

# 流動床インタフェース：液体のようにふるまう砂を用いたインタラクティブシステム

的場 やすし<sup>†1</sup> 菅谷 諭<sup>†2</sup>

**概要：**砂のような固体粒子を入れた容器の底面から空気のような流体を上向きに噴出させると、固体粒子は浮遊懸濁して液体のような流動性を示すようになる。本研究ではこの流動化した砂を用いて、ボートに乗るシミュレータや、歩行面の固さの制御等、新しいインタラクティブシステムの可能性を提示する。

## Fluidized Bed Interface: Interaction System Using Sand Behaving Like Liquid

YASUSHI MATOBA<sup>†1</sup> SATOSHI SUGAYA<sup>†2</sup>

**Abstract:** When a fluid such as air is jetted upward from the bottom surface of a container containing solid particles such as sand, the suspended solid particles float in liquid like fluidity. In this research, we present the possibility of a new interactive system such as simulators riding a boat or hardness control of walking surface, using this fluidized sand.

### 1. はじめに

実世界の体験を人工的に作り出す VR システムは、これまでに飛行機の操縦を体験できるフライトシミュレータや、車の運転が体験できるドライブシミュレータなど様々な種類が開発されてきた。これらの装置は人間が搭乗する座席を油圧シリンダやモータによって動かすことによって、人間に本物の体験に近い加速度を与えている。

しかし小型ボートのような水に浮かぶ軽量の乗り物の動きを人工的に再現することは困難であった。それは、実際の水の上でのユーザの能動的な体重移動によってボート本体が大きく揺れる動きを遅延なく再現するのが困難であった等の理由による。

また、液体に触れる触覚を人工的に作り出すことも同様に困難であった。水中では人体の皮膚表面全体に圧力が加わるが、この圧力を機械的なアクチュエータで再現することは難しい。また、水中を泳いだり浮かんだりする浮遊感を再現することも困難である。それは、水中で体を動かしたときの水の粘性や流体の運動をリアルタイムに計算して機械的に再現することが難しいからである。

我々は、砂を満たした大型水槽の底に空気を吹き込むことで、砂に液体のような流動性を持たせ、上述した液体とのインタラクションを疑似的に実現できる装置の開発を行った。砂の流動性を制御することにより、従来不可能だった様々なインタラクションが可能になると考えられる。

### 2. 先行研究

砂のような小さな個体粒子を充填した容器の底から空気のような流体を適度に噴出させると、流体によって粒子を舞い上げる力と重力のバランスが釣り合い、粒子全体に液体のような流動性を持たせることができる[1]。この状態を流動床または流動層と呼ぶ。

ゴミ処理場などで使用されている流動床型焼却炉では、高温（600度～800度等）の砂を入れた焼却炉内底部から空気を吹き込み砂を流動化し、その中にゴミを投入することで、短時間に効率よくゴミを燃焼させている。本研究で使用する装置は流動床型焼却炉で用いられている砂の流動化と同じ原理である。

長谷川らのバーチャルカヌー[2]は、水を使用せずにカヌーに乗って水上を操船する体験ができる装置である。前方と床面のスクリーンには水上の景色が投影され、手に持ったパドルで水をかく動作をすると、動きに合わせたフォースフィードバックがパドルに得られ、動きに応じた映像がスクリーンにリアルタイムに投影される。しかし、カヌーは床に固定されているため、ユーザの体重移動によってカヌーが動くことはなく、水上に浮かんだような浮遊感は得られない。

また、エンターテインメント産業において、上映される映像の内容に同期させて観客の座席に動きを与えるシステムが知られている。4DX シネマ対応の映画館で上映されるディズニーの「アリス・イン・ワンダーランド/時の旅」[3]等

<sup>†1</sup> お茶の水女子大学  
Ochanomizu University

<sup>†2</sup> ものつくり大学  
Institute of Technologists

では、揺れる船の立体映像に合わせて座席を揺らすことにより、あたかも船に乗っているかのような体験を得ることができる。しかし、この座席の揺れはコンテンツとしてあらかじめプログラムされたものであり、ユーザの体重移動を反映するインタラクティブな仕組みではない。

### 3. システム構成

本実験装置は縦 1745 mm 横 1100 mm 高さ 600 mm の大型水槽の底面に、直径 1.2 mm の穴を 7 個開けた塩ビパイプ（外径 48 mm 長さ 1500 mm）7 本を設置し（図 1）、水槽内に約 1000 Kg の砂（珪砂 7 号、平均粒度 0.13 mm、かさ比重 1.2）を充てんする。塩ビパイプにはエアコンプレッサー（日立製 OSP-7.5VAN）からエアホースを介して最大圧力 0.7 MPa の空気を供給し、大型水槽内の砂を流動化させる。砂の流動性は、運用者のエアバルブの回転レバー操作により、流動性が無い状態から完全に流動化した状態まで変化させることができる。



図 1 大型水槽と内部に設置した塩ビパイプ  
Fig 1 Large water box with PVC pipe inside.

### 4. インタラクション

前章で説明したシステムを用いて、下記に述べる 3 種類のインタラクションについて検証を行った。

#### 4.1 ボートのシミュレーション

砂の上にボートとして縦 800 mm 横 600 mm 高さ 340 mm の小型水槽を置き、体験者はこの中に座る。砂に流動性を与えることによって、小型水槽は砂の上に浮かび、水面上のボートに乗って浮かんでいる時と同じ乗り心地を疑似的に与えることができる。逆に空気の供給を止め、流動性が無くなると、ボートが陸上の砂場に置かれた状態になり動かなくなる。体験者に HMD（Google Cardboard）を装着させて、水面に浮かぶボートからの視点の 360 度映像を表示することで、顔の位置や向きに応じて適切に変化する視界が与えられるため、一層リアルな感覚を感じることができ

る。

次に、上述した水面上に浮かぶボートの中に居る感覚に加えて、水の流れによって外からボートに力が加えられる感覚も与えるインタラクションについての検証を行った。この検証では、HMD に溪流を下るボートからの視界の 360 度動画を表示する。この体験者が見ている映像を、大型水槽の前に設定した 24 インチの液晶モニターにも表示する。Lung-Pan Cheng らが Haptic Turk [4] で用いた手法と同様に補助者が水槽の横に立ち、モニターに映る動画を見ながら、川の流れによってボートの進路が変わったり、あるいはボートが岩にぶつかる映像に合わせて体験者の座る小型水槽を手動で揺らすことによって、ボートが溪流の中で動かされている感覚を体験者に与える。またさらに臨場感を出すために、別の補助者が体験者の横に立ち、水を入れた霧吹きとうちわを持ち、動画の内容に合わせて体験者の身体に水を吹きかける、あるいはうちわで扇ぎ風を当てる等の工夫を行った（図 2）。



図 2 ボートのシミュレーション  
Fig 2 Simulation of riding a boat.

#### 4.2 歩行面の固さ制御

流動化していない状態の砂表面は、その上を歩くことが可能であり、その際に足が砂の中にめり込むことはない（これは公園の砂場を歩く時と同じであるが、一般の砂場と比べて粒度の小さい砂を使っているために、地面を踏んだ感覚は若干柔らかい印象を受ける）。

流動化した状態では、砂表面は液体状となるため、その上に立つと足が砂の中に約 40 cm 沈むが、そのまま歩くことが可能である（図 3）。

エアコンプレッサーからの空気供給量の調整操作によって、歩行面の状態を通常の砂の路面から、沼や池のような状態まで変えることができる。



図 3 流動化した砂の中を歩く様子  
Fig 3 Walking in fluidized sand.

#### 4.3 物体の浮上と沈降

流動化した砂よりも比重が軽い発泡スチロール製の人形の頭部をあらかじめ砂の中に沈めた状態にしておく。流動化を止めた状態では、人形の頭部は砂の中で固定され、浮かぶことはない(図 4 左)。この状態で砂を流動化させることで、人形の頭部は浮力によって砂面上に自動的に浮かび上がる(図 4 右)。

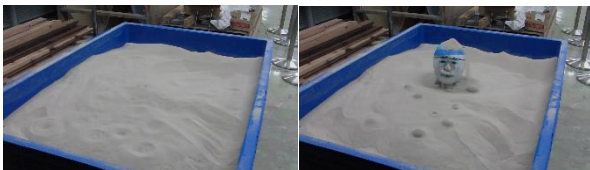


図 4 浮上するマネキン頭部  
(左：砂の中に埋まった状態，右：浮力で浮かび上がった状態)  
Fig 4 Mannequin head emerging from sand.  
(Left: Buried into sand. Right: Raised by buoyancy.)

この逆に、砂よりも重い物体を砂の上に置いておくと、流動化の開始と同時に砂の中に沈む。検証ではこの 2 通りの動作を検証した。

#### 5. 考察

ボートのシミュレーションにおいては、流動化した砂の上に置かれた小型水槽は、実際に水の上に浮かんでいるのと同じように、内部の人の動きに合わせて揺れる挙動が起こることが確認できた。人間が小型水槽に乗りこむ際にも、水の上と同じように砂の中に少し沈んで浮かび、ゆらゆらと揺れる。体重を右にかけると小型水槽は右に傾き、身体を上下に跳ねるように動かすと、小型水槽も上下に揺れる。これらの動きには水の上で行う時と同じように、わずかなタイムラグが発生しており、流体の慣性と粘性をリアルに感じるための一要素となっていることが確認できた。

さらに HMD の映像の効果が加わることで、体験者から

は、あたかも水の上で船に乗っているかのように感じたとの意見が多く聞かれた。

今回の実験では、ユーザが HMD で見ているボートからの視界は、遠景に関しては適切な映像となっているが、下を向いた際に見えるはずのボート自体の姿や、ボートが水面に作り出す波紋等は映像に含まれていない。これらについては今後、小型水槽に加速度センサを付加する等の方法で、ボートの揺れに同期する映像を実現させたいと考えている。また、溪流の流れの中で、映像に同期する形で自動的に小型水槽に動きを与える機構も実現できていない。そのため検証では体験者からボートの揺れに違和感を感じる場面があることが指摘されている。今後は大型水槽底部からの空気噴出の効果を局所的に使用したり、大型水槽の中に砂の流れや波を作り出す等の方法で、小型水槽の位置や向き、動きを制御するシステムを実現していく予定である。

歩行面の固さの制御の検証では、流動化した砂の中をまるで水の中のように歩くことができた。また、砂を流動化させて足が沈み込んだ状態にした後で、空気の供給を止め流動化を止めると、足が砂の中に固定されたまま抜けなくなる感覚を体験することができた。この感覚はエンターテインメント分野において、危険な沼から這い出せない状況等に活用できると考えられる。

流動化した砂の中に手を入れた感触は、厳密には水の場合とは異なり、下から吹き上がる空気によって砂が常に激しくかき混ぜられているために、常に手の表面に砂がこすりつけられている感触がある。しかし砂の中で手を動かした場合には、砂のカサ比重が水に近いので、手に感じる抵抗感は水に近い感触になった。

現時点の物体の浮上と沈降の検証では、固定的な比重の物体のみを扱ったが、魚の浮袋のような構造を内部に持たせ、内部の空気の量を調節可能な機構を作れば、流動化した状態の砂の中を浮かび上がって表面に現れたり、沈んで内部に消えたりするオブジェクトが実現できると考えられる。また、魚のヒレのような構造で砂の中を泳いだり、プロペラのような機構によって砂の中を移動するオブジェクトを製作することも可能と考えられる。

これらの動作はエンターテインメント分野において、お化け屋敷のアトラクションとしてユーザが歩いてきた道の中からお化けを出現させたり、あるいはもぐら叩きゲームとして、ユーザが立っている同じ床面からモグラが現れる演出等が可能となる。また、演劇やコンサートなどの舞台装置として、人間が歩きまわるステージの中から物体を出し入れ(浮上、沈降)するという新しい演出が可能になる。

#### 6. まとめと展望

本報告では、液体のようにふるまう砂を用いた新しい流動床インタフェースを試作し、検証によってその可能性を

示した。

このインタフェースは、同様の目的のために水を使用するアトラクション装置等の持つ問題を解決できると考えられる。水を使う場合には、接する金属の腐食、木材や衣服などへの浸透、腐敗、電気回路のショート、わずかな隙間からの漏出、コケの繁殖、蒸発による減量、0度以下になった場合に固体化し体積が増える、などへの対策が必要となるが、これらについては砂を使うことでほぼ解決できる。

また透明な水はプロジェクタの映像を投影することはできないが、砂は不透明であるため投影が可能である。今回使用した砂は平均粒径が 0.13mm と小さいため表面の凹凸も小さく、スクリーンとして十分に使用可能である。なお、本研究で使用した珪砂は色が白ではなく黄白色であるため、投影する映像は色の補正を行うことが望ましい。

砂を入れた容器に傾斜を付ければ、流動化した砂が川のように流れる装置を作ることができる。流れる砂の上をボートに乗って下るアトラクション装置を作れば、水を使わずに川下り体験が可能である。さらに空気の供給を制御することで、自由に砂の川の流れを即座に止めることもできる。

水では不可能だった、地面が固体の静止状態と、液体の流動状態とを一瞬で変化させることができる新しいコンテンツの作製が可能である。

また、スポーツの競技やトレーニングにも応用可能である。水の上と同じように砂の上でボート競技を行ったり、砂の中を走ることや泳ぐことも可能である。その際に空気の供給量を調節して流動化率を変化させることで、従来の水では不可能であった、ユーザが動く際の負荷の調整が可能である。このことから、「動きやすさ」を変化させることができる新しい競技やトレーニング法の開発が可能である。

一方、水を使う場合に比した欠点も存在する。砂は水と比較して高価であり、入手性や廃棄の容易性で劣る。また輸送する際に通常の液体用ポンプのような簡便な方法は使えない。また内部を観察したい等、透明性が求められる場合には砂は使用しにくいと言える。砂は、水の場合と同様に（あるいはそれ以上に）、ユーザの目や鼻、口に入らないように注意する必要もある。

また、著者による先行研究事例である AquaTop Display [5] のように、砂の表面を入力インタフェースとして捉えることもできる。砂表面は赤外線を反射することから、KINECT等の赤外線を使用するデブスカメラで距離を計測することができる。このため、AquaTop Display と同様に、砂表面に映像を投影し、砂の中から突き出した身体をデブスカメラで認識することによってコンピュータの操作を行ったり、手の平ですくい取った砂に映像を投影する等が可能である。また AquaTop Display や SplashDisplay [6] のように、表面の物質（砂）を空気や振動で吹き飛ばすことで、映像投影面から実物体が吹き飛ばす爆発の表現が可能であり、ゲームな

どに利用できるであろう。

以上述べたように、液体のように流動化した砂のインタフェースには新しいインタラクションを開拓できる大きな可能性があると考えられる。本研究では個体粒子として砂を、流体として空気を使用した。今後は個体粒子として樹脂や金属を組み合わせたり、流体として水や油を組み合わせることで流動床の比重や粘性を変化させるなど、今後もシステムに改善を加えてインタラクションの研究開発を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] 野中利之, 鈴木睦. 固体粒子層の流動化特性に及ぼす重力の影響, 日本マイクログラフィティ応用学会誌 Vol. 18 No. 3 2001.
- [2] Shoichi Hasegawa *et al.* Virtual canoe: real-time realistic water simulation for haptic interaction. SIGGRAPH '05 ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies, Article No. 28.
- [3] “アリス・イン・ワンダーランド/時間の旅”.  
<http://www.disney.co.jp/movie/alice-time.html>,  
(参照 2016-12-25).
- [4] Cheng, LP, Lühne, P., Lopes, P., Sterz, C. and Baudisch, P. Haptic Turk: a Motion Platform Based on People. In Proceedings of CHI 2014, pp.3463-3472.
- [5] 小池英樹, 高橋陽一, 的場やすし. AquaTop Display: 浴室での情報閲覧を目的としたインタラクティブ・サーフェス・システム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 4, pp. 517 - 526, Dec. 2013.
- [6] 的場やすし, 徳井太郎, 佐藤遼, 佐藤俊樹, 小池英樹. SplashDisplay: 物理的な空間的表現を伴うインタラクティブな映像エンタテインメントシステムの構築, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 331-340, 2012.