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

Title	変位情報を用いたVRアプリケーションの実装 ： バーチャル紙相撲“トントン”
Author(s)	薮，博史；鎌田，洋輔；高橋，誠史；河原塚，有希彦；宮田，一乗
Citation	芸術科学会論文誌，4(2)：36-46
Issue Date	2005-06-20
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/8510
Rights	Copyright (C) 2005 芸術科学会．薮 博史，鎌田 洋輔，高橋 誠史，河原塚 有希彦，宮田 一乗，芸術科学会論文誌，4(2)，2005，36-46．
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

芸術科学会論文誌 Vol.4 No.2 pp.36－46

変位情報を用いたVRアプリケーションの実装
–バーチャル紙相撲“トントン”–

藪 博史† 鎌田 洋輔† 高橋 誠史† 河原塚 有希彦† 宮田 一乗‡
†北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
‡北陸先端科学技術大学院大学 知識科学教育研究センター
〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1
E-mail: {h-yabu, y-kamada, masa-t, ykawaraz, miyata}@jaist.ac.jp

概要 本論文では，変位情報を用いて制作したVRアプリケーションとして，紙相撲をテーマとした対戦型の実装例を2 件提案する．はじめに，プレイヤの跳ぶ行為を入力データとし，ディスプレイ上に表示される紙力士の動きに影響を及ぼすシステムを提案する．つづいて，このシステムに対する評価実験の結果を反映させ，プレイヤが水を揺らす行為を入力データとし，水に浮かぶスクリーンに表示される紙力士の動きに影響を及ぼすシステムを提案する.両システムとも，距離を測るセンサを用いて，プレイヤが入力装置に与える動作を変位情報として取得し，システム内のインタラクション処理に利用している． この直感的かつ堅牢なインタラクションモデルを用いることで，新たな体感型VRアプリケーションを実現することができた．

キーワード 紙相撲，VRアプリケーション，インタラクション，干渉判定，変位情報

An implementation of virtual reality application using displacement data
- Virtual Paper-Sumo "TonTon" -

YABU Hiroshi †, KAMADA Yousuke †, TAKAHASHI Masafumi †,
KAWARAZUKA Yukihiko †, and MIYATA Kazunori ‡
† School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
‡ Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa, 923-1292 Japan

Abstract: This paper introduces two match-up style VR application in the theme of *Paper-craft Sumo* using displacement data The first VR system captures the jumping motion data, and calculates the movement of the Paper-craft Sumo Wrestlers, which are projected on the screens, using those data. Incorporating the result from the evaluation experiment of this system, the second VR system is developed. The second VR system captures the waving motion data, and calculates the movement of the Paper-craft Sumo Wrestlers, which are projected onto the floating screen on water, using those data. Both systems capture the player's motion data as displacement values by means of the distance sensors, and the data are used for their interaction model. New body sensory style applications are implemented by using intuitive and robust interaction methods.

Keywords: Paper-craft Sumo, VR Application, Interaction, Interference Decision, Displacement Data

1. はじめに

対戦型のビデオゲームは，依然として高い人気を誇るゲームの 1 つである．一方で，音楽のリズムに合わせてダンスを踊る，太鼓を叩くなどの体感型ゲームも，爆発的な広がりをみせている．この要因には，プレイヤの全身を使っての直接的な操作法が，従来のゲームコントローラによる間接的な操作法と比較して，操作が容易であり，かつ，理解しやすいという，インタラクションモデルおよび，ヒューマンインタフェースの観点からの利点が挙げられる．

本論文では，始めに，プレイヤの飛び跳ねる動作を入力とする，変位情報を用いた新たなインタラクション手法を提案し，その応用事例として紙相撲をテーマにした VR アプリケーション（トントン Ver.1， NICOGRAPH2004 秋季大会で発表[8]）を紹介する．つづいて，トントン Ver.1 の評価実験の結果を反映させ，プレイヤが水を揺らす動作を入力とするVRアプリケーション（トントン Ver.2）を紹介する．

2. トントン Ver.1 の背景

本章では，新たなインタラクションの可能性を探り，制作した VR アプリケーションの研究背景について述べる．

2.1 背景

紙相撲は，1 対の紙力士を土俵上に立て，土俵の傍を指で叩くことで紙力士を操作して勝負をするという簡単な遊びである．紙相撲を遊ぶ上での一番の面白みは，指で叩くというアナログ的な行為によって生じる，予想の困難なカオティックかつ突発的な紙力士の独特な動きにあると考える．また，参加者のスキル差も少なく，老若男女を問わず，誰もが気軽に遊ぶことができるのも魅力の 1 つである．

本論文では，ゲームパッドのような複雑な操作が必要なデバイスではなく，身体動作に直結した，直接的な操作を可能とする新たなインタラクション手法の開発を第一の目的とした．研究の初期段階では，プレイヤがテーブルを叩く音を，テーブル面に設置された複数個のマイクで拾い，取得された音を解析する方法を考案した．しかし，対戦時に熱中のあまりにテーブルを強打することによるプレイヤの負傷の可能性が残されることから，この入力法は却下された．そして新たなインタラクション手法として，適度な全身の身体運動を伴い，かつ，負傷の可能性が低く，プレイヤばかりでなく，観客も楽しめるジャンピングインタラクションを考案した．

2.2 関連研究

“バーチャファイター”[1] に代表される対戦型のビデオゲームは，既に数多く市場に出ているが，ゲームパッドやジョイスティックによる，キャラクタの複雑な操作を必要とする．一方，叩く行為を入力とするものは，“Dance　Dance Revolution”[2] に代表される音楽のリズムに合せて踊るもの，最近では“太鼓の達人”[3] のように音符に合わせて太鼓を演奏するものがある．また“Jam-O-Drum”[4, 5]では，リズムに合せてテーブルに設置されたドラムパッドをタッピングし，複数人でドラムのジャムセッションを楽しむ環境を提供する．

これらの研究では，指先，もしくは腕や足の動作を何らかの入力デバイスで取得し，インタラクションする手法を提案しているが，本論文で提案しているような飛び跳ねる全身の身体動作を入力とするものは，あまり例がない．

“太鼓の達人”が好評を博している要因のひとつは，プレイヤのバチさばきの動作を観客が見て楽しみ，自分も体験してみたいという感情を沸き立たせるところにあると考える．本論文でのジャンピングインタラクションは，より大きな身体動作を伴い，かつ，単純な直接入力法であるため，完成度の高い“太鼓の達人”とは単純比較はできないが，「誰も」が「気軽」に「観客と共に」楽しめる方法であると考える．

3. トントン Ver.1 のシステム構成と実装方法

本章では，トントン Ver.1 のシステム構成とその具体的な実装方法について述べる．

3.1 トントン Ver.1 のシステム構成

本システムは，図1に示すように，プレイヤの動作入力デバイスであるジャンピングパッド 2 基，A/D 変換ボードと 2 系統出力機能を持つグラフィックカードを搭載した PC1台，および映像出力系であるプロジェクタ，反射鏡，映像投影

スクリーンを 2 組から構成されている. なお, ジャンピングパッドの四隅には, 床面からの距離を測定するセンサが設置されており, A/D 変換ボードを介してリアルタイムで測定するものとする.

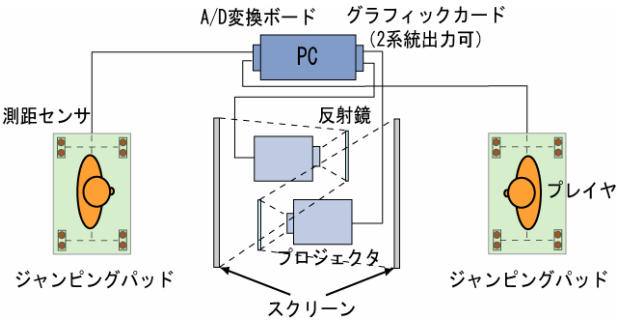


図 1: トントン Ver.1 のシステム構成図

システム内での処理の流れを以下に示す.

(P1) ジャンピングパッドに設置された測距センサにより, 床面とジャンピングパッド間の距離を測定する.

(P2) 測定結果からジャンピングパッドの揺れを算出する.

(P3) 揺れの情報を基に, 紙力士への影響をシミュレートする.

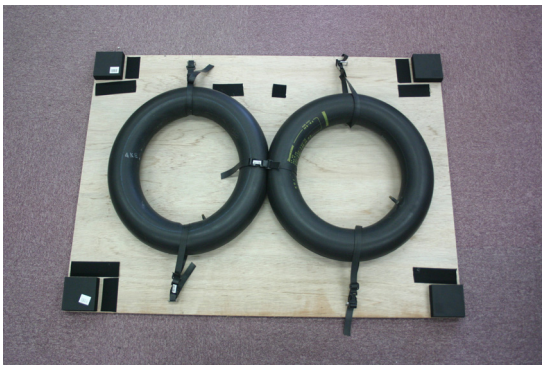
(P4) 紙力士同士の干渉, および応力を計算する. 同時に, 勝敗の判定を行う.

(P5) 各プレイヤの視点に応じて紙力士の動作映像を生成し, プロジェクタを介してスクリーンに投影する.

3.2 ジャンピングパッドの実装

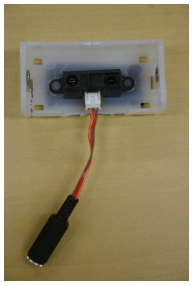
ジャンピングパッドは, 図2に示すような, 125mm×92mm×15mm の木板の底面に, タイヤチューブ(膨らました状態で半径約 250mm, 径約 90mm)を並列して 2 個, 測距センサ(SHARP 製, パーツ番号:GP2D120)を 4 隅に設置したものである. プレイヤがジャンピングパッド上で体を動かすことでパッドが揺れ, その揺れに応じて, 測距センサが取得する距離データが変化する.

システムで使用した測距センサは, 赤外光を発受光して反射物までの距離を電圧として出力するものであり, 測定範囲は 5～30cm である. 測距センサからの出力電圧は, A/D 変換ボード(インターフェイス社, PCI-3133, 12 ビット 16 チャンネル入力)により, デジタルデータへと変換される[9].

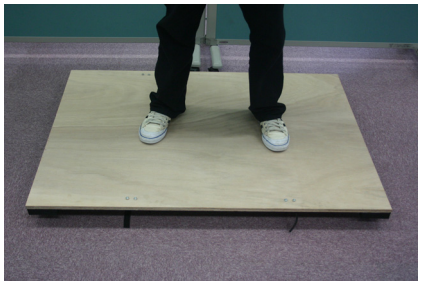


(a) ジャンピングパッドの裏面

(4 隅に設けられているのは, センサ保護用のゴムパッド. 測距センサはマジックテープでそれらの脇に固定される.)



(b) 測距センサ



(c) プレイヤが乗った場面

図 2: ジャンピングパッドの実装

3.3 ジャンピングパッドの揺れの算出

ジャンピングパッドの揺れの算出にあたり, まず, 測距センサから取得されたデータを, 距離のデータに変換する必要がある.

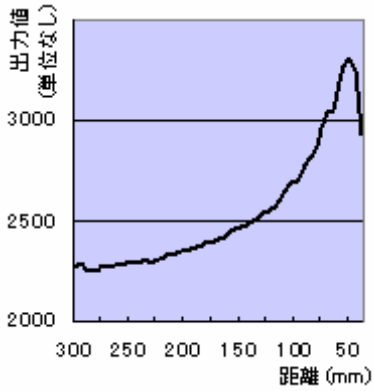


図 3: センサの出力値と距離の関係
(センサと反射物との距離が近づくにつれて, 出力値は増加する)

図 3 に, センサから取得されたデータと距離の関係を示す. 測定される距離に応じて, センサからは±5V の範囲の電圧が発せられる. この出力電圧を A/D コンバータを介して 12bit で変換した値が図 3 の出力値である. これらの実測

値を用いて，センサからの出力情報を距離の情報へと変換する．そして，ジャンピングパッドの 4 隅に設置された測距センサからリアルタイムで距離のデータをサンプリングし，サンプリングした時点でのジャンピングパッドの姿勢を算出する．

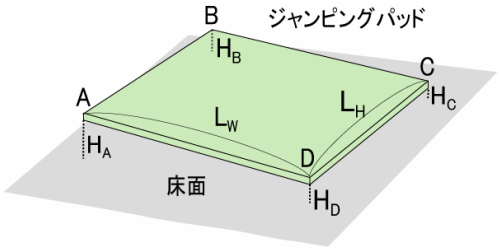


図 4：ジャンピングパッドの姿勢の算出

ジャンピングパッドの姿勢の算出は，あらかじめ測定したジャンピングパッドの縦横の長さ(L_w， L_H)と，4 隅の床面からの距離情報(H_A， H_B， H_C， H_D)を用いておこなう．すなわち，図 4 における△ABD および，△BCD の 3 次元空間内での頂点座標値から，それぞれの三角形の法線ベクトルを求め，その平均をジャンピングパッドの法線ベクトルとする．また，法線ベクトルの変化量をサンプリングの時間間隔⊿tで割ることで法線ベクトルの速度 Vn を，さらに，Vn を⊿tで割ることで，法線ベクトルの加速度 An を求める．

3.4 紙力士への力の作用

紙力士への力の作用は，3.3 節で求められた Vn および An を用いて行う．

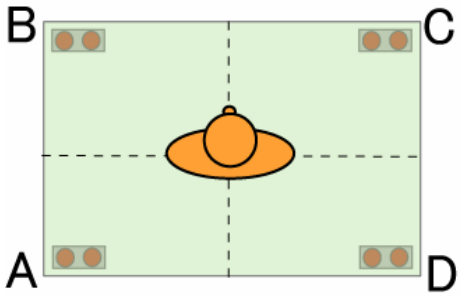


図 5：ジャンピングパッドとプレイヤの位置関係

プレイヤは，図 5 に示すように，ジャンピングパッドの中心位置に辺AD を背に，A→B 方向を向くものとする．

ある時間における紙力士の位置を P_1 とした場合，⊿t 時間後の位置 P_2は，式(1)で与えるものとする．

$$P_2 = P_1 + V_n \cdot \Delta t \qquad (1)$$

但し，ジャンピングパッドの反動で意図とは異なる方向に力士が移動する場合があるため，|An|がある閾値より大きい場合のみ力士を移動させる．ここで，閾値は経験的に設定した．

3.5 紙力士の干渉チェック

紙力士の干渉チェックは，以下の 2 段階の精度で行う．

まず，精度の粗い判定法として，境界球を用いた干渉チェックを行う．すなわち，境界球をそれぞれの紙力士に割り当て，それぞれの球が重なり合った時点で干渉の可能性があると判断し，制度を上げた 2 段階目の干渉チェックを行うものとする[5, 6, 10]．

2 段階目の干渉チェックでは，紙力士を構成する各ポリゴン(実際には三角形メッシュ)レベルでの干渉チェックを行う．すなわち，それぞれの力士を構成する三次元三角形同士の干渉チェックを，総当りで行うものとする．

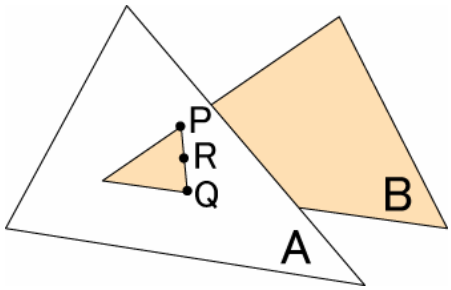
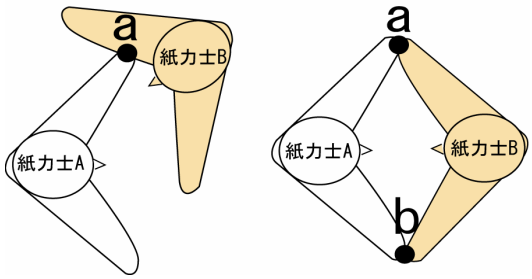


図 6：三角形の干渉チェック

図6に示すように，三角形A，Bの干渉チェックでは，まず三角形Aと，三角形Bを構成する3つの辺との交差判定を行う．もし，3辺とも交差が無い場合は，この逆の判定，すなわち，三角形Bと，三角形Aを構成する3つの辺との交差判定を行う．このようにして求めた交点P，Q の中点Rを，力の作用点とする．



(a) 1点で交わる場合　　(b) 2点で交わる場合

図 7：作用点の決定

ここで，図7に示すように，複数の作用点が存在する場合がある．図7は試合中の様子を上方から見たものである．図7(a)に示すように，紙力士同士が，1点のみで交わる場合は，上記の方法で作用点を求めるが，図7(b)で示すように，同時に2点以上で干渉する場合は，総当りでの衝突判定時に最初に求められた交点(a, bのどちらかになる)のみを作用点とした．そのため，実際の紙力士の挙動とは異なる場合も生じる．

実装に用いた紙力士のポリゴン数は，平均して約900枚であり，実時間での衝突判定が可能であった．なお，力士形状の簡素化は，衝突判定に大きな影響のない程度に留め，かつ，衝突判定の効率化が図れるものにしている．

3.6 紙力士の衝突後の挙動

紙力士の衝突後の挙動は，紙力士を仮想的に球体とみなして計算する．また，紙力士は衝突判定時に土俵に設置しているものと仮定し，以降の計算は，図8に示すような土俵上に球を投影した2次元での計算とする．ここで，3.5節で求めた作用点を球の衝突点とする．

衝突応答は，両力士の衝突時の速度ベクトルから，運動量保存則を用いて行う．両力士の正確な衝突後の動きを計算する為，図 8 に示すように，衝突の際の速度ベクトルをX’Y’直交座標系に座標変換して計算を行う．座標変換はXY座標軸を原点を中心に－θ回転させるものとする．ここで，X’軸は 2 つの球の中心を通る直線，Y’軸はこれに直交するものとし，θはX軸とX’軸のなす角とする．

V_1, V_2を座標変換した後の新たな速度ベクトルV_1’, V_2’に対して，以下のようにして，衝突後の速度ベクトルを求める．ここで，2体の紙力士の質量を，それぞれm_1, m_2とする．実装時の力士の質量は，重い力士，軽い力士などの紙力士の特徴を考慮して，その値を経験的に設定している．

まず，衝突前後の速度ベクトルの関係式は，式(2)で表される．ここで，eは跳ね返り係数で，パラメータとして与え，システムの施行実験の過程で，経験的に設定している．

$$e \cdot (V_1'x - V_2'x) = -(V_1''x - V_2''x) \quad (2)$$

次に，式(3)に示す運動量保存則により，X’Y’座標軸上での衝突後の速度ベクトル $V_1''x$ ， $V_2''x$ は，それぞれ式(4)，(5)で与えられる．

$$m_1 \cdot V_1''x + m_2 \cdot V_2''x = m_1 \cdot V_1'x + m_2 \cdot V_2'x \quad (3)$$

$$V_1''x = \frac{(m_1 - m_2 \cdot e) \cdot V_1'x + (1+e) \cdot V_2'x}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

$$V_2''x = \frac{(1+e) \cdot V_1'x + (m_2 - m_1 \cdot e) \cdot V_2'x}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

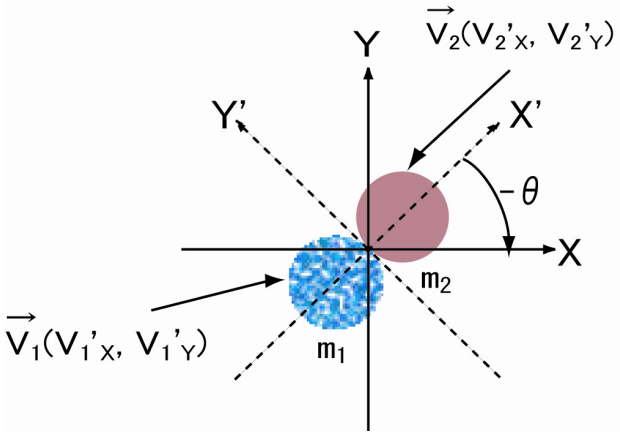


図 8：仮想球による衝突後の挙動の計算

以上の各力士の速度ベクトルの算出後，座標軸をθだけ回転して元に戻すことで， XY 座標軸における各力士の衝突後の速度ベクトルが求められる．

挙動計算においては，仮想的に球として衝突後の挙動計算をしている．すなわち，力士の回転運動などは考慮されておらず，球の単純な衝突の挙動のみ扱うものとしている．したがって，実際の紙力士とは違う動作をする場合もある．

3.7 勝敗判定

勝敗の判定条件には以下の 3 つの条件を設定し，いずれかを満たしたときに勝敗を決めるものとする．

(J1) 土俵を割る：プレイヤが操作する紙力士の中心が設定された土俵枠の外側に位置した場合，そのプレイヤの負けとする．

(J2) 体力がなくなる:プレイヤが操作する紙力士が衝突のたびに，体力パラメータを後述する手法で減少させ，先に 0 になったほうを負けとする.

(J3) 時間切れ:勝敗が決せず，一定時間(ここでは 30 秒に設定)経った場合，引き分けとする.

判定条件 J1 に関しては，紙力士の中心座標値と土俵枠との，内外判定を行えばよい. すなわち，丸い土俵枠であれば，土俵の中心からの距離と土俵の半径との関係で容易に判定可能である. 判定条件 J2 に関しては，両者のジャンピングパッドから得られる法線ベクトルの加速度 An を評価して行い，加速度の絶対値が小さいプレイヤの力士に対し，体力パラメータを一定量減らすこととし，その残量で判定する. 判定条件 J3 に関しては，試合経過時間を計算すればよい.

3.8 映像生成と表示法

紙力士の映像は，図 9 に示すように，DirectX Graphics を用いてリアルタイムで描画し，各プレイヤの正面に設置されたスクリーンに表示させる. ジャンピングパッドとスクリーンとの物理的な位置関係と制約条件から，床面に設置したプロジェクタから投影された映像は，鏡で反射されてスクリーンに背面投射させることとした.

投影される CG 映像は，1枚のグラフィックスカードで，2 名のプレイヤに対して設定されたカメラパラメータ(それぞれに対してビューアングルなどを変更)を用いて，2 画面分がリアルタイムで同時に生成される.

図 9: トントン Ver.1 の出力映像

4. トントン Ver.1 の実験結果

体験システムは 4m×2m の設置スペースに，図 10 に示すように設置される. ここで，プレイヤの向き合う方向が，設置スペースの長手方向となる.

投影スクリーンには障子紙を用い，塩化ビニール製のパイプを加工して作成したフレームに固定した. なお，垂直に設置された塩化ビニール製のポールは，セメントを流し込んだ金属製の缶で固定されており，スクリーン枠を滑り止めのゴムワッシャを介してボルトで支持している. 実験に用いた PC は，DELL 製 DimensionXPS (Pentium4 3GHz, 1Gメモリ)で，グラフィックスカードとして，GeFORCE 6800 Ultra (256MB)を用いた.

実験の結果，2 台のジャンピングパッドからの入力に合わせて，30fps の映像出力速度を保って体験することができた.

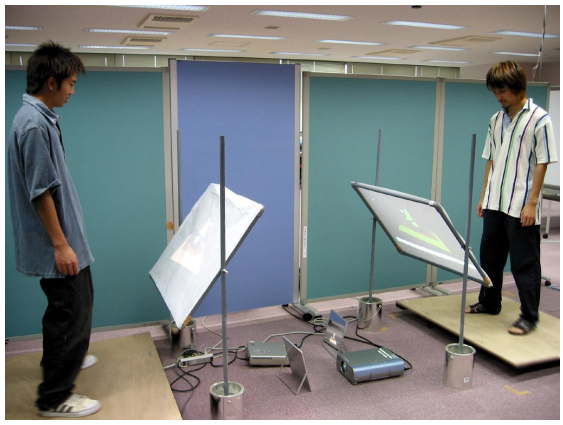


図 10: トントン Ver.1 の設置の様子

2004 年 8 月 31 日に東京科学未来館にて開催された IVRC(国際バーチャルリアリティコンテスト)東京予選大会において，本手法の評価実験を行った. 表 1 にアンケートの集計結果(総数 82 件)を示し，表 2 に代表的な意見やコメントを示す.

表1: トントン Ver.1 に対するアンケート結果

Ver.1 の評価項目	満足(%)	普通(%)	悪い(%)
台の踏み心地	31.7	54.9	13.4
楽しさ	78.0	20.7	1.2
力士の数	20.0	53.8	26.3
力士のデザイン	36.6	34.1	29.3
力士の操作	45.1	30.5	24.4
映像の質	28.0	62.2	9.8

表 2: トントン Ver.1 への代表的な意見およびアドバイス

代表的な意見	代表的なアドバイス
・ 簡単で面白い	・ 力士の操作性がほしい
・ 体力が必要でよい汗をかいた	・ 必殺技を増やしてほしい
・ 飛べて楽しい	・ キャラクタに特性をつけてほしい
・ 相手が子供だったのに負けた	・ 力のフィードバックがほしい（台が震えるなど）

評価実験の結果，面白さの点で高評価を受けた．その理由としては，力士の操作が単純かつ明確であること，ジャンプする行為の面白さなどが挙げられる．しかし，映像の質や表現法に関しては，ある程度の評価を受けたものの，力士の技が少ないため，そのほとんどが押し相撲となり，紙相撲の試合が単調化するなどの問題点が指摘された．

5. トントン Ver.1 の考察と課題

トントン Ver.1 では，プレイヤの飛び跳ねる行為が，CGの紙力士にリアルタイムで反映され，今までにない新たなインタラクションを実現することができた．

課題としては，まず紙力士の技の種類を増やすこと，力士に特性をつけることなどが挙げられる．また，摩擦力を考慮した厳密な剛体の物理シミュレーションの適用も必要であろう．入力デバイスであるジャンピングパッドに関しては，前後方向のみの操作でも勝敗が決するため，その操作法に改善の余地があると考えられる．

一方，今回の評価実験において，改善のための意見として，フィードバックの問題が挙げられた．本システムは，構造上，相手のジャンプ行為に伴う振動，すなわち力の伝達をお互いに感じることができない．したがって，力のフィードバックが実現できれば，より楽しいインタラクションを実現できるのではないかと考え，以降述べるトントン Ver.2 では，この部分にも注力した．

6. トントン Ver.2 の背景

本章では，トントン Ver.1 での問題点などを考察し，その考察結果を反映して制作した VR アプリケーションの研究背景について述べる．

6.1 トントン Ver.1 の問題点

トントン Ver.1 では，プレイヤが飛び跳ねるという行為に CG の紙力士の動きがダイレクトに反映され，紙力士を前や横などに移動させて対戦するというインタラクションを楽しむことができた．これにより，自分があたかも紙力士自身となって跳ねている，という感覚を得ることができる．しかし，これは紙力士をプレイヤの思い通りに前後左右に操作することができるということであり，予測不可能なカオティックな動きをするという紙相撲ならではの楽しさとはまったく異なるものである．したがって，いたずらに力士の技を増やしたりするだけの改良では，トントン Ver.1 の「ゲーム性」を高めるだけにとどまってしまうのではないかと考えた．また，力のフィードバックを実現する手段は大掛かりになると判断し，トントン Ver.1 の延長線上での改良はやめることにした．

そして，ゲーム性の高いトントン Ver.1 とは異なる紙相撲の実現システムトントン Ver.2 を新たに考案した．すなわち，元来の紙相撲の面白みである，自分の力士を直接操作したくても操作できない，予測不可能な動きをする紙力士を再現し，かつ，力の伝わりをより明確に感じることができるインタラクションモデルの考案および，VR アプリケーションの開発を目指した．

6.2 トントン Ver.2 の考案

トントン Ver.2 では，トントン Ver.1 における直感的な身体的インタラクションの更なる可能性を追求し，新たなインターフェイスを考案した．すなわち，トントン Ver.1 の実験および評価の結果から得られた，力のフィードバックなどの問題点を踏まえ，対戦相手から力の伝達を得ることが出来るような新たなシステムを考案した．

トントン Ver.2 では，水を媒体とすることで対戦相手からの力の伝播と，予測の困難なカオティックかつ突発的な紙力士の独特の動きの再現を試みた．また舞台設定を水中での紙相撲とすることで，波紋を用いて力の伝わりを視覚化することも試みた．

7. トントン Ver.2 のシステム構成と実装方法

本章では，トントン Ver.2 のシステム構成とその具体的な実装方法について述べる．

7.1 トントン Ver.2 のシステム構成

本システムは，図11 に示すような 4 つのモジュールから構成される．各構成要素は以下のとおりである．

(1) 水上に浮かぶスクリーンに映像を投影するプロジェクタ．

(2) プレイヤが押下し波を起こすためのウェーブジェネレータキューブ（発泡スチロール製，以下，WGC と略す．）を，3 個 2 対配置したトントンタンク（アクリル製の水槽）．

(3) スクリーン 4 隅および，6 個の WGC の下部に配置された，距離を測定するセンサ群．

(4) A/D 変換ボードを介して(3)からのデータを取得し，システム全体を制御するための PC1台．

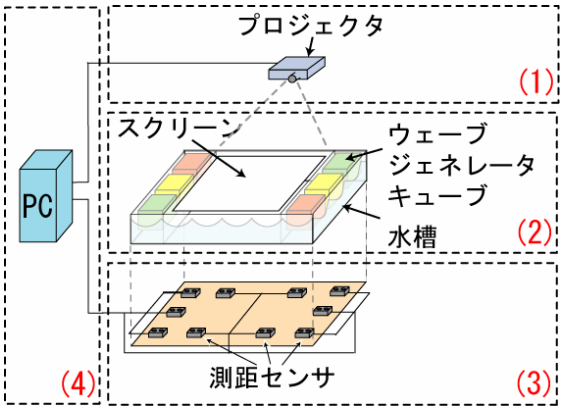


図 11：トントン Ver.2 のシステム構成図

システム内での処理の流れを以下に示す．

(P1) 測距センサにより，6 個の WGC および，スクリーンの 4 隅の水槽底面からの距離を測定する．

(P2) 測定結果から，WGC の押下の速度とスクリーンの傾きを算出する．

(P3) P2 の情報を基に，紙力士への影響を算出する．

(P4) 紙力士同士の干渉，および応力を算出する．同時に，勝敗の判定を行う．

(P5) 紙力士の動作映像を生成し，プロジェクタを介してスクリーンに投影する．

7.2 トントンタンクの実装と測距センサの配置

トントンタンクには，図 12 にあるように，1060mm×640mm×160mm のアクリル製の水槽を用いた．また，耐久性を考慮し，アクリルの板厚を 10mmとした．この水槽に水を深さ 50mm 程に入れ，水槽の両端に 185mm×190mm×100mm の WGC を 6 つ浮かべ，水槽の中央に 600mm×600mm×5mm の白のスチレンボードを浮かべて配置する．また，水槽の下には，図 11(3)に示すように，スクリーンの下 4 隅および，各 WGC のほぼ中央にそれぞれ1個ずつ測距センサを配置した．さらに，プレイヤへの防水対策として，WGC 上部をビニールで覆った．

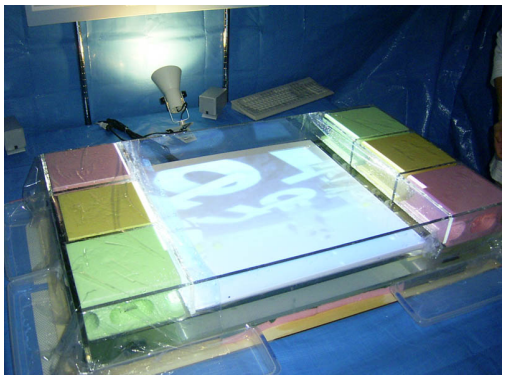


図 12：トントン Ver.2 の実装

変位情報の取得には，3.2 節と同じ測距センサを用いた．測距センサは，水槽底面を隔てて上向きに設置され，WGC やスクリーンまでの距離を測定する． 3.3 節で述べた手法で，リアルタイムで変位情報を取得し，WGC に対しては押下の速度を，スクリーンに対しては傾きを算出する．スクリーンの傾きの算出は，3.3 節のジャンピングパッドの姿勢の算出と同じであり，スクリーンの法線ベクトルの速度を用いて求める．

7.3 紙力士への力の作用

紙力士へ及ぼす力は，以下の 2 力を与えるものとする．

(1) WGC からの作用力：WGC は紙相撲のフィールドと同じ座標系にあるものとして，以下の計算を行う．各プレイヤに対して 3 つの WGC で最も移動速度が高い WGC を求める．ここで，求まった WGC を W_1, W_2, その移動速度を V_1, V_2 とし，図 13 に示すように，2 体の紙力士に向かって，W_1, W_2 の中心から V_1, V_2 の大き

さに応じた力を作用させる．図 13 の点線の矢印は W_1 からの，実線の矢印は W_2 からの，それぞれ力の大きさと作用方向を示している．

ここで，W_1，W_2 の中心位置をそれぞれ C_1，C_2 とすると，P_1 に位置する紙力士の移動後の位置 P_2 は，式(6)で与えられる．

$$P_2 = P_1 + |V_1|(P_1 - C_1) + |V_2|(P_1 - C_2) \quad (6)$$

(2) 土俵からの作用力：土俵からの 2 体の紙力士に対する作用力の計算には，スクリーンの法線ベクトルの速度を用い，各力士の新たな位置を式(1)で求める．ただし，3.4 で述べたような法線ベクトルの加速度による閾値処理は行わない．

以上で求められた移動量を合算して，最終的な各力士の位置を決める．

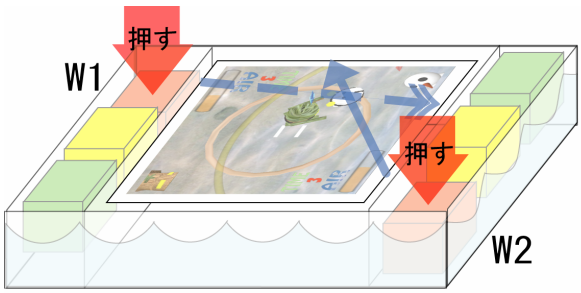


図 13：WGC からの作用力

7.4 紙力士の干渉と衝突後の挙動

紙力士の干渉判定及び衝突後の挙動は，3.5，3.6 節と同じアルゴリズムを用いているが，水中での挙動を表現するため，水抵抗を考慮し，紙力士の動きの鈍さを表現した．

7.5 勝敗判定

勝敗の判定条件は以下の 2 つの条件のいずれかを満たした時に勝敗を決めるものとする．

(J1) 土俵を割る：水中での紙相撲の土俵として，円筒形の空間フィールドを定義し，プレイヤの紙力士が円筒の外側に位置した場合，そのプレイヤを負けとする．ここで，高さには制限はないものとする．

(J2) 時間切れ：勝敗が決せず，一定時間（ここでは，45 秒に設定）経った場合，引き分けとする．

7.6 映像生成と表示法

図 14 で示すように，紙相撲の映像は，DirectX Graphics を用いてリアルタイムで描画し，水槽の斜め上からスクリーンに投影させた．特殊効果として，バンプマッピングを用いて水中での揺れを演出し，WGC からの作用力をトーラスプリミティブを用いた波紋で表現した．

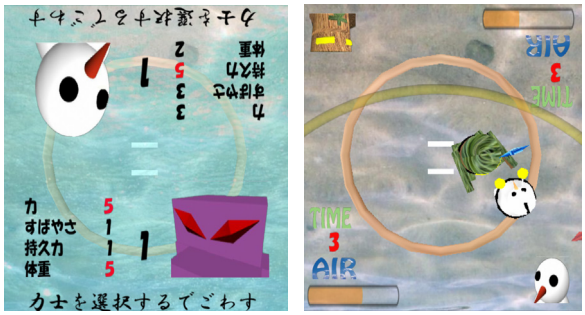


図 14：トントン Ver.2 の出力映像

8. トントン Ver.2 の実験結果

2004 年 10 月 29，30 日に開催された IVRC の岐阜本選において 100 人以上に体験してもらい，総合評価で 3 位という高評価を得た．大会での体験の様子を図15に示す．

実験に用いた PC は，DELL 製 DimensionXPS (Pentium4 3GHz，1G メモリ)で，グラフィックスカードとして，GeFORCE 6800 Ultra (256MB)を用いた．

図 15：トントン Ver.2 の体験の様子

評価実験において，体験者からは「波で操作できるのが良い」や「水中で紙相撲の発想が面白い」などのコメントが多数寄せられ，新たなインタラクション手法による紙相撲を楽しんでもらうことができた．また本システムは 2 日間で計 10 時間の遊びに耐え，その耐久性も確認できた．

評価実験の結果を，表3にアンケート集計結果（総数93件）を示し，表4に代表的な意見やコメントを示す．

表 3: トントン Ver.2 に対するアンケート結果

Ver.2 の評価項目	満足(%)	普通(%)	悪い(%)
楽しさ	86.0	14.0	0.0
パネルの押し心地	35.5	51.6	12.9
波紋の表現	33.3	59.1	7.5
映像の質	52.7	47.3	0.0
水の使用	74.2	21.5	4.3

表 4: トントン Ver.2 への代表的な意見およびアドバイス

代表的な意見	代表的なアドバイス
・ 水中の雰囲気が良い	・ 応答性が悪い
・ 発想が面白い	・ 操作が難しい
・ アトラクション性	・ 水に少し濡れる
・ うまく操作できないもどかしさ	・ 波紋の表現の改良

評価実験の結果，楽しさという点で高評価を受けた．これは，トントン Ver.1 と同じく，単純な操作性によるものだと考えられる．また，媒体に用いた水に関しては，良い印象を得ることができた．これは，波紋による力の伝わりが視覚化されていることや，自分が押した，もしくは相手が押した水の感触を感じることができることなどが評価されたと考えられる．

9. トントン Ver.2 の考察と課題

以上，実世界では実現困難な水中での紙相撲が楽しめる VR アプリケーションを紹介した．このアプリケーションでは，自分や相手の力の伝わりを水の波紋から見ることができ，さらに水を押すという感触を楽しむこともできる．既存の対戦型ゲームにおいてキーパッドを連打する行為と，トントン Ver.2 でのインタラクションの差異の一つとして，柔らかな力のフィードバックが挙げられる．すなわち，パネルを用いて水を押し出すという動作とともに，相手の力をパネルからも同時に感じることができる．また，トントン Ver.1 では 2 画面出力で表示していた体験空間を，トントン Ver.2 では 1 つに統合し，仮想の世界と現実の世界とを融合したことで，一体感を演出したと考える．

課題としては，WGC の入力に対するシステムの反応が鈍いことが指摘されており，データの取得および解析法の改良が必要である．また，水の揺れや波紋の表現に関しても改善の余地がある．キャラクタの水中での動きやアニメーションに関しても，細かな動きを与え，質の向上を目指したい．一方，水が予想以上に飛び跳ねることがあったので，一層の防水処理が望まれる．

10. 考察

以上，変位情報を用いた新たなインタラクション手法を考案し，VR アプリケーションへの応用事例を 2 件紹介した．

トントン Ver.1 では，プレイヤが飛び跳ねる行為を直接紙力士に反映させるというインタラクション法を実現し，単純でかつ直感的な動きを楽しむ環境が提供できた．トントン Ver.2 では，力の伝わりを視覚化し，水を媒体とした力の感触のフィードバックなどのインタラクションを実現できた．

自分があたかも紙力士になったつもりで直接操作ができるトントン Ver.1 と，紙相撲本来のインタラクションに近い操作法を再現したトントン Ver.2 とでは方向性が大きく異なる．すなわち，前者がキャラクタへの直接関与というインタラクションに対し，後者はフィールドへの関与を経由したキャラクタへの間接関与というインタラクションをとっている．

これらのアプリケーションでは同等のセンシングデバイスを用い，変位情報のみを用いてインタラクションを実装している．変位情報という非常に単純なデータのみを用い，その測定法も容易でロバストな手法であるため，システム全体の信頼度は非常に高いものであった．また，乱暴な操作に対する耐久性も極めて高いものになった．

両アプリケーションでは，ゲームセンターでの対戦ゲームのように相手が見えないというような対戦形態ではなく，どちらも相手の顔や体の動きを見ながら対戦する形態を実現することができた．これにより，Ver.1 では，親と子供が顔合わせで対戦をし，子供が親に勝って喜び，負けた親がそれを驚き，お互いに楽しむという場面が見受けられた． Ver.2 でも，相手が発生させた波と一緒に，どのように相手が波を起こしたかなどの様子を見ることで楽しむとい

う場面もいくつか見受けられた. これらにより, 対面型の対戦の楽しさも改めて証明することができた.

本論文で述べたVRアプリケーションでは, 多くの人々に楽しんでもらうことができたが, 今後は, このインタラクション手法を違う遊びの表現へと適用したい.

また, 本論文で述べた VR アプリケーション以外への応用例として, 物体の変形操作やジェスチャー認識による応用システムも考えられる. 例えば, 多数の小型測距センサが内蔵されたオブジェクトを用意し, これを手で変形した場合の変位量を測定して, 対象物の幾何形状の変形操作を行う, モデリングシステムへの適用が考えられる. また, 手の位置の移動量を同様のデバイスと手法を用いることで, 直感的なインタラクションを伴う新たなアプリケーションの実装が可能であると考える.

謝辞

本システムの一部は, IVRC 実行委員会(日本バーチャルリアリティ学会)の助成により実現した.

参考文献

[1] http://www.sega-am2.co.jp/vf.net/index.html

[2] http://www.konami.co.jp/am/ddr/

[3] http://www.namco.co.jp/donderpage/index.php

[4] http://www.jamodrum.net/

[5] T. Blaine, T. Perkis, ″Jam-O-Drum, A Study in Interaction Design,″ Proceedings of the ACM DIS 2000 Conference

[6] R.Parent, “Computer Animation: Algorithms and Techniques,” Morgan Kaufmann Pub, 2001

[7] E. Lengyel, “Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics,” Charles River Media, 2003

[8] 藪・鎌田・高橋・河原塚・宮田, “ジャンピングインタラクションを用いた VR アプリケーション”, NICOGRAPH2004 秋季大会, セッションⅣ VR & Visualization, pp. 101-106

[9] 河原塚・高橋・宮田, “ViewFrame － 画像処理による位置検出法を用いた「借景」”, 情処ヒューマンインタフェース研究会, 2003-HI-106(7), pp.45-51

[10] Mark Deloura, “Game Programming Gems,” Charles River Media, 2000, pp.390-402