

仮想容器による仮想液体の対話操作モデルと一実現法

舟橋健司* 岩堀祐之*

A Model for Manipulation of Virtual Liquid with Virtual Vessels

Kenji FUNAHASHI* and Yuji IWAHORI*

Abstract – This paper describes a new method to realize an interactive manipulation of virtual liquid using a virtual vessel. The proposed model represents the liquid in the free fall condition as particles, while it does that in the stay condition as volume. The main purpose of this model is the realization of virtual liquid manipulation, while the generation of high quality computer graphics images nor simulating the exact behavior of the liquid, are not the main. Our system with this proposed model makes it possible to catch the liquid using the virtual vessel, to hold the liquid in it, then to flow away the liquid with tilting it. Also the system realizes the manipulation to skim the liquid from another liquid vessel.

Key Words : virtual liquid, interactive manipulation, liquid model, particle and volume model

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ(VR)技術の研究、開発が盛んに行われている。この分野におけるテーマの一つに仮想空間における様々な対話操作の実現がある。従来は筆者らを含め、仮想空間に存在する固体(剛体や弾性体)を対話的に移動、変型することを目的としていた([1]-[3]など)。しかし、産業や医用などの分野において液体、気体の操作を行う場面は実在し、それを仮想的に体験したいという要望もある。また液体、気体に対する対話操作は、料理の仮想体験を行うなどのように、日常生活の仮想体験やアミューズメントの分野への応用も期待できる[4]。

液体、気体を研究の対象とした分野、流体力学においては、挙動の分析を主とした研究が行われている(例えば[5])。この分野では計算速度に重点をおかずに厳密な過程、結果を求めることを主たる目的としている。仮想空間における対話操作の実現には速い計算速度を必要とするため、仮想液体操作の実現に流体力学の分野における研究成果を直接適用することはできない。また、コンピュータグラフィックス(CG)の分野では、パーティクル(粒子)システムによる霧や水流の近似的な表現が試みられているが、この手法も対話操作を実現するためには不十分な計算速度である(例えば[6])。

本研究では、新たな仮想液体モデルを提案することにより、仮想空間における液体の対話操作を実現する[7][8]。仮想液体操作を実現するにあたり、重要な要素を特定するために簡単な聞き取り調査を行った。その結果、実際に液体を操作する場面、具体的な動作として、化学実験や料理を行う場面における、

- ・ 入れ物(容器)から液体を流す(落下させる)
- ・ 落下してくる液体を容器で受け止める
- ・ 容器内の液体を別の容器ですくい取る

などの動作が主にあげられた。そこで、液体操作の第一段階として液体との干渉を判定すべき仮想の容器を定義し、また液体を落下中の状態と容器内で静止している状態に分類し、容器と液体との相互作用についてのみ考えるものとする。実世界における傘と雨との干渉などのような、液体と一般的な固体との相互作用については考慮しない。微妙な挙動の計算を行わないことにより対話操作を可能とする。

提案するモデルでは計算機内部での仮想の液体の表現をその状態により分類し、自由落下状態においては粒子に基づき、静止状態においては体積に基づき表現している。本モデルは対話操作を第一の目的としたものであり、CGによるリアリティの高い映像の生成や、挙動の厳密な再現を主な目的としていない。本モデルに基づき作成した実験システムでは、落下してくる液体を操作者が自由に動かすことのできる仮想の容器で受け止め、容器の中に溜めておくことが可能である。また操作者が容器を傾けるなどして液体を溢れ出させ、落下させることも可能

*: 名古屋工業大学情報メディア教育センター

*: Center for Information and Media Studies,

Nagoya Institute of Technology, Japan

である。さらに、他の容器から液体をすくうことも可能である。

以下、2節では仮想空間における液体と容器の表現方法について述べる。3節では容器と液体との干渉について述べる。作成した実験システムの説明、操作例に対する考察を4節、5節で行う。

2. 仮想液体と仮想容器のモデル

2.1 液体の状態の分類とモデル

仮想空間における液体の状態を以下のように分けて考える。

- (1) 自由落下状態(例えば、水道の蛇口などから流れ出てくる水)
- (2) 静止状態(例えば、コップなどの容器の中に溜っている水)

状態(1)の液体については、CGの分野におけるパーティクルシステムを参考に、粒子に基づく表現を行う。ここでは微妙な挙動の再現ではなく対話操作を目的としているため、各粒子は大きさを考えないものとし、粒子同士の衝突などの干渉はおこらないものとする。各粒子の3次元仮想空間内での時刻 t における座標を $P_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$; N : 粒子数、すなわち自由落下状態にある液体) とする。それぞれの粒子は重力、慣性に従って移動する。すなわち、 $P_i(t)$ は時刻 $t-\Delta t$ における座標 $P_i(t-\Delta t)$ に移動量 $P_i(t-\Delta t) - P_i(t-2\Delta t)$ と重力による加速を考慮して

$$P_i(t) = 2P_i(t-\Delta t) - P_i(t-2\Delta t) + g\Delta t^2 \quad (1)$$

により決定する。ここで、 g は下向きの重力加速度ベクトルであり、 Δt は描画更新間隔、すなわち描画更新レート (frames/sec.) の逆数である。空気抵抗などによる広がり表現する場合には、式(1)の右辺に微小乱数値 $R_i(t)$ を加える。

状態(2)の液体は、容器内の対流などを考慮せずに

静止状態として扱うため、体積に基づき表現する。すなわち、時刻 t において液体が仮想空間内に定義された容器の中に存在する場合、上述した粒子の性質は考慮せず、その容器の中に体積 $V(t)$ の液体が存在していると表現する。それぞれの状態の換算は N [粒子数/体積] によるものとする。例えば、容器を傾けることにより体積 V の液体を全て落下させた場合、容器中の液体の体積は0となり、自由落下状態の液体の粒子数は NV だけ増加する。以下、単に体積という場合は容器内の液体の体積を指すものとする。

2.2 仮想容器のモデル

仮想空間に定義する液体との相互作用を考慮すべき容器としては、操作者が移動することのできるものと、仮想空間内に固定されたものがある。ここでは両者を同様に扱い、また容器は凸形状であるものと仮定する。

図1に示すように、容器を内包する球を考える。容器が球に内接する必要はない。この球の中心座標を C 、半径を r とする。容器の3次元空間における位置はベクトル C により表現する。また、図2に示すように C を原点とする容器座標系 (軸 x_c, y_c, z_c) を設定する。軸 y_c と球との交点 (図中 d_1) の位置の変化 (極座標的な表現) により容器の傾きを表すものとする。具体的には、 x_c を軸として点 d_1 が点 d_2 に移動するように容器を角度 ϕ だけ回転し、さらに z_c を軸として点 d_2 が点 d_3 に移動するように角度 θ だけ回転する。これにより、2つのパラメータ θ と ϕ で容器の傾きが表現できる。ともに値が0の時は容器は「傾いていない」状態である。さらに容器の方向の変化として y_c を軸として角度 ψ だけ回転を行うが、これによる容器内に満たし得る液量の変

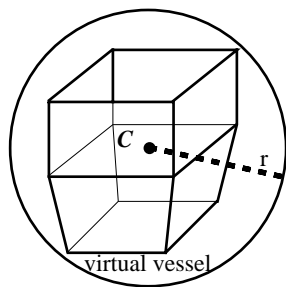


図1 仮想容器と容器を内包する球
Fig.1: Virtual vessel and sphere including it

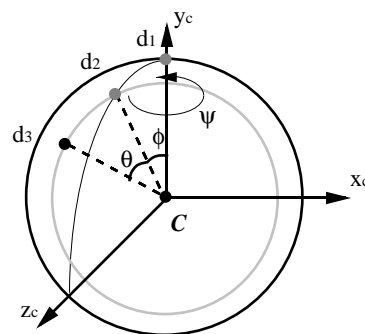


図2 仮想容器の傾きの表現
Fig.2: Representation of tilting of virtual vessel

化はない。これら C, θ, ϕ, ψ は、それぞれの容器ごとに設定されるものであり、移動する容器については時刻 t の関数として表される。

容器に液体が入っている様子を図3に示す。容器内で静止している液体の液面の高さを液位と呼ぶ。容器内に入り得る液体の最大量を最大容積 V_m とし、このときの液位を最高液位と呼ぶ。また、液体の体積が最大容積を超えた場合に液体が溢れ出てくる点を流出点 F とする。厳密には、液体が溢れ出てくる箇所が線分で表される場合もあるが(例えば、各座標軸に平行な稜線をもつ立方体を、ある座標軸を中心に回転した場合)、実際のシステムにおいて3次元位置センサなどを使用する場合には少ないと考えられる。流出点を点 C を基準とする相対的なベクトル F として次式により表す。

$$F = f(\theta, \phi, \psi). \quad (2)$$

また図3に示すように、時刻 t において容器に入っている液体の体積が V ($V > 0$) であるとき、液位は点 C から鉛直方向へ H の位置に存在するものとする(式(3))。

$$H = h(\theta, \phi, V). \quad (3)$$

液位 H の存在範囲は $-r < H < r$ であるが、容器の形状や傾きによっては、さらに狭い範囲に存在する。最大容積 V_m を超える体積を引き数として与えた場合は $H = F_y$ (ただし、 F_y は F の鉛直方向の座標) とする。式(3)を体積 V について変型することにより次式を得る。

$$V = v(\theta, \phi, H). \quad (4)$$

仮想の容器と他の容器内の液体との相互作用(後述)を容易に実現するために、式(4)において容器よりも下方の H を引き数として与えた場合は $V = 0$ 、点 F よりも上方の H を与えた場合は $V = v(\theta, \phi, F_y) = V_m(\theta, \phi)$ (F_y は角度 ψ に依存しない) とする。ま

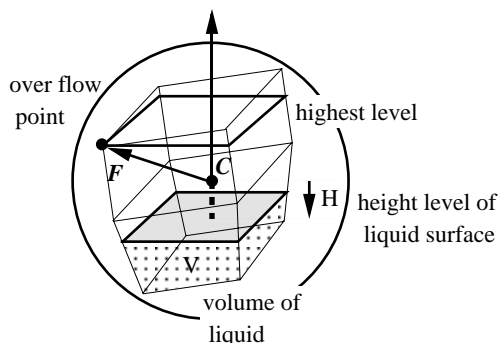


図3 仮想容器内の各パラメータ
Fig.3: Each parameter of virtual vessel

た、液位 H のときの液体の体積に、液面よりも下方に存在する容器の一部分の体積を加えた、すなわち容器の厚みも考慮した体積を

$$V^+ = v^+(\theta, \phi, H) \quad (5)$$

とし、同様に最高液位の場合は $V^+ = V_m^+$ と表現する(図4)。容器の厚みを考慮しない場合は、以下 $V^+ = V$ として扱う。

3. 容器と液体との相互作用モデル

本節では、実際にシステムにおいて処理する際の手順にそって、相互作用モデルについて述べる。時刻 $t-\Delta t$ 以前の状態から時刻 t における仮想空間内の様子を決定する逐次処理になる。まず、3次元位置センサなどにより時刻 t における操作者が移動可能な容器の仮想空間内における位置、向き ($C(t), \theta(t), \phi(t), \psi(t)$) を設定する。以下では、引き数 t を省略した場合は、時刻 t における値とする。続いて、2.1節で述べたように粒子として表現されている液体の重力、慣性による移動処理を行い、時刻 t における各粒子の座標 $P_i(t)$ を決定する。あるしきい値より下方へ移動した粒子は消滅させる。

3.1 自由落下状態の液体と容器

落下中の液体(粒子)が各容器の口を通過した場合、その液体を状態(1)から状態(2)に変える、すなわち、粒子としては消滅させる(図5)。実際の処理においては、判定すべき容器を内包する球の中に存在する各粒子についてのみ詳細を判定する。ある容器の口を通過した粒子が n 個 ($n > 0$) の場合、その容器内の時刻 t における液体の体積を次式により仮に設定する。

$$V(t)^{(0)} = V(t-\Delta t) + n/N. \quad (6)$$

次節で述べる静止状態の液体と容器との干渉がな

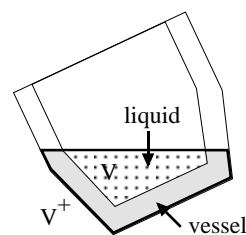


図4 仮想容器内の厚みを考慮した体積
Fig.4: Volume added thickness of virtual vessel

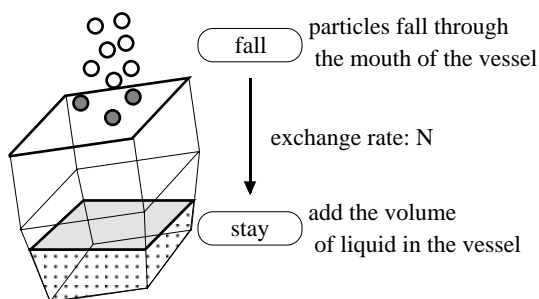


図5 液体の2つの状態の関係 (1)
Fig.5: Relation for two conditions of liquid (1)

ければ 時刻 t における容器内の液体の体積を $V(t)^{(1)} = V(t)^{(0)}$ とし,

$$H(t) = h(\theta, \phi, V(t)^{(1)}) \quad (7)$$

により液位を決定する。

3.2 静止状態の液体と容器

ある容器と他の容器内に存在する液体との相互作用について述べる。以下では便宜的に、それぞれの容器を容器 1, 容器 2 と呼び、また各記号も添字 1, 2 により区別する。このときの様子を図 6 に示す。時刻 t において次式が成立する場合、容器 1 と容器 2 内の液体は互いに干渉している。

$$C_{1y} - r_1 < C_{2y} + h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)}) \quad (8)$$

ここで、 C_{jy} は容器 j の位置 C_j の鉛直方向の座標である。実際には、それぞれの容器同士の詳細な干渉判定も行うが、ここでは液体の対話操作の実現を目的としているため記述を省略する。このとき、容器 2 内の液体の液位が容器 1 により上昇させられている体積を $U_{21} = 0$ とする。また、容器 2 の液位が他の全ての容器により上昇させられている体積を上昇体積

$$U_2 = \sum_j U_{2j} \quad (9)$$

とする。

容器と液体が干渉しており、かつ次式が成立する場合は、容器 1 の流出点よりも下の部分と容器 2 の液面が干渉している。

$$C_{2y} + h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)} + Vm_1^+) < C_{1y} + F_{1y} \quad (10)$$

上式が成立しないならば、容器 1 に容器 2 の液体が流入する。

3.2.1 液面上昇

容器と液面が干渉している場合には、容器 1 が容器 2 の液位を上昇させている。このとき、容器 2 の液位 H_2 を次式を満たすように設定する (図 6) 。

$$H_2 = h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)} + U_{21}), \quad (11)$$

$$U_{21} = v_1^+(\theta_1, \phi_1, C_{2y} + H_2 - C_{1y}).$$

また、それぞれの容器内の液体の体積を $V_j^{(1)} = V_j^{(0)}$ とし、容器 1 の液位を式(7) により求める。

3.2.2 液体の流入

容器 1 に容器 2 の液体が流入する場合、さらに次式が成立するならば、液体の流れ込みは容器 2 の液面が容器 1 の流出点に達した時点でとまる (図 7) 。

$$V_2^{(0)} + U_{21} - v_2(\theta_2, \phi_2, C_{1y} + F_{1y} - C_{2y}) < Vm_1 - V_1^{(0)}. \quad (12)$$

ただし、液体が流入する場合には容器 2 内の液位は容器 1 により体積 $U_{21} = Vm_1^+$ だけ上昇させられていると考える。

この場合、容器 2 の液位が容器 1 の流出点となるように設定し (式(13)), それに合わせて各容器の体積を計算し (式(14), (15)), また容器 1 の液位を式(7) により決定する。

$$H_2 = (C_{1y} + F_{1y}) - C_{2y} \quad (13)$$

$$V_2^{(1)} = v_2(\theta_2, \phi_2, H_2) - U_{21} \quad (14)$$

$$V_1^{(1)} + V_2^{(1)} = V_1^{(0)} + V_2^{(0)}. \quad (15)$$

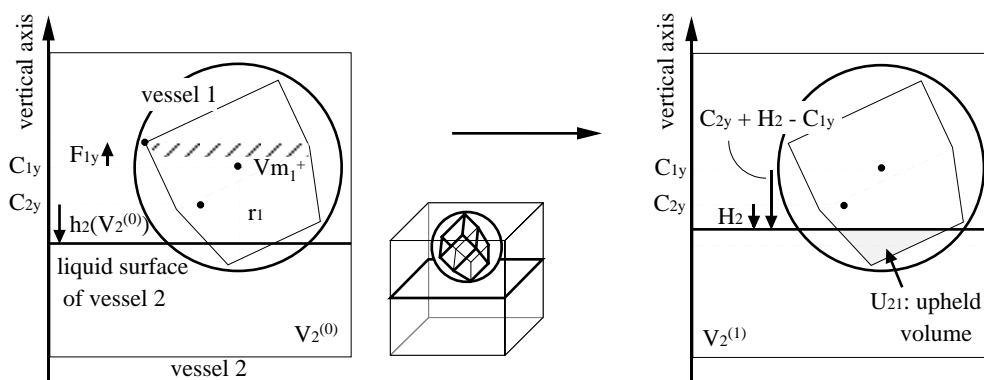


図6 仮想容器と他の容器の液面との干渉
Fig.6: Interference between virtual vessel and liquid surface of other vessel

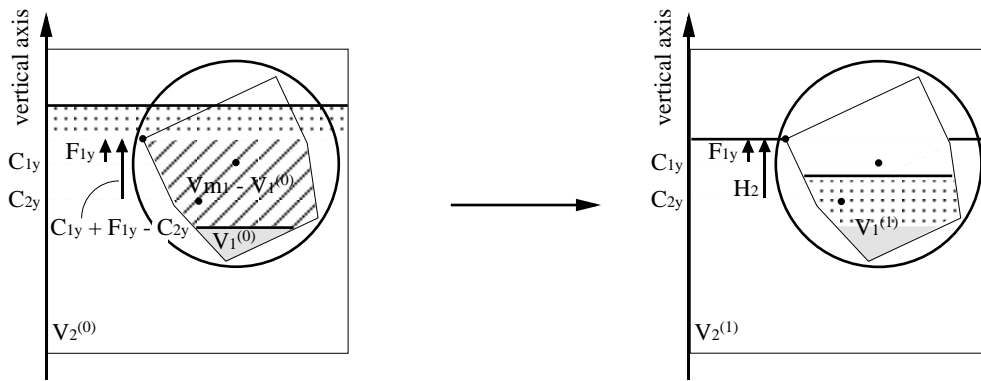


図7 他の容器内の液体の流入 (1)
Fig.7: Flowing liquid into virtual vessel (1)

式(11) が成立しないならば, 容器 1 の流出点よりも上方に容器 2 の液面が存在することになる (図 8). このとき便宜的に, 容器 1 の液体の体積 $V_1^{(1)}$ を最大液量 V_{m1} に, 液位 H_1 を r_1 に設定し, 液面は考えない (表示しない) ものとする. 容器 2 の液体の体積と液位は式(15), および次式により決定する.

$$H_2 = h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(1)} + U_{21}). \quad (16)$$

このように設定しておくことで, 時刻 $t + \Delta t$ において 2 つの容器の間での液体の移動がなくなった場合, 液体をすくい取る操作が実現できる.

3.3 容器からの液体の流出

上述の干渉や容器の傾斜により, 時刻 t において次式をみたす場合には液体が容器から流出する (図 9).

$$V^{(1)} + U > V_m. \quad (17)$$

容器内の体積で表現されている液体の一部を $N(V^{(1)} + U - V_m)$ 個の粒子として点 F から流出させ, 時刻

t における容器内の液体の体積を

$$V(t) = V_m - U \quad (18)$$

とする. 式(17) を満たさない場合は, 液体粒子の流出はなく, $V(t) = V(t)^{(1)}$ である.

3.4 描画等その他の処理

自由落下中の液体との干渉実験を行うために液体が無限に流出してくる仮想の「蛇口」を定義し, そこから流出する液体 (粒子) を生成する.

容器の形状と上述の処理により決定された液位から, 描画のための実際の液面の形状 (領域) を生成する. このとき, 容器 1 が容器 2 の液体に干渉しており, かつ容器 1 の流出点よりも上に容器 2 の液面がないならば, 容器 2 の液面から容器 1 の部分を切り除く必要がある.

その後, 各粒子や, 各容器とその液面を描画する.

4. システムの構築

実際にシステムを構築する際には, 式(2) - (5) で表

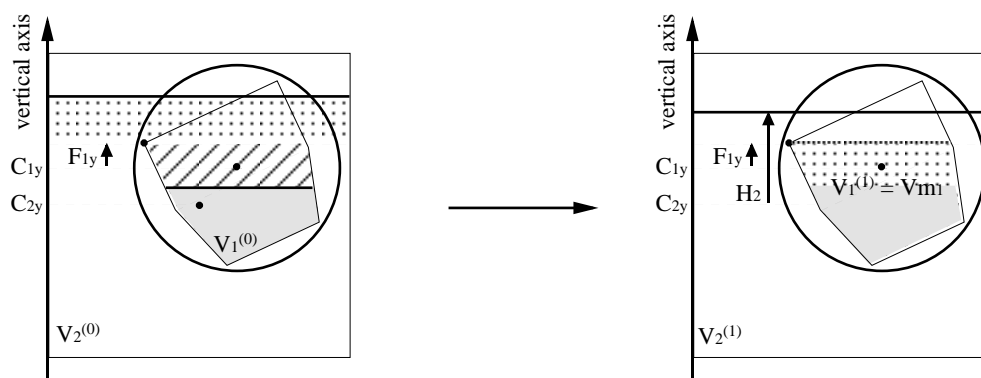


図8 他の容器内の液体の流入 (2)
Fig.8: Flowing liquid into virtual vessel (2)

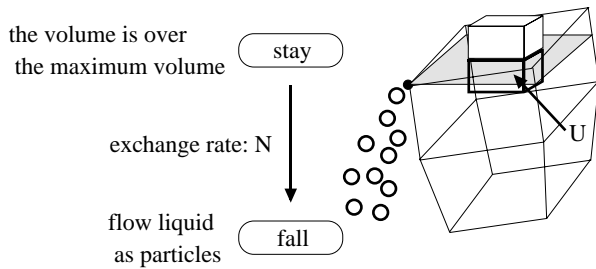


図9 液体の2つの状態の関係(2)
Fig.9: Relation for two conditions of liquid (2)

される各関数を各仮想容器の形状に応じて設定する必要がある。本システムにおいては実験的に、容器1を半球状の、容器2を立方体形状の容器とする(図10)。液位から体積を求めるそれぞれの関数は以下ようになる。

$$v_1(H) = \pi(-H^3 + 3r_1^2H + 2r_1^3) / 3, \quad -r_1 < H < F_{1y}, \quad (19)$$

$$v_2(H) = a^2(H + a/2), \quad -a/2 < H < a/2. \quad (20)$$

ただし、液位Hが容器より下方の値の場合には $v_j(H)$ の値は0、 F_{1y} より上方の場合には $v_j(H)$ の値は V_{mj} であり、容器の厚みは考えていない。体積から液位を求める関数は、それぞれをHについて代数的に解くことにより得られる。容器1の流出点の座標も幾何的に求めることが可能であるが、複雑な式となるため記述を割愛させて頂く。容器2の流出点については、便宜的に特定の一つの頂点としてある。

また、容器1により押し上げられている容器2の液位を求めるための式(11)は、半球状の容器と立方体形状の容器の場合には代数的に解くことも可能であるが、以下のように数値的に求めている。まず、容器1が干渉していない場合の容器2の液位を初期値とする。続いて、その液位における仮の上昇体積を考えて次に示す漸化式により容器2の液位を収束す

るまで求めていく。

$$H_{2(0)} = h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)}),$$

$$U_{21(i)} = v_1^+(\theta_1, \phi_1, C_{2y} + H_{2(i)} - C_{1y}),$$

$$H_{2(i+1)} = h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)} + U_{21(i)}), \quad i = 0. \quad (21)$$

5. 実験例および評価

5.1 実験システムの構成

上述のモデルに基づいた仮想液体操作のための実験システムを、グラフィックワークステーションSGI O2上でC言語により実現した(図11)。操作者が自由に移動することが可能な仮想容器の位置と向きは低周波の磁界を利用したモーションセンサにより入力される。液体を表現するための粒子数と体積との換算率は $N = 10$ 粒子数/ccとしている。操作者が移動する仮想容器は半径5cmの半球とし、仮想空間内に固定されている容器は一辺が30cmの立方体としている。また、液体が無限に流出してくる仮想の「蛇口」を用意し、画面右上のあたり半径3cmの領域から、画面中央方向への初速度を持たせた自由落下してくる液体を1 frameにつき1cc生成している。固定された容器よりも下方へ移動した液体粒子は消滅させている。重力加速度は 0.1 cm/frame^2 としている。現時点では立体視を導入していないため、床面と容器の影を表示することにより奥行き感を便宜的に表現している。

5.2 実験結果の一例

本システムによる実際の操作の様子を図12に示す。体験者がセンサの取り付けられたカップを通して仮想容器により仮想液体の操作が可能であることが分かる。操作中の連続したCG画面を図13に示す。同図(左)からは、落下してくる液体を容器で受け止めることが可能であり、また容器から液体が流出している様子が確認できる。同図(右)は、固定さ

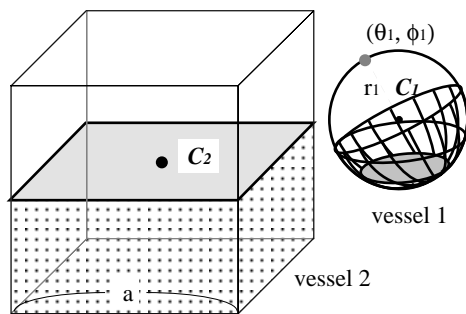
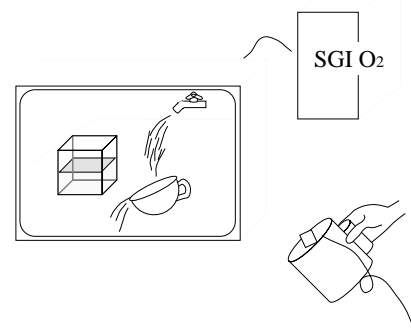


図10 実験システムで定義する2つの仮想容器
Fig.10: Shape of two vessels defined in experiment system



3SPACE ISOTRAK II

図11 実験システムの構成
Fig.11: Configuration of experiment system

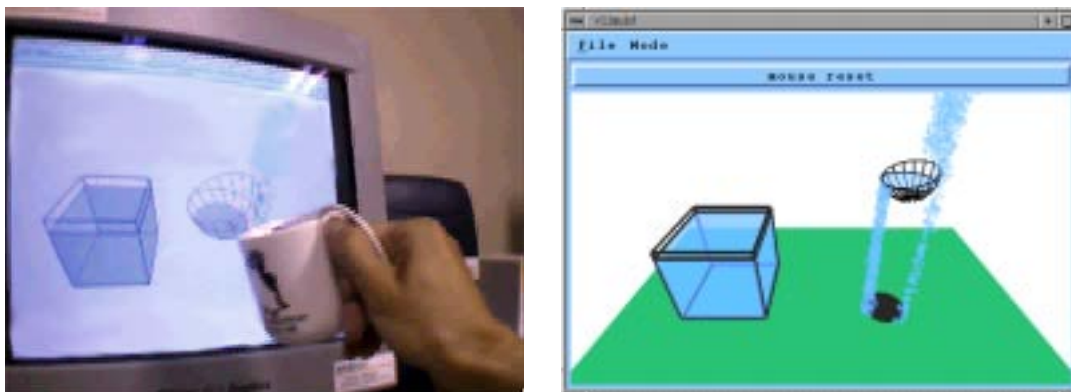


図 12 実際の操作の様子
Fig.12: Appearance of proposed system

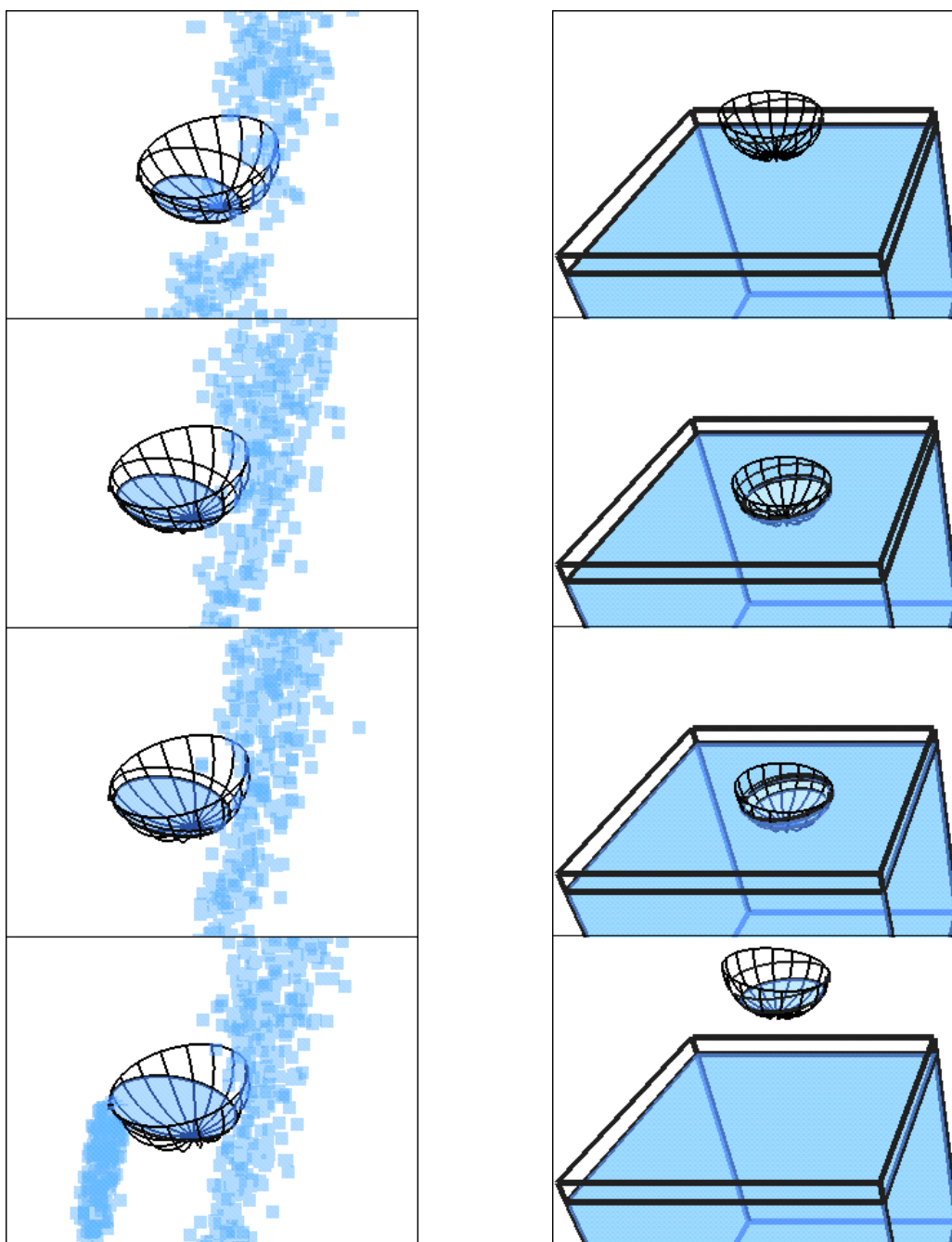


図 13 仮想容器による仮想液体の操作例
Fig.13: Examples of manipulation of liquid using virtual vessel

れた他の容器内の液体を操作者の移動する容器によりすくっている様子を表している。計算速度に関しては、平均 24 frames/sec. の描画更新が可能であった。このうちセンサ入力、相互作用処理、表示それぞれに必要な時間の内訳は、およそ 60%, 10%, 25% であった（実際の処理には OS やウィンドウ管理に多少の時間が必要である）。式(21)の計算は、数回の反復で収束していた。

実際に研究室の10名の学生に体験実験をしてもらったところ、全般的に「本当に水を触っている（容器で操作している）感じがする」などの積極的な評価を頂いた。実験時には「実際のカップにより画面内の水（液体）が操作できる」という説明のみを行い、体験者にセンサの取り付けられたカップを渡した。体験者が「思い通りに液体操作ができていてと感じるまでの時間」は、それぞれ 65, 75, 125, 41, 53, 42, 40, 48, 62, 66 秒であり、平均 1 分程度であった。この結果から、本システムは実際の液体操作の特徴を再現できていると考えられる。また、以下のようなコメント、問題点の指摘もあった。

容器の影により奥行き感がある程度把握できるが、容器を移動する際に影に注目してしまう。落下中の液体の影も表示されていると液体を受け止めやすいと思う。

実際のカップの移動に対して仮想の容器の移動量が少ない。仮想容器（容器の液面）を水平に保つのが難しい。

前者は立体視の導入などによる奥行き感の表現を高めることにより解決していく必要がある。後者に関しては、画面のサイズや位置などを総合的に考慮したキャリブレーションが必要である。また、力覚フィードバック装置の導入などにより、容器内の液体の重量感の表現も必要であろう。これらは、本論文で提案しているモデルで対応可能である。今後、種々の装置を実際に導入し、調整をしていく予定である。

6. むすび

本論文では、仮想空間における液体操作を目的とした粒子、体積に基づいたモデルを提案し、実験システムを作成した。本システムでは仮想の容器により落下してくる液体を受け止め、溜めておくことが可能である。また、容器を傾けるなどして液体を流出させることも可能である。さらに、他の容器内の液体をすくうことも可能である。

本システムは現在、仮想液体の対話操作の可能性を示した段階にある。今後は、上記実験において指

摘された問題点に対する改良に加えて、半球や立方体形状の容器だけでなく、任意な形状の容器による操作が可能なシステムへの改良を行う必要がある。具体的には、容器の形状を任意の凸多面体とし、システム起動時などに式(2) - (5) の計算を行うための参照テーブルを自動生成することを考えている。システム実行時には、この参照テーブル中の値を補間することにより各容器の液位と体積を関係付ける。式(2) で表される流出点については、容器の口を定義する多面体の頂点に対する逐次探索により決定することも考えられる。また、凹形状な容器を分割処理することにより、凸形状な容器が隣接しているものとして扱うことも考えていきたい。さらに、川を流れている水、水槽の中で対流している水などの状態の液体と容器との相互作用の実現するために、新たに3番目の状態を考え、モデル化を行っていくことが課題としてあげられる。

謝辞 最後に、研究を進めるにあたり有益な議論を頂いた本研究室諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] M. Shinya and M.-C Forgue: Laying out objects with geometric and physical constraints, *The Visual Computer*, Vol.11, No.14, pp.188-201 (1995)
- [2] D. Braff: Interactive simulation of solid rigid bodies, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.15, No.3, pp.63-75 (1995)
- [3] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における仮想手による道具操作のための知識とモデル, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.3, No.3, pp.167-176 (1998)
- [4] 松下温: 風と香りを感じる仮想空間システム - 息を吹きかけるインタフェースを持つ仮想空間 -, 第5回知能情報メディアシンポジウム論文集, pp.133-138 (1999)
- [5] 神部勉: 流体力学, 裳華房 (1995)
- [6] N. Chiba, S. Sanakanishi, K. Yokoyama, I. Ootawara, K. Muraoka, N. Saito: Visual Simulation of Water Currents Using a Particle-based Behavioural Model, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.6, pp.155-171 (1995)
- [7] 舟橋健司, 岩堀祐之: 粒子・体積モデルによる仮想液体の対話操作に関する検討, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.99, No.723, pp.25-30, MVE99-80 (2000)
- [8] K. Funahashi and Y. Iwahori: Manipulation of Liquid Using Cases in Virtual Space, *Proc. of IEEE Roman2000*, pp.368-373 (2000)

(2000年5月22日受付)