を推定するという目的には適していなかった。

仮想空間を移動するための歩行インタフェースには、電動トレッドミルを用いて歩行による移動を相殺するもの[8]や、フットパッドを用いてユーザの移動を相殺するもの[9]がある。その他、その場での足踏み動作によって仮想空間の移動速度を制御するもの[10,11]などがある。これらの歩行インタフェースを利用することで、避難シミュレータに歩行機能を付加すれば、より現実に近い体験と避難時間推定が可能になるものと期待される。金湖らは、客船の空間と避難者および火災をモデル化すると共に歩行インタフェースを併用し、歩行機能を有する客船避難シミュレータを実現した[7]。しかし、力覚提示機能がないため、本研究で想定する低視界条件下での手探りによる避難シミュレーションには不適であった。

手探りでの避難行動の仮想体験を実現するためには、力覚を介した壁面の提示が必要である。これまで、力覚提示装置に関する多くの研究が行われてきたが、特に壁面の提示に際しては、接触状態と非接触状態の相違を明確に表現できることが望ましい。このような用途には、ユーザと仮想環境の接触位置を予測し、エンドエフェクタが予測接触位置で待機

\*1: 東京農工大学大学院

\*1: Graduate School of Tokyo University of Agriculture and Technology

する、遭遇型力覚提示装置[12,13]が有望と考えられる。例えば、星野らは、仮想物体の平面とエッジを含む形状の提示を位置・姿勢制御によって実現した[17]。しかし、形状提示が目的であるため接線方向の摩擦力提示や移動インタフェースと併用することは考慮されておらず、連続壁面のなぞり動作の実現には適していなかった。仮想壁面の研究に関しては、Colgateらは、高い剛性を持つ仮想壁面を実現するためのpassivity理論を提案し、仮想壁面の法線方向外力に対する高剛性を実現したが、摩擦力や滑りなど、接線方向の制御は考慮されていなかった[15]。Salcudeanらは磁気浮上式ジョイスティックを用いて法線方向の硬さを実現すると同時に、接線方向におけるstick-slip動作の表現を試みた。しかし、装置の可動域が小さいことに加えて、stick状態においても大きな滑りが生じるという課題があった[14]。

そこで、我々は火災時の低視界状態における手探り避難経路探索の建築前検証の実現を目的に、磁気式トラッキング装置と直交マニピュレータを用いて、遭遇型仮想壁面力覚提示システムを開発し、以下の機能を実現した[3,4]。

- 1) 接線方向接触力を用いた手先追従による大きな仮想壁面の提示
- 2) 法線方向外力に対して高剛性を持つ機構とすることによる壁の硬さの表現
- 3) 接線方向力の制御による仮想的な摩擦力の表現
- 4) 手先非接触時のパネル接触位置の予測と制御

しかし、仮想空間避難シミュレーションの実現のためには、壁の角や端の提示、壁テクスチャの表現、歩行機能などが課題として残されていた。そこで、本研究では、小型パネルを用いて仮想壁面を提示すると同時に、歩行インタフェースを用いて仮想空間内を移動する機能の実現を試みた。しかし、仮想壁面を力覚提示する際に、ユーザが仮想空間を移動すると、手が仮想壁上を滑る状態と、張り付き状態に応じて壁面パネルの制御を切り替える必要が生じた。さらに、二つの状態の制御器を切り替えると、操作量が不連続になる問題が生じ、その解決が要求された。本論文では、歩行機能を有する仮想壁面力覚提示装置ならびに、その実現のための問題点と解決法について述べる。

## 2. 歩行時仮想壁面システム

### 2.1 歩行中の仮想壁面の提示

歩行インタフェースには、電動トレッドミルやフットパッドなどのユーザ移動相殺型や、足踏みなどの疑似歩行型があるが、いずれも、現実空間でのユーザ位置がほぼ一定に保たれる点は共通である。

仮想空間においては、図1のようにユーザは歩行速度に応じて移動し、仮想壁面は一定位置に固定さ

れている。従って、仮想空間でのユーザと固定壁面の相対関係は、現実空間においては、小型パネル面を仮想空間での歩行速度に応じてユーザの後方に運動させることによって表現可能である。

パネル面をユーザに対して相対運動させる方法には、パネルそのものを運動させる方法の他に、パネル部分に電動ベルトを安裝し歩行速度で駆動する方法なども考えられる。ベルトを用いる方法は、手と壁面の連続的な滑りを表現可能である点で優れているが、装置が大型化することに加え、ベルトのみでは法線方向の剛性を得にくいという課題がある。しかし、法線方向の剛性を得るために、ベルト背部に板やローラ等を配置すると、さらにエンドエフェクタ部分の重量が増加し、ユーザの安全性により一層の配慮が必要になる。また、ドアのように動く構造物を提示しようとするときには、手とベルトの間に作用する力を計測し制御する必要があるが、ベルトが動くため、力センサはベルト駆動装置を含むエンドエフェクタ部全体を支持する形で設置する必要が生じる。そのため、エンドエフェクタの質量や、手先接触位置からセンサ支持部までのモーメントアーム長が影響し、正確な接触力の検出が困難になる点も課題として挙げられる。

対して、有限の大きさのパネルを相対運動させる場合、手先に対してパネルを連続的に滑らせる事ができないため、静止摩擦力によって動摩擦力を代替する疑似的な滑りの表現になるが、法線方向硬さの表現が比較的容易、かつ装置が小型軽量で、制御によって異なる摩擦係数が表現可能である、などの利点がある。そこで本研究では、小型パネルをユーザに対して運動させる方法を採用してシステムを試作し、その問題点を実験的に検討する。

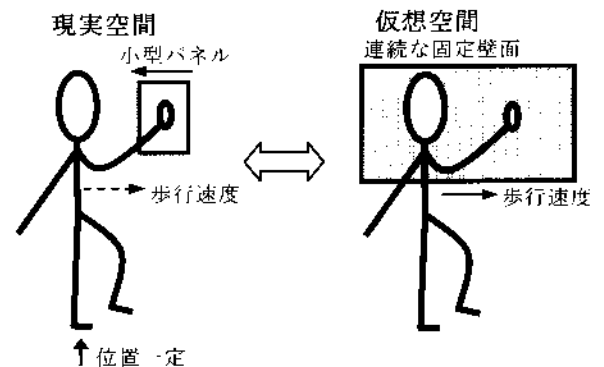


図1 仮想壁面提示のコンセプト

### 2.2 歩行中のユーザと仮想壁面の状態

手と壁の関係には、接触状態と非接触状態があり、さらに、接触状態には滑り状態と張り付き状態の二つが存在する。各状態における動作目標と、それを実現するためのパネルの制御を表1にまとめる。

遭遇型力覚提示装置においては、非接触状態では、壁面提示パネルは手との接触に備えて、予測接触位

置に移動することが求められる。

表 1 各接触状態における制御目標

状態	動作目標	パネルの制御
非接触	手との接触に備える	接触位置を予測し位置制御
張り付き接触	固定壁面の表現	位置制御（歩行速度で手と共に後方へ移動）
滑り接触	仮想壁面との動摩擦の表現	動摩擦力を目標とした力制御

接触状態のうち、張り付き状態では、静止摩擦によって手先にせん断応力が作用するが、手と壁の位置関係は固定される。したがって、パネルは手が張り付いた位置を保持することを要求される。このとき、前節で述べたように、仮想空間での静止壁面は、現実空間では歩行速度に応じて後方へ移動することになる。

他方、滑り状態では、手には壁面からの動摩擦力が作用し、手と壁面は相対運動する。厳密には、滑りによって生じる stick-slip や、壁面のテクスチャによる皮膚触覚を表現することが必要であるが、本研究では、滑り時に生じる摩擦力のみに着目し、手とパネルの間には滑りを生じさせず、動摩擦力に相当する接線方向力を静止摩擦として表現することによって、疑似的に滑りを表現することを考える。

ここで、歩行インタフェースを使用しない場合には、仮想空間と現実空間での手先速度が同一となることから、壁に手が張り付いた状態における手先速度は零となる。この場合、力制御器に摩擦力を閾値とする不感帯を付加することで、パネルにユーザが法線方向の力を加えなければパネルは停止し、明示的に制御器を切り替えずとも、滑り状態から張り付き状態への移行が実現される[3]。

しかし、歩行を行う場合には、手が仮想壁面に張り付いた状態は、現実空間ではパネルが歩行速度で運動することを意味するため、制御器を切り替えて、明示的にパネル速度を制御する必要が生じる。滑りと張り付きの状態間は、図 2 のように、接線力が静止摩擦より大きくなると滑り状態に移行し、手先が停止すると張り付き状態に移行する。

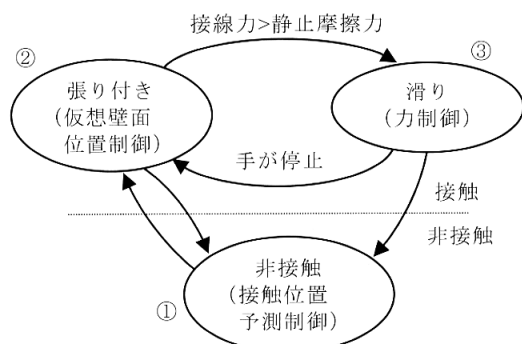


図 2 手と壁面の関係の状態遷移図

### 3. システム設計

#### 3.1 全体構成

##### 3.1.1 システムの全体構成

手先への遭遇型力覚提示ならびに仮想空間歩行機能を実現するために、本システムは以下の 5 つのサブシステムによって構成した。歩行検出部以外は、歩行を行わない仮想壁面提示の場合のシステム[4]と同一である。開発した仮想壁面システムの全体構成を図 3、4 に示す。

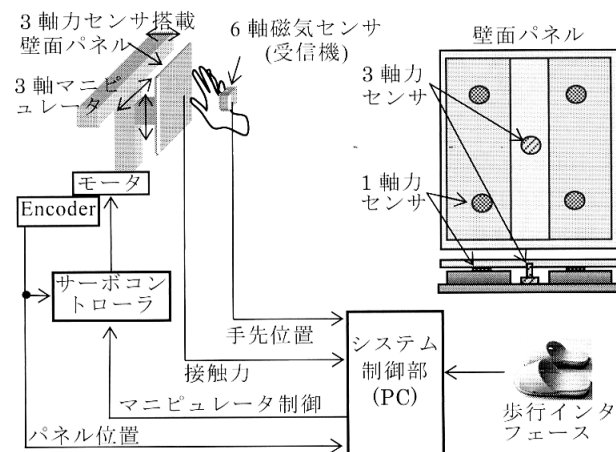


図 3 システム構成

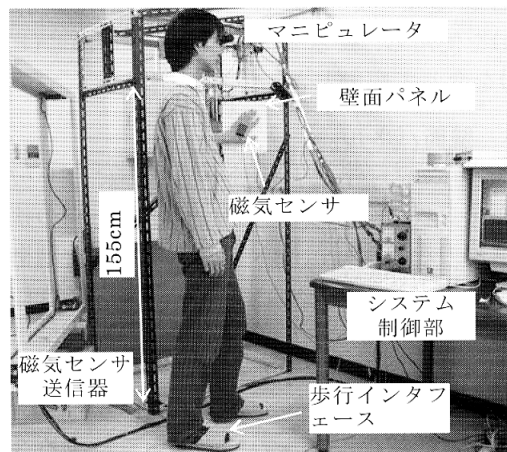


図 4 システム全景

- 1) 手先位置検出部：非接触時の手先位置は、最大位置誤差 3mm、角度誤差 1°の、6 自由度磁気式位置センサ[16]を、手背部に取り付け、手の厚みを 20mm と仮定して、手掌中心部の座標を算出した。
- 2) 接触力検出部：3 軸と 1 軸、二種類の力センサを用いて、手との接触により壁面パネルに生じる、接線および法線方向の接触力を検出した。
- 3) 歩行検出部：ユーザの随意的な仮想空間中の移動を可能とするために足底の力センサを用いて足踏み動作の周期を検出し、仮想空間内での歩行速度を算出した。
- 4) マニピュレータ部：手先への追従と自由な位置への仮想壁の配置を実現するために、小型パネルをエンドエフェクタとする 3 軸直交マニピュレー

タを用いた。

- 5) システム制御部：カセンサによる手先接触力と、磁気センサにより計測した手先座標をもとに、マニピュレータの制御を行う部分である。本システムでは、2台のPCをネットワーク接続し、位置と力の計測とマニピュレータ制御を行った。

### 3.1.2 マニピュレータ

視覚情報を制限された状態で壁面に触れながら歩行する際には、肘が曲がった姿勢になるため、上肢の可動域は大きく制限される。そこで、閉眼条件下の壁面手探り歩行を行ったところ、被験者が間欠的に上肢を壁についた位置の間隔は 200~400mm であった。そこで、マニピュレータの前後方向可動域は 450mm とし、上下方向と奥行き方向の可動域は、それぞれ 450mm, 300mm とした。また、閉眼手探り歩行では歩行速度も 150~200mm/s 程度に低下していたことから、実際の避難時にはさらに速度が高くなるものと予想されるが、本研究では手探り歩行シミュレーションの基本的問題点の検討を目的に、マニピュレータの最大速度は 150mm/s とした。

マニピュレータの構造は 3 軸直交型とし、各軸は出力 20W の AC モータ(HDSystem, MAA-04-1A6) および速度サーボコントローラ(HDSystem, HA-600-1)を使用し、長さ 450mm のボールねじ(ピッチ 3mm)を介して駆動した。

### 3.1.3 壁面パネル

壁面パネルは、手先と接触することにより仮想的に壁面を表現する。接触時には、法線方向の接触力から摩擦力を算出し、接線方向の接触力を制御することで摩擦力を表現する。また、壁面パネルは軽量化の観点から小さい方が望ましいため、接触中に手がパネル中心から数 cm ずれてもパネル内に維持されるように、縦 280mm×横 200mm とした。

接触力は、壁面パネルの中心部を支持する 3 軸力センサ(NITTA, PD3-30)ならびに、法線方向接触力検出のために、パネルの 4 角に接線方向に滑り可能な

形で貼付したシート状の 1 軸力センサ(Tekscan, FlexiForce)によって検出した。

### 3.1.4 仮想空間歩行インタフェース

仮想空間移動に関しては、足踏み型も、トレッドミルに代表される移動相殺型も、現実空間でのユーザ位置がほぼ同一に保たれる点では同一であるため、移動インタフェースと組み合わせたときの壁面提示法を検討するという意味では、基本的な問題点や知見は共通のものが多いと考えられる。そこで本研究では、実装が容易な足踏み型を採用した。

システムでは、両足の足底に設置したシート状 1 軸力センサ(Tekscan, FlexiForce)の出力を A/D 変換器を介して取り込み、足踏み動作時の足底の接地時刻を検出した。さらに、両足の接地時刻から各ステップの所要時間を算出し、閉眼条件下での手探り歩行実験から歩幅を 250mm と仮定して歩行速度に換算し、仮想空間での身体位置を算出した。本研究は、壁面に沿って歩きながら壁面に触れる動作の実現可能性の検証を目的としたため、方向転換機能は実装しなかった。

## 3.2 パネルの制御システム

### 3.2.1 システム全体

2章で述べたように、壁面提示システムは、手との非接触、滑り、張り付き、の3つの状態を有するため、それぞれの状態の制御器を設け、図2の状態遷移図にあるように、接触の有無、接線方向力、および手の速度、によって切り替え処理を行った。図5に制御系の構成を示す。

非接触時には、PID 制御器により、目標位置を手先の接触予測位置とする位置制御を行う。滑り状態では、PI 制御により、目標値を摩擦力とする法線方向接触力の力制御をすることで、仮想壁のなぞり動作による摩擦を疑似的に表現する。このとき、法線方向には位置制御を行うことで、壁の硬さを表現する。張り付き状態では、張り付いた仮想壁面の位置を目標とする位置制御を行うことで、停止した壁面

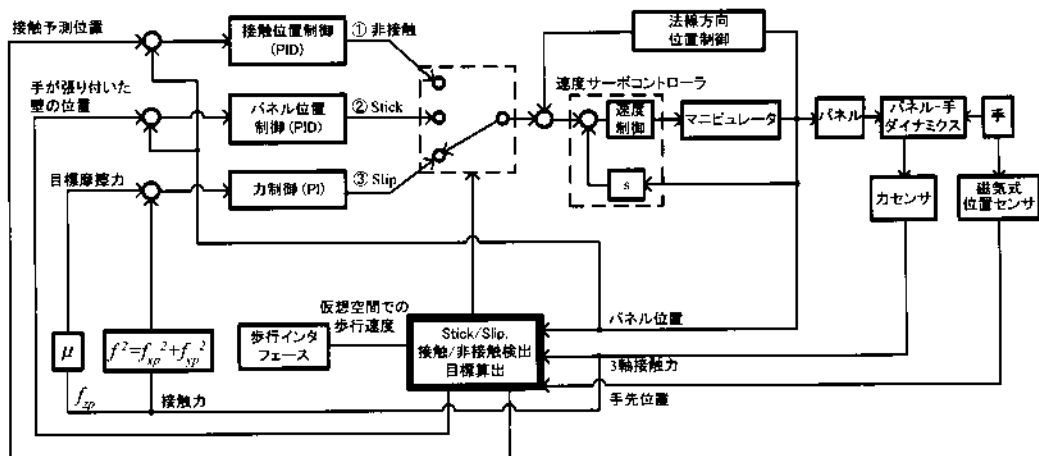


図5 制御システムの構成図

を表現する。ただし、滑り状態から張り付き状態への移行と張り付き位置目標の設定に関しては、いくつかの問題があり、詳細は次章で述べる。

また、試作したシステムは、最内部に交流モータの速度サーボループを有するため、各制御器の出力操作量は速度の次元を持つ。

### 3.2.2 非接触状態のパネル制御

非接触時の壁面パネルは、前回の報告[3]と同様に、手との接触位置を予測し、予測位置への位置制御を行った。壁面の形状が複雑な場合には、手と壁面の接触位置の予測は必ずしも容易ではないが、本研究では壁面に単純平面を想定し、接触予測位置は、仮想壁面内での手先との最近点とし、PID 制御器による位置制御を行った。また、遭遇型力覚提示装置ではユーザとの干渉回避も重要であるが、本研究で使用したマニピュレータが直交型であり、使用時のユーザ位置を規定したため、干渉発生の可能性が低いことから、特に考慮しなかった。

### 3.2.3 滑り状態のパネル制御

滑り状態では、摩擦力を目標とするPI 制御器による力制御を行う。摩擦力  $f_f$  はユーザが壁面に加える法線方向の力  $f_{sp}$  と動摩擦係数  $\mu$  によって、以下で与えられ、

$$f_f = \mu f_{sp} \quad (1)$$

$f_{xp}, f_{yp}$  をそれぞれパネル面に対して前後および上下方向の接触力とすると、パネルの接線方向の接触力  $f$  は以下で与えられる。

$$f^2 = f_{xp}^2 + f_{yp}^2 \quad (2)$$

滑り状態では、摩擦力と接線方向接触力が釣り合うため、力制御器は、式(3)のように摩擦力を目標値として操作量  $v^f$  を算出し、これを  $f_{xp}, f_{yp}$  の比で x,y 成分に再分解して、それぞれのサーボコントローラに出力する。

$$v^f = K_{Dm} \left\{ K_p^f (f - f_f) + \frac{1}{T_i} \int (f - f_f) dt \right\} \quad (3)$$

ただし、 $K_p^f$  は比例係数、 $T_i$  は積分成分の時定数、 $K_{Dm}(=1.0)$  は制御器の出力をモータの速度サーボ指令に変換するための係数である。

### 3.2.4 張り付き状態のパネル制御

張り付き状態では、現実空間座標系で制御される壁面パネルによって、仮想空間の静止した壁を表現する必要がある。両空間座標系と壁面の関係を図6に示す。

ここで、現実空間と仮想空間の関係は、次のように定義される。

$H$  : 手先位置       $R$  : 現実空間座標

$B$  : 体の位置       $V$  : 仮想空間座標

(例:  $B_R =$  現実座標に対する体の位置)

現実空間座標系でのユーザ位置・速度と、仮想空間座標系でのユーザ位置・速度の式は、

$$\dot{B}_R = \dot{B}_V + \dot{V}_R \quad (4)$$

$$\dot{B}_R = \dot{B}_V + \dot{V}_R \quad (5)$$

で与えられ、仮想空間座標系ならびにユーザ位置を基準とした手先の位置・速度は、以下になる。

$$\text{手先位置} \quad H_V = H_B + B_V \quad (6)$$

$$\text{手先速度} \quad \dot{H}_V = \dot{H}_B + \dot{B}_V \quad (7)$$

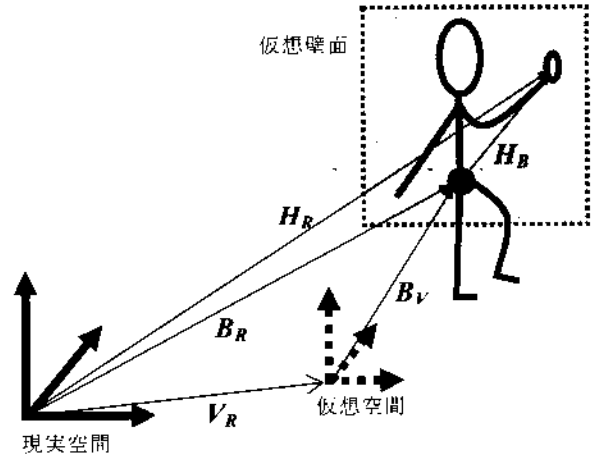


図6 現実空間と仮想空間の関係

静止した壁面に手が張り付いた状態では、 $\dot{H}_V = 0$  なので、式(7)から

$$\dot{H}_B = -\dot{B}_V \quad (8)$$

が得られ、ユーザの身体位置は以下になる。

$$H_B = -\int \dot{B}_V dt + C \quad (9)$$

ここで、実空間でのユーザ位置はほぼ一定であることから、 $\dot{B}_R = 0$  とすると、式(5)から  $\dot{B}_V = -\dot{V}_R$  が得られ、これを式(9)に代入すると

$$H_B = \int \dot{V}_R dt + C \quad (10)$$

となる。式(10)は、手が壁面に張り付いた状態でのユーザ身体を基準とする手先位置は、仮想空間における歩行速度の積分値に等しいことを意味する。この手先位置を、

$$H_R = H_B + B_R \quad (11)$$

の関係をを用いて現実空間座標系に換算すると、

$$H_R = \int \dot{V}_R dt + B_R + C \quad (12)$$

となる。 $B_R$  は現実空間でのユーザの位置でほぼ一定であり、 $C$  は初期距離を表す。すなわち、定数項を除くと、手先位置は仮想空間における歩行速度で現実空間内を移動するという図1の関係が得られる。

壁面パネルの制御にあたっては、上記の関係から目標位置を算出し、PID 制御器を用いて位置制御を行った。

## 4 制御における問題と解決法

### 4.1 基本動作とその問題点

前章で述べたシステムを用いて壁面の提示を行なった場合、実際には、以下の2つの問題が生じる。図7に、理想的な動作と実際の動作の相違を示す。

#### (a) 滑りから張り付きへの遷移時間

歩行中に手が壁面上を滑っている状態から、摩擦力が増加して手が壁面に張り付き状態に遷移する場合を考えると、状態の遷移時間(手の減速時間)は0.5s以下程度の極めて短い時間と見込まれる。この短い減速時間をシステムで実現するためには、壁面パネルを急加速する必要が生じる。しかし、一般に力センサは雑音の影響を受けやすいため、力制御器の係数を大きくすることはできず、結果として、仮想空間における手先の急減速(現実空間でのパネルの急加速)を実現することは困難である。

#### (b) 制御器切り替え時の操作量の不連続

手の速度が零になった時刻において、力制御から位置制御に切り替える場合、手先停止時刻の手先位置を制御目標とすると、位置制御開始時点での偏差が零となり、出力する操作量も零となる。そのため、操作量が不連続となって、パネルは急加速の後、一時的に減速することになる(仮想空間では、張り付いた後に再び滑ることになる)。この操作量不連続による再滑り現象は、ユーザには、手が壁に一瞬張り付いた後に壁そのものが動くような違和感として知覚される。この現象を回避するためには、壁面パネルの操作量が、制御器の切り替えによって不連続にならないようにする必要がある。

逆に、位置制御から力制御への切り替え時には、力制御器の制御目標が動摩擦力となるため、ある程度の操作量が発生し、操作量の不連続は生じても軽微であり、実験的にも知覚されることはなかったため、特に対策は講じなかった。

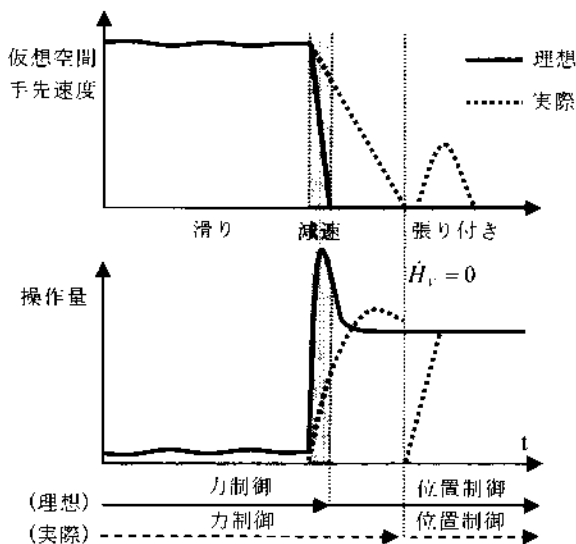


図7 滑り状態から張り付き状態への遷移

なお、試作したシステムを用いて、間欠的に壁面に手をつく仮想手探り歩行を被験者が行なったところ、約半数の動作において、手先が壁面に接触した直後に一度滑り状態になり、その後で張り付き状態に移行していた。すなわち、改善策を講じなければ、手をつくたびに、ほぼ50%の確率で再滑りが生じることになる。

### 4.2 改善方法

前節で挙げた2つの問題に対し、本研究で試みた改善方法を以下に述べる。

#### (a) 遷移時間短縮のための制御係数の動的調整

滑り状態から張り付き状態への急速な遷移を実現するためには、力制御器の制御係数はできるだけ大きいことが望ましい。しかし、制御係数を大きくすると振動を招きやすいため、摩擦力提示時の安定性と仮想空間での手先の張り付きによるパネルの急加速を両立させることを目的に、本システムでは、図8のように、制御係数の動的な調整を行った。滑り状態では振動の発生を抑制するため、限界感度法を用いて設定した係数を使用し、摩擦力が接線力より0.5N以上大きくなると減速状態と判定し、制御器の比例係数( $k_p^f$ )を2.5倍にした。

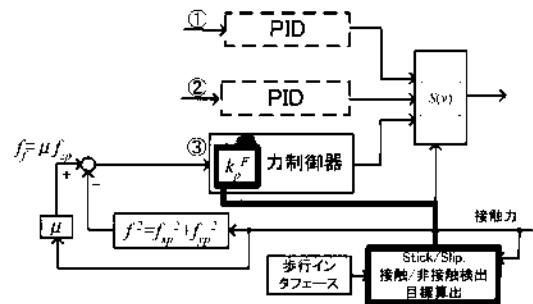


図8 比例係数の動的調整

#### (b) 制御器切り替え動作の円滑化

力制御から位置制御に切り替えた際に、操作量が不連続になることによる再滑り現象は、図9のように、切り替え直後の位置制御器の出力操作量が力制御器の操作量と連続になるように、何らかの方法で修正すれば、解消されるものと考えられる。

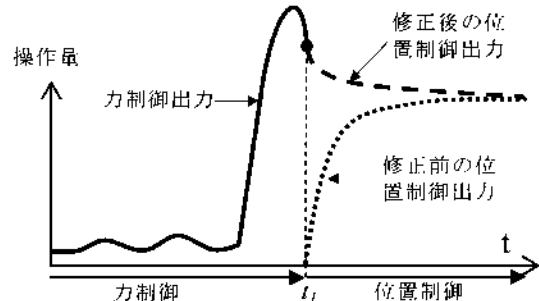


図9 操作量の円滑化处理

本研究では、位置制御にPID制御器を用いているため、操作量を修正する方法には、瞬時的成分である微分成分を除き、比例成分を修正する方法と、積

成分を修正する方法の2つが考えられる。そこで、両修正法を実装し、その効果を実験的に比較した。

① 目標位置修正法

位置制御器が出力する比例成分の修正を目的に、切り替え直前に力制御器が出力していた操作量と位置制御器の操作量が同一となるような位置偏差を、位置制御器の比例係数から逆算し、壁パネルの目標位置を決定する方法である。

目標算出機構は、力制御器が出力していた操作量  $v_{f_i}^F$  (時刻  $t_i$  の力制御器の操作量) と位置制御器の比例係数  $K_p^P$  を用いて、位置偏差  $e_{vp}$  を式(13)によって算出する。このとき、制御目標位置は式(14)のように、位置偏差と現在のパネル位置の和で与えられる。

$$e_{vp} = \frac{v_{f_i}^F / K_{Dm}}{K_p^P} \tag{13}$$

$$x_d = x + e_{vp} \tag{14}$$

ただし、 $K_p^P$  は位置制御器の比例パラメータ、 $v_{f_i}^F$  は時刻  $t_i$  の力制御器の操作量、 $K_{Dm}(=1.0)$  は制御器の出力をモータの速度サーボ指令に変換するための係数である。

② 積分出力修正法

この方法は、張り付き時刻における両制御器の操作量を、積分成分を修正することで一致させるものである。式(15)に示すように、時刻  $t_i$  の力制御器の操作量  $v_{f_i}^F$  に位置制御器の積分成分の操作量 ( $v_{i_i}^P$ ) が一致するように、位置制御器の積分器に初期値を与える方法である。この方法では、壁面パネルの現在位置がそのまま張り付く目標位置となる。

$$(v_{i_i}^P)_{t_i} = v_{f_i}^F \tag{15}$$

5. 評価実験と考察

5.1 実験の設定

評価実験では、ユーザの手先が壁面上を滑りながら歩行している状態から、張り付き状態に移行し、再度滑り状態になるように、壁面法線方向の力を随意的に変化させ、そのときの接触力等を記録した。被験者には、一定速度で足踏み動作を行い、同程度の力を加えるように指示を与えた。仮想壁面の摩擦係数は、動摩擦係数 0.12、静止摩擦係数 0.15 とし、状態変化に併せて切り替えた。

実験条件は、(1)制御係数の動的調整および操作量円滑化処理を行わない基本動作、(2)制御係数の動的調整と目標位置修正による操作量円滑化処理を行ったもの、(3)制御係数の動的調整と積分出力修正による操作量円滑化処理を行ったもの、の3条件とした。制御器の各係数は、限界感度法によって調整した。設定値を表2に示す。

表2 制御器の係数

	制御係数	設定値
位置制御(PID)	$K_p^P, T_i, T_D$	8.33, 75s, 18s
力制御(PI)	$K_p^F, T_i$	1.23, 124s

5.2 実験結果

5.2.1 基本動作

基本動作時の実験結果の典型例を図10に示す。図中の破線は、左から、手が減速し始める時刻、手が張り付いて力制御から位置制御に切り替わった時刻、摩擦力が大きくなり位置制御から力制御に切り替わった時刻を示す。力制御器が動作している滑り状態では、張り付き状態遷移前の減速区間を除き、接線力と目標摩擦力の誤差は 0.5N 以下で、手への動摩擦力がほぼ適切に表現されていたことが確認される。しかし、被験者の内観報告は、滑りというよりも、張り付き状態の上肢が壁面によって後方に引かれる感覚に近く、滑り感覚の実現にはいたらなかった。これは、手が壁面上を滑ったときに、壁面テクスチャや stick-slip によって生じる微小振動を欠いていることによるものと考えられ、後ほど検討する。

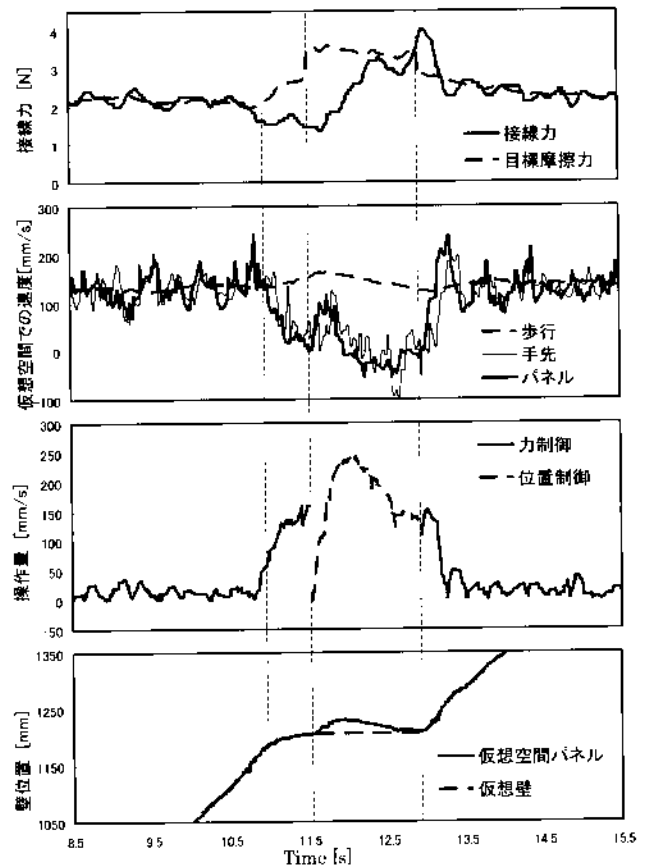


図10 基本動作結果

手とパネルの速度に関しては、手先速度に磁気センサの雑音の影響が見られるが、手とパネルの速度は同等であり、滑り状態では歩行速度とほぼ一致し、良好に壁面位置が提示されていた。張り付き状態への移行における仮想手の減速時間(パネルの加速時間)は、約 0.6s であった。被験者による内観報告に

においても、張り付き状態制御では、手が壁面に張り付いたことによって手が相対的に後ろに引かれる感覚が、良好に表現されていた。滑りから張り付きへの遷移に関しては、滑り状態で壁面に力を加えてから手が張り付くまで、気になるほどではないが、やや時間がかかる印象との報告があった。

しかし、操作量に関しては、前章で述べたような制御器切り替えによる操作量の不連続が、張り付き状態への移行直後に生じている。また、その影響で再度手先が壁面上を滑るような現象が、パネル位置の運動として確認される(制御開始後 11.5~12.5s)。この操作量の不連続による再滑りの最大速度は、9試行の平均で約 100mm/s であった。被験者の内観報告では、手が壁に一瞬張り付いた後に、壁そのものが動くような感覚であった。静止しているはずの壁面が運動した場合、ユーザの行動そのものに影響が表れる可能性が懸念されるため、感覚提示だけでなく、避難時間推定の観点からも改善が必要と考えられる。

5.2.2 滑りから張り付きへの遷移時間改善

遷移時間短縮を目的に力制御器の比例係数の動的更新を適用した。図 11, 12 の結果を見ると、図 10 よりも仮想空間での手が減速して停止するまでの時間(図中の 1 本目と 2 本目の破線の間の区間)が短縮された様子が観察される。基本動作条件と、比例係数の動的更新を適用した条件、それぞれ 9 回づつ、

手の停止時間の平均を求めたものを表 3 に示す。平均減速時間は、0.63s から 0.3s と、基本動作の約半分に短縮され、制御器比例係数の動的更新の効果が確認された。被験者の内観報告では、壁面に力を加えてから手が張り付くまでの時間遅れが、基本動作と比較して気にならない程度に改善された。

表 3 仮想手が壁面に張り付き停止するまでの時間

	平均時間[s]	標準偏差[s]
基本動作	0.63	0.12
係数動的更新	0.3	0.07

5.2.3 制御器切り替え動作の円滑化

目標位置修正法による操作量円滑化の結果の例を図 11 に示す。滑りから張り付きへの切り替えにおける操作量の不連続が、目標位置修正によって解消している様子が確認される。他方、操作量を連続にするために、パネルの目標位置は、切り替え時刻におけるパネル位置よりも後方(図中では座標が小さい位置)に設定される。そのため、壁面パネルは歩行の進行方向と反対向きに移動し、その速度は 9 試行平均で約 28mm/s であった。

図 12 は、積分出力修正法による操作量円滑化の結果の例である。目標位置修正法と同様に、制御器の切り替え時の操作量が連続になっている様子が確認できる。また、積分出力修正法では、壁の目標位置は修正されないで、制御器切り替え時のパネル位置がパネルの目標位置となっている。しかし、積分

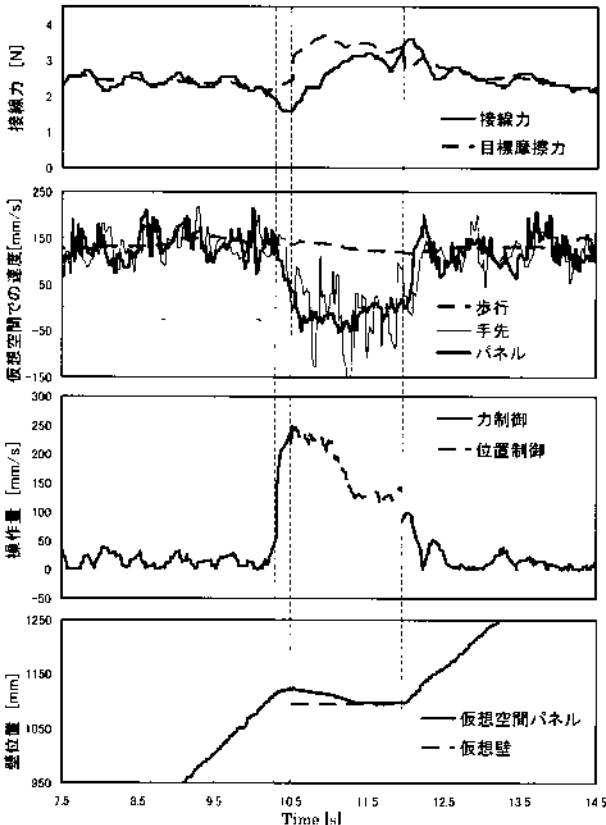


図 11 目標値修正法を用いた動作切替結果

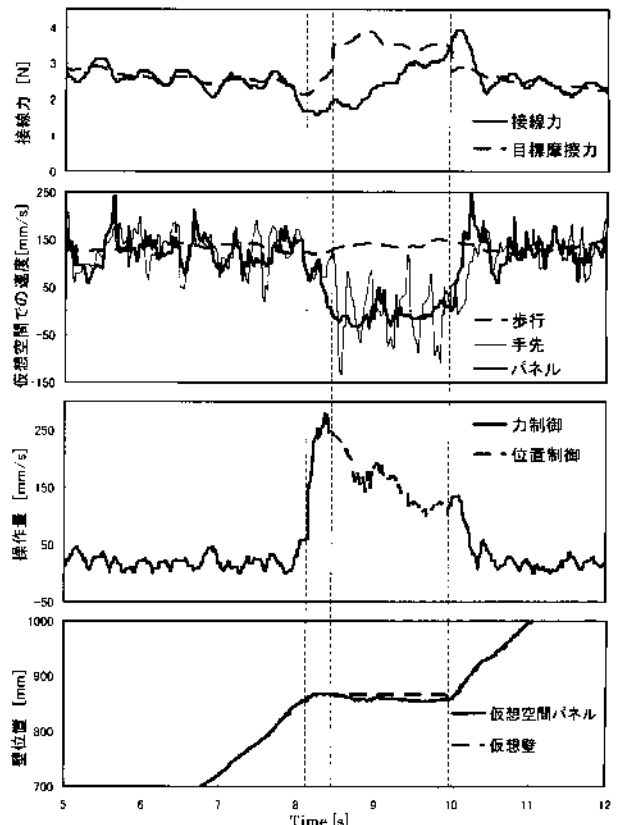


図 12 積分出力修正法を用いた動作切替結果



出力のために制御器の出力が若干過大となり、目標修正法と同様にパネルは後方に運動したが、その最大速度は9試行平均で20 mm/sに軽減された。

操作量不連続による再滑りを回避するための操作量円滑化処理は、逆に張り付き後の壁面の後方移動をもたらしたが、その速度は再滑りの1/5程度に軽減された。さらに、仮想空間において静止した壁は身体に対して相対的に歩行速度で運動しているため、壁面パネルは歩行速度で運動している。そのため、壁面パネルの速度のわずかな誤差はユーザには認知されにくい。被験者の内観報告によると、積分出力修正法を用いた条件では、上記の速度誤差は認知されておらず、実際の壁への張り付きに近い感覚となったことが確認された。

### 5.3 考察

本研究では、火災発生時の避難時間推定のための仮想環境を用いた体験的シミュレーションの実現を目標に、避難経路探索の主たる手がかりとなる壁面の力覚提示システムに、仮想空間歩行機能を付加する場合に生じる制御上の問題点を検討し、歩きながらの仮想壁面なぞり動作を実現した。

感覚提示の観点から試作したシステムを見ると、張り付き状態においては、壁の法線方向の硬さと、手が壁面と共に後ろに引かれる感覚が良好に実現された。さらに、係数の動的制御によって力を加えてから張り付くまでの遅れも気にならない程度に改善され、操作量の円滑切替処理によって、手が張り付いて停止した後に壁面が動くような感覚も解消され、概ね現実に近い感覚が実現された。完全な静止壁面を表現するためには、機械剛性の向上や微小な振動の原因となるセンサのノイズ抑制が望まれる。

滑り状態の感覚提示に関しては、静止摩擦によって動摩擦を代替する疑似的表現法を提案し、実装したが、壁面テクスチャやstick-slipによって生じる微小な振動や摩擦力の変動を欠いていることから、滑り感覚の実現にはいたらなかった。滑り感覚を実現する方法には、2.1節で述べたようにエンドエフェクタに電動ベルトを実装し歩行速度で駆動することで、実際に滑りを発生させる方法がある。あるいは、壁パネルを介して、ユーザの手先に壁面テクスチャや滑り速度に応じて微小振動を印加する方法や、静止摩擦力の動的制御によるstick-slipの表現など、疑似的な方法も考えられる。ベルト方式は、質量や壁面の摩擦特性を動的に変更できない点、反力制御が困難である点で不利であるため、振動提示などの疑似的な方法によって滑り感覚が実現されれば、より実用に近づくものと期待され、今後の検討課題である。また、手先が壁面を滑る感覚は、歩行速度の認知にも影響するものと考えられるため、システムの改良とあわせて、手先の滑りと速度知覚の関係を

実験的に検討することも必要である。

仮想空間内の移動には、本研究では足踏み型のインタフェースを用いた。足踏み型も移動相殺型も、現実空間でのユーザ位置はほぼ一定に保たれることから、壁面提示装置の制御を検討する上では、両者は基本的に同一である。しかし、感覚提示の観点からは、特に映像提示を伴わない場合には移動相殺型が優位になる。また、火災時には、煙を避けて低い姿勢で避難することが推奨されており、しゃがみ歩行や手や膝を地面についた移動の実現も検討する必要がある。しかし、しゃがみ歩行では、歩幅と周期の関係が通常の歩行と異なるものと予想されることから、足踏みなどの疑似的なインタフェースでは、速度の算出根拠を改めて検討する必要がある。これらを考慮すると、移動相殺型の採用が望ましいと考えられるが、装置が大型化することに加え、姿勢が一定しないため、移動相殺のためのユーザ位置計測が困難になるものと予想され、検討が必要である。

また、本研究では、通常状態での閉眼手探り歩行の速度を参考にシステムを構築したが、実際の避難状況においては、歩行速度はより高くなるものと考えられる。ユーザが間欠的に壁面に手をつく歩行を考えると、マニピュレータはユーザの手先が離れてから次の接触に備えて移動する必要があるため、最大で1m/s程度の速度を実現する必要がある。マニピュレータの動作速度の改善と、ユーザの安全性に配慮した軌道計画が重要な課題となる。

さらに、正確な火災避難時間推定のためには、単純壁面だけでなく、経路の分岐や扉など建造物の詳細形状の力覚提示に加え、避難行動に影響を及ぼす他の要素の実現が必要である。特に、避難者周辺の煙や火炎は、視界などの避難条件や心理状態を規定する重要な要素であるため、精度の高い火災シミュレーションと、煙や炎の影響を適切に表現するVRシステムが望まれる。さらには、他の避難者の挙動シミュレーションや避難者相互の干渉の力覚提示なども、今後の検討課題である。

## 6. まとめ

火災避難の体験的シミュレーションを目標に、遭遇型力覚提示装置と足踏み式疑似歩行インタフェースを組み合わせ、歩行時の手と壁の、非接触、滑り、張り付き、の3状態に対応した制御系を切り替える、歩行可能な壁面の力覚提示システムを構築した。さらに、滑り状態から張り付き状態への移行に際して発生する、手先停止時間の短縮と円滑な力制御器から位置制御器への切り替え、の二つの課題を明らかにし、それぞれ、制御係数の動的調整および制御器の積分出力修正を提案し、その有効性を実験的に確認した。

提案システムによって、歩行時に手が壁面に張り付いた状態における、手が壁と共に後ろに引かれる感覚が表現された。他方、滑り状態では、静止摩擦力の制御によって動摩擦力の疑似的表現をおこなったが、壁面テクスチャなどによる微小振動を欠くため、滑り感覚の実現にはいたらなかった。歩行時壁面提示のためには、より現実に近い滑り感覚の実現や、より高速で安全な壁面パネル動作の実現などが望まれ、今後の検討課題である。

### 参考文献

- [1] 北後：煙の中における人間の避難行動実験－非難経路選択および歩行速度に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.353，pp.32-38，1985.
- [2] 篠田，Bouguila，長谷川，石井，小池，佐藤：視界の悪条件における避難体験シミュレータの力覚ディスプレイによる改善，日本 VR 学会第 5 回大会論文集，pp.161-164，2000.
- [3] P.Weangsiman, K.Fujita, T.Honda : A Study of Haptic Representation of Virtual Plain Wall, IEEE Int. Conf. on Robotics & Biomimetics(RoBio2004),Aug,2004.
- [4] P.Weangsiman, K.Fujita, T.Honda : Haptic Representation System for Virtual Plain Wall, Advances Robotics, Vol.20, No.1, pp.49-69, 2006.
- [5] 目黒，芳賀，山崎，片山：バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用，土木学会論文誌，No.556/I-38，pp.197-207，1997.
- [6] H.Nakanishi, T.Ishida: FreeWalk/Q: Social Interaction Platform in Virtual Space, VRST'04, Hong Kong, pp. 97-104, Nov, 2004.
- [7] 金湖，池本：避難シミュレータ実験による非難者モデルの開発，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.5, No.3, pp.1041-1048, 2000.
- [8] R.P.Darken, W.R.Cockayne, D.Carmein : The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds, Proc. of UIST'7, pp213-221, 1997.
- [9] H.Iwata and T.Fujii : Virtual Perambulator: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment, Proc. of the IEEE-VRAIS, pp.60-65, 1996
- [10] 雨宮，八木，塩崎，藤田，渡部：足踏式空間移動インタフェース(WARP)の開発と評価，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.6, No.3, 2001.
- [11] 平田，江島，石井，原田，佐藤：足踏み動作解析に基づくウォークスルーのための速度制御，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.2, No.4, pp.293-302, 2000.
- [12] W.A.McNeely : Robotic Graphics: A New Approach to Force Feedback for Virtual Reality, Proc. VRAIS'93, pp.336-341, 1993.
- [13] Y.Yokokohji : WYSIWYF display: A visual/haptic

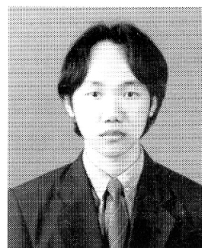
interface to virtual environment, PRESENCE, Vol.8, No.4, pp.412-434, 1999.

- [14] S.E.Salcudean and T.D.Vlaar : On the emulation of stiff walls and static friction with a magnetically levitated input/output device, ASME Dyn. Syst. Contr., Vol.55-1, pp.303-309, 1994.
- [15] J.E. Colgate, P.E. Grafing, M.C. Stanley and G. Schenkel : Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces, Proc. IEEE Virtual Reality Annu. Int. Symp., Seattle, pp.202-208, 1993.
- [16] 阿刀田，中村，富澤，横山：磁気式モーションキャプチャ装置における双極子配置と座標逆算アルゴリズムの一設計法，計測自動制御学会，Vol.34, No.5, pp.445-453, 1998.
- [17] 星野，平田，前田，舘：仮想触空間における物体形状の実時間提示法，日本ロボット学会，Vol.15, No.6, pp.868-877, 1997.

(2005年11月24日受付)

### [著者紹介]

ウィアンスイマ・ポンチャイ (非会員)



2002年東京農工大学院工学研究科博士前期課程修了。2006年同大学博士後期課程修了。ロボティクス，力触覚提示に関する研究に従事。工学博士。

藤田 欣也 (正会員)



1988年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。相模工業大学，東北大学医学部，岩手大学を経て，現在東京農工大学大学院教授。力触覚や歩行感覚の提示と共有仮想空間コミュニケーション，ならびに医用生体工学に関する研究に従事。工学博士。

本多 庸悟 (非会員)



1964年北大大学院修士課程修了。同年，工技院機械技術研究所(現・産総研)に入り，工作機械の適応制御などの研究に従事。1979年農工大に出向し，ロボット工学，ロボットビジョンなどの研究教育に従事し，2003年定年退官(名誉教授)。工学博士。東京都科学技術功労者。日本機械学会賞等受賞5件。著書に，ロボット工学の基礎(昭晃堂)，画像処理と視覚認識(編著，オーム社)，いつでもどこでも淡彩スケッチ(日貿出版社)など。