

ロコモーションとバーチャルリアリティ

野間 春生*

*ATR メディア情報科学研究所 京都府“けいはんな学研都市” 光台 2-2-2
*2-2-2, Hikaridai, Keihanna Science City, Kyoto, Japan
*E-mail: noma@atr.co.jp

キーワード: マルチモーダルインタフェース (multimodal interface), 歩行感覚提示装置 (locomotion interface), バーチャルリアリティ (virtual reality).

IL 002/2004/02-0133 © 2004 SICE

1. はじめに

VR 研究において歩行感覚提示装置 (ロコモーションインタフェース: Locomotion Interface: 以下と LI と表記する) とは“ユーザが自身の歩行動作によって仮想空間の移動感覚を得る装置”, あるいは“歩行移動可能な地面をレンダリングする装置”を意味する. 具体的には, ユーザがごく普通の歩行, あるいは走行動作を行った際に, その動作を相殺してユーザを定点に保持し, 遠隔地や仮想空間内を実際に歩行しているかのような感覚を提示する装置である.

本稿ではこの従来のインタフェース装置とは趣を大きく異にする歩行感覚提示装置について, 現状で提案されている多くの事例を通して解説を進める.

2. 歩行環境提示システムとは

情報の流れにのみ着目するならば, 既存の航空機や車両のシミュレータでも移動感覚を提示する機能は実現される. これらの技術と LI が最も異なる点は, 図 1 に示すようにシミュレータでは単にハンドルやペダルへの定量的な操作入力の結果として車両全体への運動がフィードバックされ, 操縦者がそれを感じるのみであるが, LI ではこれに加えてユーザと移動対象環境との間で動力学的な運動エネルギーの入出力をも再現される点である. これはつまり, 従来のキーボードやマウスのように操作を記号的に入力するだけのインタフェースと異なり, LI は疲労や距離感覚といった体感そのものを入出力可能なインタフェースであること

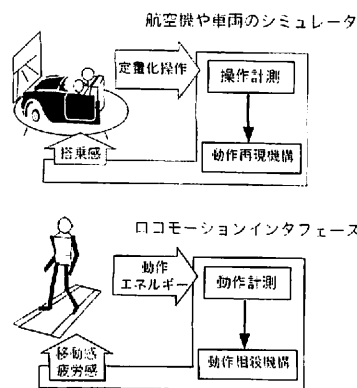


図1 ロコモーションインタフェースとシミュレータ

を意味している.

3. 歩行感覚提示システムの特徴と分類

LI の技術的なポイントはユーザの歩行動作を計測する手段, そしてその結果を用いて歩行動作相殺する手段をいかに実現するかにある. 動作計測については, 多くの場合, 既出の機械的, あるいは, 画像的な動作検出手法が応用されている. 一方で, 動作相殺手法は実際の運動の入出力を行うインタフェース部分であり, LI の技術的特徴が最も反映される.

そこで, これまでに提案されている多くの LI の実現例をその動作相殺機構に着目して図 2 のように分類した. ここではより自然な歩行動作が期待される順に分類しているが, その自然さとトレードオフに上位カテゴリーほどインタフェース装置として高い技術的ハードルが求められる傾向がある. 以下では既存の報告例を交えて各カテゴリーの特徴をより詳しく述べる.

3.1 フットパッド型

フットパッド型 LI はユーザの足先動作に追従する複数の可動板 (パッド) を用い, ユーザを支えると同時に歩行運動を相殺する手法である. 単純な前進歩行だけでなく, 旋回や進路変更動作への対応はもちろん, 階段や不整地などの複雑な歩行面の地形形状のレンダリングも可動板の動きを再現対象の地形に連動させることで可能となる. しかもユーザはごく普通に歩行動作を行うだけであり, 既存の提案方式の中で最も自然な歩行動作への対応が望める. 反面, このカテゴリーの装置を実現するには, ユーザの複雑かつ敏しような動きに追従するために, 可動板を駆動する機構には十分な自由度と可動範囲, 高い周波数応答性が求められる. 同時に, 歩行時の加速度を伴う体重を支えるために,

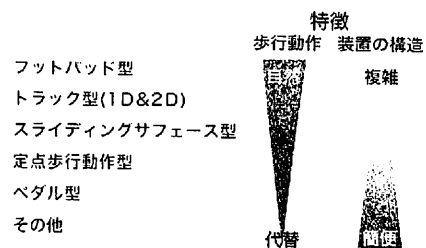


図2 ロコモーションインタフェースの分類

高い剛性も要求される。

Sarcos社のBiport¹⁾では、ユーザの後方に設置された2基のロボットアームがユーザの両足を支えている(写真1)。ユーザの足は常にロボットアームに固定されており、一種のマスターアームのような構成となっている。岩田らのGait Masterシリーズ²⁾ではユーザの下に、ロボットアーム機構を設置している(写真2)。1号機では2基の4自由度パラレル機構を用い、2号機では平行リンク機構により可動板の駆動を実現している。塩澤らのGait Simulator³⁾では、足先の水平面内の動きに対して高剛性と速度応答性を重視し、水平方向に3軸のパラレルリンクを組んだ機構を提案している(写真3)。Gait Simulatorでは階段等の地形レンダリングのために鉛直方向に可動板を駆動させる油圧装置を機構先端部に設けて、足先の動きの計測は赤外LEDとPSDカメラによるトラッキング技術を用いている。YoonらのVirtual Walking Machine⁴⁾でも下肢リハビリテーションを目的とした6自由度のパッド機構を用いた手法を提案している。このほかにも、円盤状の機構を用いたLathamのOmni Trek⁵⁾、Robotic Graphicsの手法を取り入れたRostonらのWhole Body Display⁶⁾なども提案されている。

これらのパッドをロボットアームで駆動する方式ではなく、群ロボットによって歩行面を構成するCircula Floor⁷⁾を岩田らは提案している(写真4)。板状の個々の群ロボットは全方向に移動可能で、あるロボットが立脚を支持して後方に下がった後に前方に戻る動作を繰り返すため、複

数のロボットを使うことで人間の俊敏な遊脚動作に個々のロボットが追従する必要がない。ここではフットパッド型に分類したが、後述のトラック型の利点である安全性や機構の単純化の面でもメリットを有している。

3.2 トラック型

トラック型は、ユーザの歩行する面全体を駆動して、ユーザの歩行動作を相殺する手法である。その駆動方式により、大別して1自由度型と2自由度型に区別される。また、面を駆動する際に、モーター等のアクチュエータでアクティブに駆動する方式と、ユーザの体重の重力方向分力でベルトを駆動するパッシブ方式にもさらに細分される。フットパッド型に比べれば機構的なハードルは低くなるが、傾斜面や凹凸面などの歩行感覚の再現機能が低下する。

(1) 1自由度型(トレッドミル型)

1自由度トラック型とは、トレーニングジムなどによく設置されているトレッドミル型のLIであり、ユーザに取り付ける特別なセンサや機構が少なく、ベルト上でのユーザの素早い自然な歩行動作に対応しつつ、機構的に簡素な構成が可能となる。

パッシブ方式ではBrooksらのシステム⁸⁾や廣瀬ら⁹⁾が早い段階から提案されている。これは典型的な簡易歩行器にベルト速度センサをつけたものであり、ベルトの回転速度で移動速度を、歩行器の前方に取り付けた自転車のハンドル状の装置で移動方向の入力を行った。動作計測系と相殺系が機械的に連動する非常にシンプルな構成となるが、得られる歩行感覚は常に上り斜面に限定される。



写真1 Biport (Sarcos Inc. 提供)

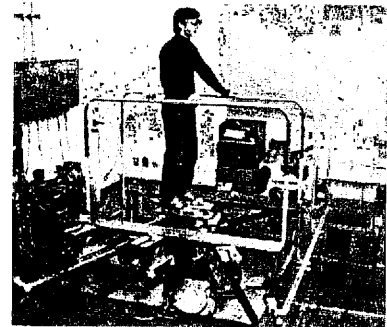


写真3 Gait Simulator (立命館大学提供)



写真2 Gait Master シリーズ (筑波大学提供)



写真4 Circula Floor

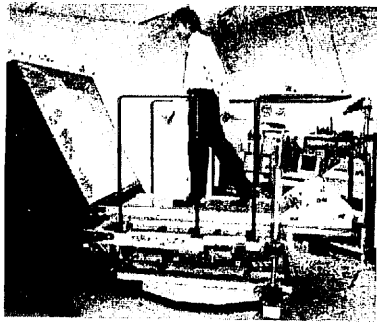


写真5 ATLAS

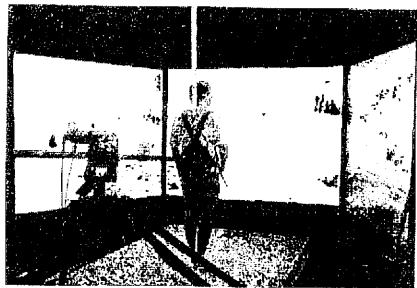


写真6 The Second Generation Treadport
(Utah Univ. 提供)

アクティブ方式では、動作計測手段によってベルト上のユーザの位置を計測し、これをベルトの中央に保持するようにアクチュエータによってベルト速度を制御するため、パッシブ型に比べて平地上を実際に歩行している感覚が高まる。われわれの開発した ATLAS⁽¹⁰⁾ では、画像処理によりベルト上でのユーザ位置と歩行速度を計測し、これらからユーザの歩行位置を目標値とするベルト速度制御を実現した(写真5)。トレッドミル機構全体は3軸の姿勢制御機構上に組み込まれており、平地だけでなく任意の斜面のレンダリングと旋回感覚の提示が可能である。また、ATLASを発展させた Grand Surface Simulator⁽¹¹⁾ では、ベルト保持面を前後方向に6分割し、これらを独立に昇降することで、ベルト上で擬似的に凹凸面を再現できた。

トレッドミル型の問題点として、歩行方向がベルトの運転方向に限定される点が挙げられる。そこで、普通の1自由度トラック型トレッドミルでは純粋な進路変更動作の代わりに、先の Brooks らのシステムでのハンドルによる方法、あるいは、Hollerbach らの Treadport⁽¹²⁾ で採用されたベルト上での体の方向と横方向への移動量からステアリング角度を決める疑似的方法が主流である(写真6)。

(2) 2自由度型

この進路変更動作問題を解決する方法として、歩行面を二次元無限軌道化する LI が提案されている。モーター駆動のアクティブ方式として、写真7に示す Darken らの Omni Directional Treadmill⁽¹³⁾ では多数の小さなパイプを数珠状につなげた機構でベルトを構成し、これを直交する2機の



写真7 Omni Directional Treadmill
(Virtual Space Devices, Inc. 提供)

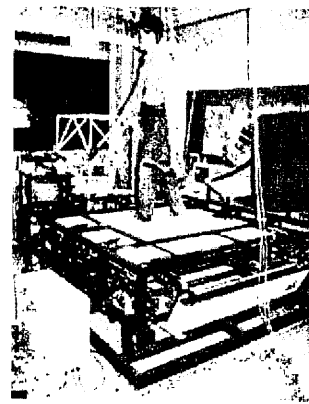


写真8 Torus Treadmill (筑波大学提供)

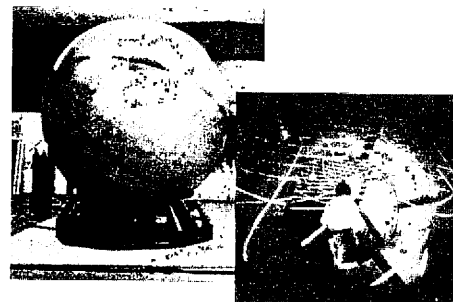


写真9 SPIN (Time's Up Inc. 提供)

トレッドミルで二次元方向に駆動する方式を実現した。岩田らの Torus Treadmill⁽¹⁴⁾、および、その発展型の Walk Master⁽¹⁵⁾ では幅の短いトレッドミルを横方向に複数台輪状に連結し、ここのベルトの駆動と共に連結方向にも駆動することで二次元無限軌道を実現した(写真8)。

一方、パッシブ方式で二次元無限軌道を実現した例として、Time's Up 社が SPIN⁽¹⁶⁾ を提案している。これは写真9に示すように FRP 製の巨大な半透明球殻内壁を歩行面とし、この中をユーザが歩くことで二次元平面の任意方向への移動を実現している。球殻は歩行面のレンダリング

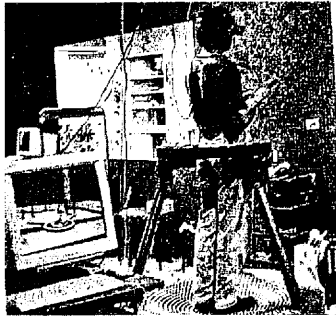


写真10 The Omni-directional Ball-bearing Disc Platform (Tamkang University 提供)

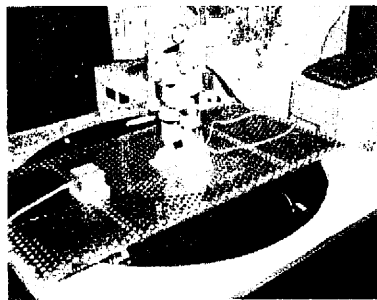


写真11 Ball Array Treadmill (工学院大学 提供)

だけでなく歩行空間の映像提示のためのスクリーンの役割も果たしている。逆に球の上を歩行して二次元無限軌道を構成する方式として、Wangらは大きな球状ベルトを二軸キャスターでパッシブに駆動する方式¹⁹⁾の研究を進めている。これらの球を小さくした方式として、Huangはクレータ状の歩行面に圧力センサ付きの小さなボールベアリングを敷き詰めてパッシブ方式の二次元無限軌道を実現した Omni-directional Ball-bearing Disc Platform¹⁸⁾を提案した(写真10)。同様の構成でアクチュエータでボールベアリング群を駆動するアクティブ方式として伊藤らは Ball Array Treadmill¹⁹⁾の開発を進めている(写真11)。

また、LI共通の課題であるが、歩行速度の加減速の際に生じる慣性力の有無が、特に応答のよいベルト機構においては実歩行との違和感となる。高橋らは平衡感覚の知覚限界以下でベルト速度を制御するための実験を行い、長さ50m以上のベルトが実現できればユーザに知覚されない加減速制御が可能であることを示した²⁰⁾。擬似的にこの慣性力による加減速感と傾斜歩行時の重力感覚を生成する方法として、Christensenらは先に紹介した Treadport で Theter と呼ばれるモーター制御の押し棒によってユーザの腰部へ擬似的な慣性力を提示する手法²¹⁾を提案した。

3.3 スライディングサフェース型

トレッドミルとは逆に、歩行面を固定しユーザ側に相殺機能をもたせる方式として、岩田らの Virtual Perambulator²²⁾の提案がある(写真12)。ここではユーザの足の裏に車輪、あるいは、摩擦係数の低い素材を取り付けた特



写真12 Virtual Perambulator (筑波大学提供)

殊な靴によって蹴り出し時と踏む込み時の摩擦感を提示している。もちろんこれだけでは氷の上に乗っているのと同じく不安定状態であり、ユーザの上体の固定のために特殊ハーネスや円形の手摺状の保持機構を併用せねばならない。また、磁気位置姿勢センサ等で歩行動作を計測して移動結果に反映させる。基本的にはパッシブ型となり歩行の自然さはやや低下するが、システムが非常に簡略化できる。

3.4 定点歩行動作 (Walk in place) 型

定点での足踏み動作によって仮想空間内の移動操作を行う方式も数多く提案されている。センサをユーザに装着する方式では、Choiらが靴底に配置した4個の圧力センサの出力値から足踏み動作を検出する Cyber Boot²³⁾を提案した。雨宮らの WARP²⁴⁾では(写真13)、ひずみゲージを用いたゴニオメータによって大腿部の運動を計測し、足踏み運動から擬似的に進行速度と進路変更動作を検出する手法を提案している。

一方、ユーザへの負担がほとんどない非装着方式では、江島らがセンサ組み込んだターンテーブル²⁵⁾の上で足踏み動作を行う LIを提案した(写真14)。円盤内には4個のフィルム状圧力センサを組み込み、重心の変動情報から歩行動作を検出する。同時に赤外線カメラで体の向きを検出して進行方向を決め、旋回時にはターンテーブルで旋回動作を相殺する。Convillionらの Pressure Mat²⁶⁾では64個の力センサを埋め込んだマット上での足踏み動作から、前進、後進、左右旋回動作を検出するパターンマッチング手法を



写真13 WARP (東京農工大学提供)

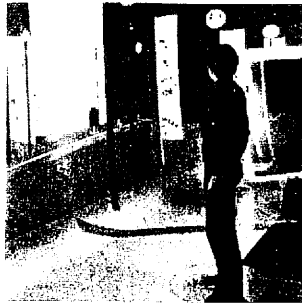


写真14 ターンテーブル式 LI (東京工業大学提供)



写真17 UniPort (Sarcos Inc. 提供)

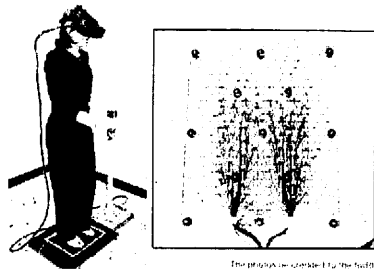


写真15 The Pressure Mat (Southwest Research Institute 提供)



写真16 The Gaiter system (Naval Research Lab. 提供)

提案している(写真15)。

特に非装着の定点歩行動作型では、足踏み動作を繰り返すうちに、ユーザの位置が徐々にセンサ範囲から外れていく恐れがある。江島らのターンテーブル方式ではテーブルの周囲にわずかな段差を設けてユーザにターンテーブル内での位置を知覚させている。一方、積極的にユーザを所定位置に確保するために、TemplemanとKaufmanらのシステムでは天井から吊したリンク機構によってユーザの足踏み位置をフィードバックするGaiter^{27),28)}を提案している(写真16)。Gaiterではユーザの動作を靴底の圧力センサと膝の磁気センサから計測し、歩行結果に反映させている。

3.5 ペダル型

動作計測を単純化するために歩行動作の自由度を下げ、歩行に近い動作によって移動感覚を実現する手法として、ペダルを用いる手法がある。Darkenらは軍事訓練のためにUniPortと呼ばれる固定された1輪車形状装置を提案した

(写真17)。ここではペダルの回転速度で移動速度を入力し、頭の方向で移動方向を入力している。Broganらは自転車そのものにセンサをとりつけ、インタフェースとして用いる例²⁹⁾も提案している。ペダルへの負荷調整と基部の動きで若干の地形情報の提示機能が実現される。

3.6 その他の方式

さらに単純化して、ユーザ位置と移動動作を単にマッピングすることで移動感を提示する方式も提案されている。門林らのVISTA Walk³⁰⁾では画像処理により得られるユーザの位置情報を、小林らのTilting Disc³¹⁾ではユーザの重心位置を、ジョイスティックの入力であるかのように移動方向と移動速度に対応させて仮想空間移動を行う装置を提案した。いずれも映像フィードバックが主目的であり、LIとしては結果的に体感的なフィードバックには乏しくなる。

4. おわりに

電信から始まったコミュニケーションのための装置は、音声の電話、映像を加えたTV電話を経て、携帯電話の爆発的普及に伴う個人化、そして現在では携帯メールによる非同期化が進んでいる。ここに至って、意図を伝えるためのコミュニケーション手段はほぼ完成しているであろう。では次世代のコミュニケーションの目的、あるいは、その動機は何か？ われわれはそれは誰かと積極的に話をするのではなく、非同期的に他者の存在や体験・経験を伝えることであり、それを実現するためには五感に対応したメディアが不可欠であると考えている。

本稿ではそのようなメディアの一部を構成する歩行感覚提示装置について多くの実現例を交えてその特徴と応用方法についてまとめた。単に仮想空間内の移動のコマンドを発するだけならば、このような装置を駆使して体で指示入力をする必要性はまったくない。むしろ、指差しや、音声で“あっちへ進め”、“こっちへ行け”程度のことで事足りるであろう。それでもなお、苦勞して、疲れてまで仮想空間を自分で歩くことが本当に必要であろうか。あえてそのような体験をし、その体験を他者と交わすことこそがこれから

の時代に重要なコミュニケーションであると考えている。

(2003年11月25日受付)

参考文献

- 1) <http://www.sarcos.com/>
- 2) H. Iwata, H. Yano and F. Nakaizumi: Gait Master: A Versatile Locomotion Interface for Uneven Virtual Terrain, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2001, 131/137 (2001)
- 3) 塩澤, 米澤, 岸場, 牧川: 様々な歩行動作と歩行面を再現する仮想空間内歩行システム, 第17回生体・生理工学シンポジウム論文集, 123/126 (2002)
- 4) J. Yoon, J. Ryu, K. Lim and Y. Na: Design and Simulation of A Virtual Walking Machine Based on Gait Analysis, IASTED International Conference, Robotics and Applications, 82/87 (2003)
- 5) R. Latham: Device for Three Dimensional Walking in Virtual Space, <http://www.cgsd.com/OmniTrek.html>
- 6) G. P. Roston and T. Peurach: A Whole Body Kinesthetic Display Device for Virtual Reality Applications, proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, 3006/3011 (1997)
- 7) 岩田, 矢野, 福島: CirculaFloor: 全方向移動床群の循環によるロコモーションインタフェース, 日本VR学会第8回大会論文集, 53/56 (2003)
- 8) F. P. Brooks Jr.: Walk Through - a Dynamic Graphics System for Simulating Virtual Buildings., Proc. of 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, 9/21 (1986)
- 9) M. Hirose and K. Yokoyama: Synthesis and transmission of realistic sensation using virtual reality technology, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 33-7, 716/722 (1997)
- 10) 野間, 宮里, 中津: 能動的歩行動作に対応した歩行感覚提示装置の開発, 日本VR学会論文誌, 4-2, 407/416 (1999)
- 11) Noma, Sugihara and Miyasayo: Development of Ground Surface Simulator for Tel-E-Merge System, Proc. of IEEE-Virtual Reality 2000 Conference, 217/224 (2000)
- 12) J. M. Hollerbach: Locomotion interfaces, in Handbook of Virtual Environments Technology, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 239/254 (2002)
- 13) R. P. Darken, W. R. Cockayne and D. Carmein: The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds, proc. of ACM UIST'97, 213/221 (1997)
- 14) 岩田, 吉田: 無限平面を用いた仮想歩行装置, 日本VR学会第2回大会論文集, 254/257 (1997)
- 15) S. Ikeda, T. Sato, M. Kanbara and N. Yokoya: Terepresence System. Using High-resolution Omnidirectional Movies and a Reactive Display, Proc. of IEEE ISMAR'03, 292/293 (2003)
- 16) <http://www.timesup.org/Spin/index.html>
- 17) Z. Wang, K. Bauernfeind and T. Sugar: Omni-directional treadmi system, Proceedings 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 367/373 (2003)
- 18) Jiung-Yao Huang: An Omnidirectional Stroll-Based Virtual Reality Interface and Its Application on Overhead Crane Training, IEEE Transaction on Multitmedia, 5-1 (2003)
- 19) 伊藤, 金子, 堀田, 若林: ボールアレイトレッドミルの搬送経路のシミュレーションによる検討, 日本VR学会第8回大会論文集, 45/48 (2003)
- 20) 高橋, 稲見, 柳川, 前田, 館: 人工現実環境における歩行感覚提示に関する研究, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, 1-2, 25/28 (1999)
- 21) R. Christensen, J. M. Hollerbach, Y. Xu and S. Meek: Inertial force feedback for the Treadport locomotion interface, Presence, 9-1, 1/14 (2000)
- 22) H. Iwata and T. Fujii: Virtual Preambulator: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment, proc. of IEEE VRAIS'96, 60/65 (1996)
- 23) I. Choi and C. Ricci: Foot-Mounted Gesture Detection and its Application in a Virtual Reality Environment, Proc. of IEEE Int'l conf. on System, Man and Cybernetics, 5, 4248/4253 (1997)
- 24) 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VR学会論文誌, 6-3, 221/228 (2001)
- 25) 江島, 長谷川, 小池, 佐藤: 等身大仮想環境のためのターンテーブルを用いた移動インタフェースの開発, 日本VR学会第6回大会, 87/90 (2001)
- 26) W. Couvillion, R. Lopez and J. Ling: The Pressure Mat: A New Device for Traversing Virtual Environments Using Natural Motion, proc of the Interservice/Industry Training Simulation and Education Conference, 199/211 (2001)
- 27) <http://www.seas.gwu.edu/kaufman1/NRL/Gaiter.html>
- 28) J. Templeman, P. Denbrook and L. Sibert: Virtual locomotion: walking in place through virtual environments, Presence, 8-6, 598/617 (1999)
- 29) D. C. Brogan, R. A. Metoyer and J. K. Hodgins: Dynamically Simulated Characters in Virtual Environments, IEEE Computer Graphics and Applications, 18-5, 85/68 (1998)
- 30) R. Kadobayashi, K. Nishimoto and K. Mase: Design and Evaluation of Gesture Interface for an Immersive Virtual Walk-through Application for Exploring Cyberspace, Proc. of Third IEEE Int'l Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, 534/539 (1998)
- 31) M. Kobayashi, S. Shiwa, A. Kitagawa and T. Ichikawa: Tilt- ing Disc: A Real Scale Interface for Cyberspace, Proc. of SID 98, 333/336 (1998)

[著者紹介]

野間 春生 君 (正会員)



1966年5月1日生。94年筑波大学博士過程工学研究科修了。同年ATR通信システム研究所入所。96年ATR知能映像通信研究所研究員, 2001年ATRメディア情報科学研究所主任研究員に就任。人工現実感, 臨場感通信, 力覚インタフェース, 体性感覚インタフェース等の研究に従事。博士(工学)。98年電子情報通信学会学術奨励賞, 99年日本VR学会学術奨励賞, 2000年日本VR学会論文賞受賞, 2001年第16回電気通信普及財団賞テレコムシステム技術賞, 各受賞。日本VR学会, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会, IEEE, ACMなどの会員。