JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	スパイダーヒーロー： 張力提示システムによるVRアプリケーション
Author(s)	石橋, 賢; Toni, Da Luz; Remy, Eynard; 北, 直樹; 姜, 南; 瀬木, 宏; 寺田, 圭介; 藤田, 恭平; 宮田, 一乗
Citation	第七回知識創造支援システムシンポジウム予稿集
Issue Date	2010-02-25
Type	Conference Paper
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/9009
Rights	本著作物の著作権は著者に帰属します。
Description	第七回知識創造支援システムシンポジウム，主催：日本創造学会，北陸先端科学技術大学院大学，開催：平成22年2月25日～26日，予稿集発行：平成22年2月25日

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

スパイダーヒーロー：張力提示システムによるVRアプリケーション

Spider Hero: A VR application with pulling force feedback system

石橋 賢[†] Toni Da Luz[‡] Remy Eynard[‡] 北 直樹[†] 姜 南[†]
瀬木 宏[†] 寺田 圭介[†] 藤田 恭平[†] 宮田 一乘[†]

Ken Ishibashi[†] Toni Da Luz[‡] Rémy Eyanrd[‡] Naoki Kita[†] Nan Jiang[†]
Keisuke Terada[†] Hiroshi Segi[†] Kyohei Fujita[†] Kazunori Miyata[†]

北陸先端科学技術大学院大学[†]
Japan Advanced Institute of Science and Technology

Arts et métiers ParisTech[‡]

Abstract Spider Hero is a VR application with pulling force feedback system. This VR application allows the user to jump from one building to another using spider-web, like Spiderman™ in a virtual city. This application gives the user two kinds of feedback, which are pulling force and wind. In addition, some visual and sound effects give the users a feeling of exhilaration. The aim of this application is to give the user the enjoyment of using superpower. We exhibited this application twice, and surveyed from the guests of these exhibitions by questionnaire. As the result, we confirmed that this application achieved our aim.

1. はじめに

スパイダーヒーローは，張力提示システムを用いた VR アプリケーションである．筆者らは，世界的に有名なスパイダーマン ™ の持つクモの糸を使った移動手段に着目し，バーチャル都市空間をクモの糸を使って自由に飛び回ることができる VR アプリケーションを制作した．本 VR アプリケーションの力覚提示において，クモの糸による張力提示が重要な要素となる．代表的な既存の力覚提示デバイスとして，SPIDAR[1] や PHANTOM[2] などが挙げられる．これらの力覚提示デバイスは非常に有効であるが，構造が複雑または高コストである問題点が挙げられる．そこで筆者らは，シンプルな構造かつ低コストであるバキュームデバイスを用いた張力提示システムを制作した． 本 VR アプリケーションの目的は，超人的な能力を使用する楽しさをユーザに提供することである．

本稿では，制作した張力提示システムおよびそれを用いた VR アプリケーションについて述べる．また，本作品の展示において得られたユーザからのアンケートに基づき本作品の有効性を評価する．

2. 関連研究

本章では，既存の力覚提示デバイスについて概説する．代表的な既存の力覚提示デバイスとして，SPIDAR や PHANTOM が挙げられる．SPIDAR は立方体の四隅に設置されたワイヤーをモータ制御することでユーザに感覚提示を行う手法を用いている．一方 PHANTOM は，ペン型のデバイスを使用しており，そのデバイスをロボットアームによって制御することでユーザへの感覚提示を行う．これらのデバイスを使用した応用として，SPIDAR を用いた Virtual Canoe[3] や Robogamer[4] などが挙げられる．また，物体を引っ張る VR アプリケーションである Nuku[5] が空気圧を使用したデバイスを導入しており，ユーザに強い力を与えることを可能にし

ている．さらに，大きな装置を必要とせず持ち運び可能な牽引力を提示するシステムとして，

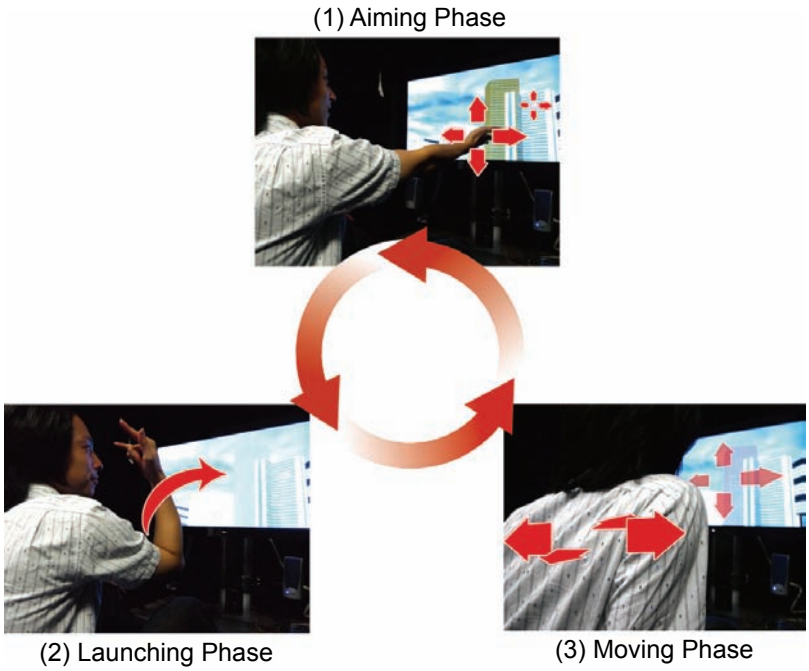

図1 体験の流れ

Force Display[6]（ぶるなび）が提案されている．

また，本 VR アプリーケーションには風覚を提示する風覚提示システムを導入している．既存の風覚を提示するデバイスとして，BYU BYU view[7] や Wind stage[8] が挙げられる．前者は，メッシュ状のスクリーンに風力を感知するセンサと送風用のエアコンプレッサーを使用して風情報を送受信する．後者は，ドーム型のフレームワークに 25 個のブロワーファンモジュールが取り付けられており，wind camera によって風情報を取得し，その風情報を基に風覚を提示することで，過去や別の場所の風を感じることができる．

これらの，既存のデバイスは非常に効果的であるが，構造が複雑または高コストである問題が挙げられる．そこで，本アプリケーションにおいては，シンプルな構造かつ低コストであるデバイスを制作した．

3. スパイダーヒーロー

スパイダーヒーローは，スパイダーマン ™ のようにクモの糸を使ってビルの谷間を飛び回ることができる VR アプリケーションである．ユーザは，画面上のポインタを操作し，移動先のビルを選択，腕を振りクモの糸を発射することで糸がビルに張り付き，その糸によって引っ張られながらビルとビルとの間を移動する．ユーザは，操作デバイスとしてウェブシュータと圧力センサを用いる．ウェブシュータはユーザの両手に装着し，画面上のポインタの操作およびクモの糸の発射に用いる．圧力センサはユーザの足下に設置し，ユーザの体重移動を検知してビル選択のための視点切換に用いる．**図 1** にユーザの体験の流れを示す．

ユーザは，以下で示す 3 つの操作手順を繰り返すことで次々とビルの谷間を移動する．

Aiming Phase：まず，ユーザはウェブシュータを用いて上下左右に画面上のポインタを操作し，バーチャル都市空間の移動先のビルを選択する．ビルの選択後，ウェブシュータのトリガーボタンを押すことでポインタがロックされる．

Launching Phase：次に，クモの糸を発射する．トリガーボタンを押した状態で，ユーザは腕を振る．振り終わった時にトリガーボタンを離すことでクモの糸が選択されたビルに向かって発射される．ただし，ユーザの腕の振りが不十分な場合，糸はビルに張り付かず地面に落ちてしまう．すなわち，ユーザの腕を振る速度が糸の最大飛距離となる．ユーザは，より遠くのビルへ移動する場合，より速く腕を振る必要がある．

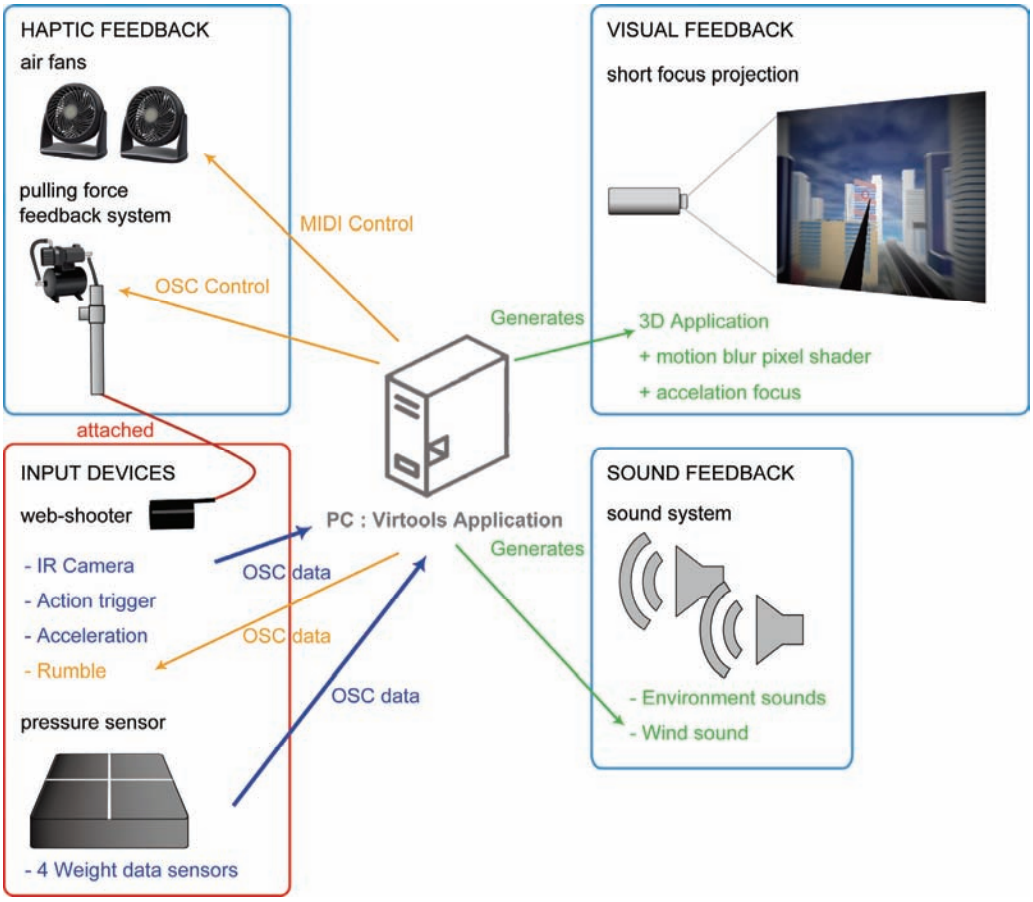

図2 システムの全体構成

Moving Phase：クモの糸がビルに到着すると同時に，その糸によって引っ張られながらビルとビルの間を移動する．この時，本手法で提案する 2 種類の感覚提示システムによりユーザに張力と風覚を提示する．また，空中を移動する際に，ユーザは圧力センサ上で体重移動することで視点を切換える．

4. システムの概要

本システムは，金属製パイプでフレームワークを構築し，感覚提示システム，映像システム，音響システムで構成される．また，操作には 2 種類のデバイスを用いる．システムの全体構成を**図 2** に示す．

感覚提示には，バキュームデバイスによる張力と 2 つのエアファンによる風覚提示を行うシステムを用いる．映像システムには短焦点プロジェクタを使用することで，ユーザの操作スペースを確保している．また，映像効果としてブラーやフォーカス効果，リフレクションマッピング，シャドウマッピングなどの視覚効果を用いて没入感を演出している．バーチャル都市空間の構築には，高精細な建築物モデルおよびテクスチャを用いている．音響システムでは，バーチャル都市の環境音と空中を移動する際の風の効果音を導入している．操作デバイスは，ユーザが両腕に装着するウェブシューターと，視点切換に用いる圧力センサを使用する．なお，VR アプリケーションの開発には Virtools^{TM}4.0 を利用し，ソフトウェアとハードウェア間におけるデータ通信を OSC (Open Sound Control)プロトコルを介して行っている．

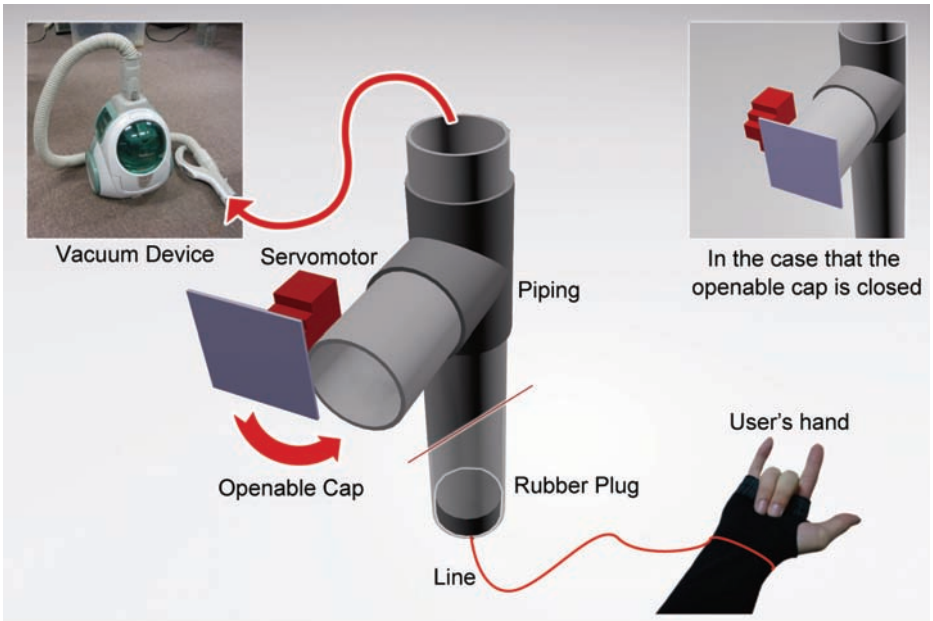

図3 システムの全体構成

5. システムの実装

5.1 張力提示システム

本 VR アプリケーションにおいて，最も重要となる要素として，張力提示が挙げられる．2章で述べた既存のシステムでは，複雑な構造または高コストである問題点が挙げられる．さらに，クモの糸に引っ張られながら移動するというコンセプト上，システムの耐久性およびユーザへの安全性が極めて重要な課題となる．そこで，筆者らは，上記の条件を満たした新しい張力提示システムを提案する．提案する張力提示システムの構成図を**図 3** に示す．

本張力提示システムの特徴は，バキュームデバイスを用いている点である．従来の力覚提示デバイスは，モータ制御によるものが多く，ユーザが過度に強い力を加えた場合，システム自体が破損する．反対に，モータ制御を強めるとユーザに強い負荷を与えてしまう危険性がある．本張力提示システムでは，空気圧を動力とすることでシステムの耐久性と安全性の向上が期待される．ここで，本張力提示システムの張力提示方法について詳細に述べる．

まず，バキュームデバイスが作動する．調光器によってバキュームデバイスの電圧を制御し，PC から MIDI 信号が調光器に送られることで作動する．同時にサーボモータによる開閉式キャップが閉じることでパイプ内を減圧する．減圧によってパイプ内のゴムプラグが吸い上げられ，ゴムプラグに取り付けられた糸を通してユーザへ張力を提示する．本張力提示システムに用いた糸は，釣り糸とポリウレタン製のゴム紐を繋ぎ合わせており，糸の強度とクモの糸の伸びる感覚を兼ね備えている．また，開閉式キャップが空気口の大きさを変化させることで，張力だけでなく，ビルへ到着した際のクモの糸が切れる感覚も提示することができる．

本システムは，モータを動力とせず，空気圧により用いるため，スムースな強い張力を提示することができ応答性が高い．また，ユーザが糸を引くことも可能であり，ユーザへの負荷が低く安全性が高い．さらに，強い力で糸を引いた場合においても，システムへの影響が少なく，堅牢性の高いシステムであると言える．

5.2 風覚提示システム

本 VR アプリケーションでは，高層ビル間を移動すること，クモの糸によるユーザの移動は加速度運動であることを前提としており，移動の際の向かい風を再現すること，ユーザの移動速度に応じて風覚を変化させること，そして空中移動時の視点切換えに応じた風覚の変化が必要である．空中移動時の視点切換に応じた風覚の変化としては，ユーザが右方向へ視点を切換えた場合，クモの糸によって引っ張られている方向（ユーザの移動方向であり，この場合は左方向）から強い風が感じられ，その反対方向か

らは風が弱く感じられることが予想される．ユーザの視点切換えに応じて左右の風量を変化させるために，調光器と 2 つのエアファンを用いた風覚提示システムを制作した．調光器は前述した張力提示システムにも用いられており，同一のものを使用する．この調光器で 2 つのエアファンの電圧をそれぞれ制御することで，ユーザの移動速度に応じた風覚提示およびユーザの視点切換に対応した風覚提示を実現している．

5.3 操作デバイス

5.3.1 ウェブシューター

図 4 にウェブシューターの構成図を示す．

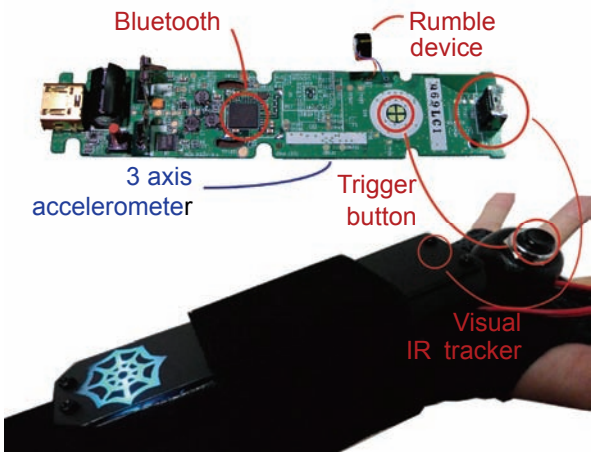

図4 ウェブシューター

ウェブシューターは，画面上のポインタを操作して，目標となるビルを選択し，腕を振ることでクモの糸の発射が可能な手袋型のデバイスである．本デバイスは，Wii リモコン ™ を基盤とし，赤外線カメラ，トリガーボタン，加速度センサ，そして振動モータで構成される．赤外線カメラは，画面上の赤いポインタを上下左右に操作するために，トリガーボタンは，ポインタを目標となるビルに固定するために使用する．加速度センサは，ユーザの腕の速さを検知することで，クモの糸の最大飛距離を決定するために，振動モータはクモの糸を発射する際の力覚提示に使用する．

5.4 圧力センサ

圧力センサは，ユーザの姿勢を検知することで，ユーザによる前後左右の体重移動を判定し，仮想空間上での視点切換に用いる．今回は，圧力センサとしてバランス Wii ボード ™ を使用した．

5.5 映像および音響

映像の投影には，短焦点のプロジェクタを用いている．その理由として，張力提示システムの糸の映り込みを防止することや，ユーザが腕を振る，体を前後左右に揺らすといった大きな動作に必要な操作スペースの確保が挙げられる．一方，映像効果としてブラーやフォーカス効果を用いることで，空中移動中のスピード感と，スピードが速くなるとともに，視野が狭くなる人間の視覚特性を再現している．**図 5** にそのスクリーンショットを示す．

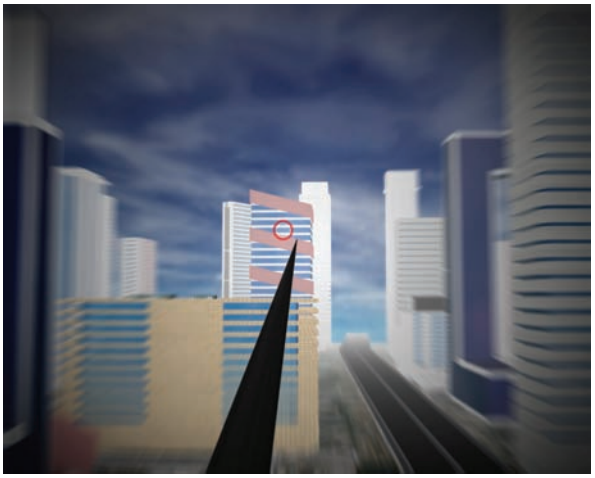

図5 ブラーとフォーカス効果

バーチャル都市空間の構築には，高精細な建築物およびテクスチャを用いており，リフレクションマッピング，シャドウマッピングなどの視覚効果を導入している．さらに，音響効果として，バーチャル都市空間の環境音や，空中移動中の風を切る効果音を用いている．環境音は，9 個の音響ボックスを仮想空間マップ上に配置し，ある場所から他の場所へ移動すると異なる環境音に切換える．風を切る効果音は，一つの効果音をループ再生しており，ユーザのスピードに連動して風の効果音のピッチを上げることで音の変化を可能にしている．これらの効果を併用させることで，ユーザへの没入感を演出する．

6. テクニカルプログラミング

6.1 マルチポインタ

本 VR アプリケーションは，Virtools™4.0 で開発している．前述したようにウェブシューターを

2 つ使用することで次々とビルとビルとの間を移動することから，画面上のポインタも 2 つ必要になる．しかし，Virtools™4.0 にはそれを扱うコンポーネントが存在しないため，複数のポインタを扱うコンポーネントを作成した．その概念図を**図 6** に示す．

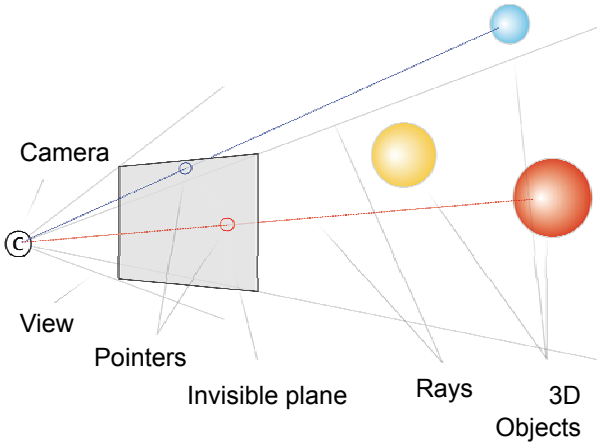

図6 マルチポインタの概念図

現実空間の人間の眼に当たる主観カメラを，透明なレイヤーの直近に設置し，ポインタはそのレイヤー上に限定して移動する．つまり，ポインタは，画面に投影されている部分が可動領域となる．次に，目標とするビルにポインタを固定する．仮想都市空間上は，3 次元空間のオブジェクトが複数存在しており，そのオブジェクトにポインタを固定する必要がある．そこで，組み込みのコンポーネントである Ray Intersection-Building Block を用いる．Ray Intersection は，光線を発射しオブジェクトと交差した場合に，そのオブジェクト情報が取得される．この組み込みコンポーネントを利用して，主観カメラの中心からレイヤー上のポインタに向けて光線を発射する．その光線が 3D オブジェクトと接した場所にポインタが固定される．以上の方法で，複数のポインタを扱う．

6.2 衝突判定

衝突判定は，アバター（ユーザが操作する対象）がビルに衝突する際，衝突の有無を検出するための処理である．衝突判定の処理は様々な方法があるが，画面の切換わりを穏やかにすることで空間情報混乱型の VR 酔いを軽減する目的で，単純な物理ルールによる衝突判定を行う．**図 7** に衝突判定モデルを示す．

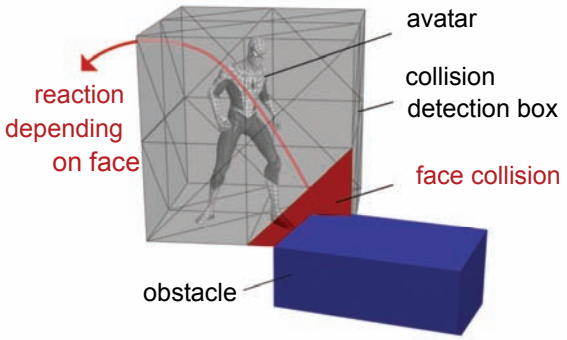

図7 衝突判定モデル

アバターの周りに 48 の面（六面体の各面に 8 面ずつ）からなるボックスを作成し，そのボックスを衝突判定に使用する．各面は配列として組まれており，各配列に 3 軸の移動方向に関するデータが格納されている．すなわち，衝突後のアバターの跳ね返り方向が各面に設定されており，例えばアバターの右方向で障害物との衝突を判定した場合，左方向に跳ね返る．また，ユーザのスピードが跳ね返りの強さと関係しており，速いスピードで障害物と衝突した場合は，強く跳ね返りながら地面に向かって落下し，遅い場合は，跳ね返りが弱くほぼ真下に落下する．この単純な衝突判定を用いることで，画面の切換わりが緩やかになり VR 酔いを軽減することができると考えられる．

7. 評価実験

今回，本 VR アプリケーションの評価実験に二度の展示とその展示においてアンケート調査を行った．本章では，展示およびアンケート調査の詳細，そして展示と評価結果に関する考察について述べる．

7.1 展示

2009 年 10 月 22 日～25 日に日本科学未来館で開催された IVRC（国際学生対抗バーチャルリアリティコンテスト）および同年 10 月 30 日～11 月 1 日に石川県産業展示館 1 号館で開催された“いしかわ夢未来博 2009”の計 7 日間，「スパイダーヒーロー」の展示を行った．**図 8** に“いしかわ夢未来博 2009”での展示の様子を示す．

図8 展示の様子

各展示においてユーザに任意のアンケート調査を行った．その詳細については次節で述べる．アンケートでのユーザの割合は，前者が 20 代～30 代の男性が多く，後者が小学生程度の男女が多い状況であった．しかしながら，ユーザには 20 代～30 代の女性や 50 代の男女などの姿もあり，性別年齢問わず幅広い層に体験してもらうことができた．展示によるユーザの傾向やコメントを以下に示す．

ユーザの傾向として，ビルの選択から移動までの操作手順に戸惑い，特にトリガーボタンを押しながら腕を振り，トリガーボタンを離す，といった一連の操作手順に多く見られた．これは，操作手順が初見のユーザにとって複雑であること，スパイダーマン ™ から着想を得た腕の振り方が日常の動作とは異なっていることが理由として考えられる．そのことから，操作が上手くいかないユーザも確認された．また，3 歳～6 歳程度の子どもにはウェブシュータが大き過ぎるという問題も見受けられた．ユーザの反応としては，張力提示システムによる張力への関心が高く，多くの人が引っ張られる感覚に対して笑みを浮かべるといった好意的な印象であるようすが伺えた．本アプリケーションには，特定の目的が存在しないが，多くの子どもは，最も高い場所を目指す，またビル移動の連続回数などの自分自身の目的を決めていた．

ユーザのコメントとして，「操作に慣れが必要」，「両手を使用しての操作が難しい」といった前述の傾向にも見られた操作性に関する意見が多く挙げられた．別の視点では，「引っ張られる感覚と風の感覚が気持ちいい」，「面白い，楽しい」といった意見も挙げられた．

また，提案する張力システムに関しては，7 日間の展示で故障することなく，その耐久性の高さが確認できた．

7.2 アンケート調査およびその評価

二度の展示において，アンケート調査による評価実験を行った．アンケートの回答者は，175 人（女性 34 人，男性 130 人，不明 11 人）であり，アンケート内容は 5 段階評価で 7 つの評価項目を設けた．なお，評価値の最大値は 5，最小値は 1 とする．その結果を**表 1** に示す．

表 1(a)が評価項目とその質問内容であり，**表 1(b)**が各評価項目の結果である．**表 1(b)**の F_{Ave} が女性回答者の評価値平均，M_{Ave} が男性回答者の評価値平均，そして A_{Ave} が全ての回答者の評価値平均である．また，本アプリケーションでは性別年齢に関わらず楽しめることを目指しているため，ウィルコクソンの順位和検定を用いて各評価項目における男女間の統計的検定値を算出し，今後の改善点を調査した．**表 1 (b)**の z，P がそれぞれ検定統計量と P 値を表す．なお，有意水準 α=0.05 とする．同表中の太線は F_{Ave} と M_{Ave} を比較した大きい値を示し，下線は P 値が有意水準を下回った値を示している．

同表より，全体的に女性の評価が高いことが分かる．しかしながら，操作性の項目において評価値が男性を下回っており，P 値において男女間に有意差が見られる．これは，ウェブシュータが女性にとって大きく，操作が困難であることが主な原因であると考えられる．同時に，操作性の項目は他の評価項目と比較して評価が低く，操作性の向上が課題であると分かる．また，爽快感の項目における P 値で男女間に有意差が見られ，男性回答者に「もう少し移動にスピードが欲しい」といった意見があり，男性にとって移動するスピードが不十分であることが分かる．

しかしながら，満足度および張力提示の項目において，他の評価項目より高い評価を得ていることから，超人的な能力を使用する楽しさをユーザに提供するという目的を達成しており，張力提示システムもユーザへ十分な張力提示ができていることが確認できる．

表 1　アンケートに基づく評価結果

No.	評価項目	質問内容
1	満足度	『スパイダーヒーロー』は楽しかったですか？
2	操作性	『スパイダーヒーロー』を快適に操作することができましたか？
3	没入感	『ヒーロー』になったような気分を味わえましたか？
4	魅力度	『スパイダーヒーロー』をもう一度プレイしたいですか？
5	爽快感	空を飛ぶ爽快感は十分に感じられましたか？
6	張力提示	糸で引っ張られる感覚は十分に感じられましたか？
7	風覚提示	風が吹く感覚は十分に感じられましたか？

(a) 評価項目の質問内容

No.	1	2	3	4	5	6	7
F_{Ave}	**4.6176**	2.7647	**3.4412**	**4.4412**	**4.0000**	**4.5882**	**3.7353**
M_{Ave}	4.4077	**3.1615**	3.2868	4.2248	3.6202	4.4077	3.5000
A_{Ave}	4.4286	3.0000	3.2644	4.2586	3.6839	4.4286	3.5714
z	1.5216	3.3510	1.2081	1.8295	2.7058	1.6753	1.5661
P	0.1281	0.0008	0.2270	0.0673	0.0068	0.0939	0.1173

(b) 男女別評価結果と統計的検定値

8. おわりに

本稿では，筆者らが提案する張力提示システムと，そのシステムによる VR アプリケーションであるスパイダーヒーローについて述べた．

評価実験の結果から，提案する張力提示システムは，7 日間の展示に対応可能な堅牢性を有し，その張力提示もユーザへ効果的であることが確かめられた．また，本 VR アプリケーションの超人的な能力を使用する楽しさをユーザに提供するという目的を達成でき，高いエンタテインメント性を有していることも確認できた．しかしながら，同評価実験より操作性に課題があり，特に女性や子どもにとって操作デバイスが大きいこと ，操作手順が複雑であることが分かった．今後は操作性の向上を目的として，操作デバイスの軽量化とコンパクト化，操作手順の見直しなどにより改善していきたいと考えている．さらに，提案する張力提示システムに多方向からの張力提示や張力に強弱を設けるなど，長所を保ちつつよりリッチなシステムとして改善していきたいと考えている．

謝辞 本研究は IVRC 実行委員会および文部科学省が実施する“組織的な大学院教育改革推進プログラム”の支援によるものである．ここに謝意を表したい．

参　考　文　献

1) Burdea, G.C.: *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, A Wiley-Interscience Publication (1996).
2) Massie, T. H. and Salisbury, K. J.: Phantom haptic interface: a device for probing virtual objects, *Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposion* (1994).
3) Hasegawa, S., Dobashi, Y., Kato, M., Sato, M., Yamamoto, T. and Nishita, T.: Virtual Canoe: Real-Time Realistic Water Simulation for Haptic Interaction, *Proceedings of SIGGRAPH 2005* (2005).
4) Shirai, A., Dominjon, L. and Takahashi, M.: RoboGamer: Development of Robotic TV Game Player using Haptic Interface and GPU Image Recognition, *Proceedings of ACE 2005* (2005).
5) 木村 秀敬, 伊豫田 旭彦, 垣内 祥史, 武井 悟, 杜 暁冬, 藤井 宗太郎, 益田 義浩, 枡野 大輔, 宮田 一乗: 引っ張りを力覚で提示する VR アプリケーション, 第 21 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 37-42, (2005).
6) Amamiya T., Maeda T., and Ando H.: Location-free haptic interaction for large-area social applications, *Personal and Ubiquitous Compution*, Vol.13, No.5, pp. 379-386, Springer (2009).
7) Sawada, E., Ida, S., Awaji, T., Morishita, K., Aruga, T., Takeichi, R., Fujii, T., Kimura, H., Nakamura, T., Furukawa, M., Shimizu, N., Tokiwa, T., Nii, H., Sugimoto, M., and Inami, M.: Byu-byu-view: A wind communication interface, Proc *Proceedings of SIGGRAPH 2007* (2007).
8) 小坂崇之: WindStage (WindDisplay & WindCaemra), 芸術科学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 57-65 , (2008).