

平成 26 年度 修士論文

VR-learning システム タブレット版
化学実験体験システムの構築と教育効果の検証

(Evaluation of Educational Effect for
VR Chemical Laboratory Experience System)

指導教員
舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学院 工学研究科 情報工学専攻
平成 25 年度入学 25417515 番

内山 享佑

目次

第1章	はじめに	1
第2章	粒子・体積に基づく仮想液体モデル	5
2.1	液体モデル	5
2.2	仮想容器のモデル	6
2.2.1	容器の表現	6
2.2.2	液体の流出点, および液位	8
2.3	容器と液体の相互作用モデル	10
2.3.1	自由落下状態の液体と容器の相互作用	10
2.3.2	容器内状態の液体と容器の相互作用	10
2.3.3	液面上昇	11
2.3.4	容器内への液体の流入	11
2.3.5	容器外への液体の流出	12
2.4	様々な状況の液体表現	12
2.4.1	液面の波や渦の表現	13
2.4.2	色の拡散	15
2.4.3	視点位置を考慮した側面描画	16
2.4.4	凹形状容器の表現	18
2.4.5	鍵粒子と包絡面による落下液体表現	18
第3章	タブレット版 VR 化学実験体験システムの構築	21
3.1	PC 版 VR 化学実験体験システムについて	22
3.2	タッチパネルを用いた容器の移動操作	25
3.3	タッチパネルを用いたかき混ぜ操作	26

3.4	タブレット版で簡略化した部分について	28
3.5	水溶液および試薬の設定	29
第4章	実験とその結果	32
4.1	評価項目の設定	32
4.2	評価方法と実験対象者について	33
4.3	実験の様子	33
4.4	評価実験の検証	37
4.4.1	外れ値の除外	37
4.4.2	学習理解度の結果についての検証	39
4.4.3	操作性の結果についての検証	40
4.4.4	楽しさの結果についての検証	43
第5章	むすび	44
	謝辞	46
	参考文献	47
	発表論文リスト	51

第1章 はじめに

近年，バーチャルリアリティ(Virtual Reality: 以下 VR) 技術に関する研究が多く行われており，様々な分野で活躍している．ここで，バーチャルとは正しくは「仮想」という意味ではなく，「みかけや形はそのものではないが，本質あるいは効果としてはそのものであること」という意味で，あえて簡単に一言でいえば「現実のエッセンス」といえる．そのため VR 技術とは，コンピュータが人間に視覚や触覚といった様々な感覚をもったその場には実際には存在していない環境や物体を人工的に提示し，人間にあたかもそれが現実の世界であるように体験させ，コンピュータと対話することができる技術のことである [1][2]．また，操作者の行動を VR 環境に反映させることでより高い臨場感を操作者に与えることができる．

VR 技術を用いることによる利点として実験や訓練コストの削減や，実施の容易さ，現実世界で行うにはリスクが伴う作業におけるリスクの回避，実体験が困難な状況における体験学習などがある．例えば，VR 技術の応用例として訓練や実験用の模擬装置としてのシミュレータが存在する．これは物理法則や化学法則などの様々な法則をモデル化することによって，様々な状況のシミュレーションを行うシステムのことである．シミュレータを用いることによって，医療分野においては訓練を行うことが難しい外科手術の回転骨切り術や内視鏡外科手術のシミュレーションを行うことが可能である [3][4]．もちろん，医療分野以外にも火災体験のシミュレーションや，航空機開発のためのフライトシミュレータ，危険な運転状況(高速道路や雪道での教習など)を体験するドライブシミュレータなども研究されており，様々な分野で VR 技術が用いられている [5][6][7][8]．

しかし，上記の VR シミュレータは大規模，もしくは非常に高価なものが多く我々にとって身近なものとは言い難い．今後さらに我々の身近に VR 技術が使われたシミュレータなどが普及していくことを目指し，当研究室では様々な分野に対して安価なシステム構成による VR システムの研究を行っている．具体的には，家庭用コンピュータの処理能力でも臨場感の高い使用感を実現できる「バーチャルお料理教室」システムの開発を行ってきている [9]．この

システムでは料理の手順や「手際の良さ」を、実際に手を動かして料理の体験を行うことで学習できることを目標にしている。また、人の手の動きを、指関節角度を測定することで計算機に入力するための装置、データグローブが VR システムに使われることが多い。しかし安価なデータグローブには備え付けられているセンサーが少なく、また精度も高いとは言えない。このような安価なデータグローブでも十分な手指の動きを取得するための計算モデルの研究も行っている [10]。データグローブの研究は前述の調理体験システムをはじめ、様々な家庭利用 VR システムや、学校教育や家庭学習のためのシステムに適用することを想定している。

ところで、教育は人類の文化を形成する上で非常に重要である。人類は文化の発展とともにオーラルコミュニケーション、江戸時代の寺子屋のような教育施設での教育 [11]–[13]、ラジオ学習 [14]、PC などを用いた e-learning [15][16] と教育体系を発展させていき、自由な時間や場所での学習が可能になった (詳しくは [18] を参照されたい)。しかし教育体系の発展とともに、子供たちが実際に物事を体験する機会は急速に減少した。その結果何が子供たちに起きたかを示す驚くべき先行調査がある [17]。この調査で小学生 153 人を対象に鶏の絵を書いてもらったところ、19 人の生徒が 4 つの足の鶏を書いた (図 1.1)。これは教育から体験が不足することで生じた問題である。実際に体験することは教育、特に図画工作や音楽などの芸術、工芸分野、技術家庭科、科学実験などにおいては非常に重要である。これらは教科書を読むだけでは学ぶことができず、実際に手を動かして体験する必要がある、または体験することで効果的な学習が可能である。しかし、発展した教育体系、特に自己学習や e-learning などでは体験を伴った教育を行うことは困難なことが多い。

そこで当研究室では体験型教育システムに着目し、小学生から中学生程度を対象とした VR 化学実験体験システムを開発している [19]。これは VR 環境内のピーカーやフラスコを実際に操作することで実験の手順や化学反応を体験、確認することが可能なシステムである。なお、各薬品の組み合わせに対する反応をシステムが計算、判断するのではなく、既知であるもとのし、システムに保持させる。本システムを用いることで、不登校や院内学級の小学生でも実際に手を動かして理科の実験を体験することができる。臨場感の高い VR 化学実験体験システムを構築するには様々な技術が必要であるが、その 1 つに液体の薬品の表現がある。液体の挙動の表現するための研究の 1 つとして、Smoothed Particle Hydrodynamics (以下 SPH 法) がある。SPH 法とは粒子法の 1 種であり、流体を粒子の集合であると考え

ひとつひとつの粒子に速度や密度といった情報を与え、物理法則を用いることでより詳細で正確な挙動の再現を可能としている。これを3次元の粘性流体に適用した研究が提案されており、精度の高い対話操作を実現している [20]–[23]。正確な挙動を再現するためには膨大な計算が必要であり、また高い性能の計算機が必要となる。

しかし、教育機関や家庭などで利用してもらうためにはシステムを安価に構成する必要がある。そこで、当研究室では安価なPCでも高速な処理速度を実現できる仮想液体モデルを提案し、家庭利用を想定したVR化学実験体験システムの開発を行っている [24][25]。本モデルでは対話操作を重視するため、計算量を抑える必要がある。そのため本モデルでは、まず液体を自由落下状態と容器内状態に分けて考え、液体を前者の状態では粒子、後者の状態では体積とした2つの状態に分けて表現している。なお、この粒子は互いに干渉していないものとし、計算の高速化を図っている。この2つの状態を組み合わせることにより、操作者は流れ落ちる液体を受け止め別の容器に移す、容器内の液体を別の容器ですくう、容器の液体をこぼすなどの動作の実現が可能である。これにより操作者は実際に自身で、容器を介して液体を操作していると感じることができる。

ところで前述のシステムでは、液体をすくったりこぼしたりする際に使用する容器の操作は3次元モーションセンサを介して行っている。近年のゲームコントローラーに見られるように、3次元位置を入力するための装置は安価になりつつあるが、可搬性の面からは、より移動の容易なシステムも需要があると考えられる。また一方、ノートPCの小型軽量高性能化に加えて、キーボードを持たないタブレット型PCも普及してきている。タブレットPCは、電子教科書やe-learning端末として教育現場にも導入が進んでいる [26]。

そこでまず本研究では、前述のPC版VR化学実験体験システムをベースにタブレット版化学実験体験システムを構築する。このPC版では容器移動や容器内液体のかき混ぜ操作を3次元モーションセンサを介して行っていたが、タブレット版に適したタッチパネルによるインタフェースを提案する。またPC版とタブレット版の性能差により発生する問題点の改善を行う。合わせて、PC版とタブレット版ともに文部科学省より発行されている教育指針を参考に実験に用いる化学反応のデータベースを構築する [27]。

次に同システムの教育機関や家庭での利用を目指し、教育効果を検証するための評価実験を行う。PC版VR化学実験体験システムを用いて評価実験を行うことも考えられるが、近年の家庭環境などにおけるPCとタブレットの利用率をみるに、PCが利用されなくなるこ

とはないだろうがタブレットの方が需要があると考えタブレット版を用いる。また実験をお願いする場所への搬送の点からも、最初の段階としてタブレット版を選択した。評価項目は、教育効果を検証するための「学習効果」、タッチパネルを用いた操作性を検証するための「操作性」、興味をもって触ってもらえるかどうかを検証するための「楽しさ」の3点から設定し5段階評価のアンケートを作成した。評価対象は小学4～6年生計19人とし評価実験を実施した。その結果からタブレット版VR化学実験体験システムの教育効果について検証する。

以下、2章では液体表現のための粒子・体積に基づく仮想液体操作モデルの概略を説明する。また3章ではタブレット版VR化学実験体験システムについて説明し、4章では評価実験の結果とその検証、5章では本研究のまとめを述べる。

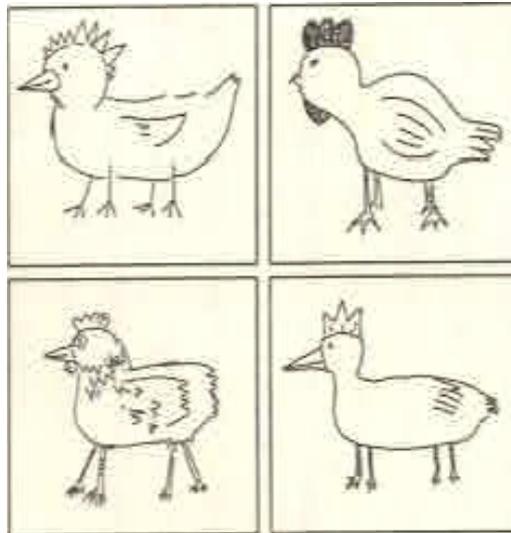


図 1.1: 4つの足を持つ鶏

第2章 粒子・体積に基づく仮想液体モデル

本章では，当研究室でこれまでに提案してきている液体表現のための粒子・体積に基づく仮想液体操作モデルの概要について述べる．

粒子・体積モデルでは，計算量を抑えるため液体全てを粒子モデルで表現するのではなく，液体を自由落下状態と容器内状態に分けて考える．自由落下状態でのみ液体を粒子として捉え，容器に溜まっている液体のように容器内状態である液体については体積で表現を行う．また，実際に操作者が液体との対話操作を行う際に想定する挙動をより自然に可能とするための対話性の高いモデルを実現している．

2.1 液体モデル

当研究室の粒子・体積モデルでは，液体を以下の2つの状態に分けて考える．

- (1) 自由落下状態 (蛇口からこぼれ落ちる液体)
- (2) 容器内状態 (コップなどに溜まっている液体)

最初に状態 (1) についての説明を行う．この状態については粒子に基づいた表現を行う．しかし，本モデルでは対話操作を重視しているため粒子一つ一つについての大きさは考慮せず，粒子同士での衝突や分子間力による影響もおこらないものとする．各粒子の次元仮想空間内での時刻 t における座標を $\mathbf{P}_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$; N : 粒子数) とし，それぞれの粒子は重力および慣性のみに従い移動する．移動量と重力による加速を考慮すると， $\mathbf{P}_i(t)$ は式 (2.1) により決定される．

$$\mathbf{P}_i(t) = 2\mathbf{P}_i(t - \Delta t) - \mathbf{P}_i(t - 2\Delta t) + \mathbf{g}\Delta t^2 \quad (2.1)$$

ここで， \mathbf{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．空気抵抗による広がりを表現する場合は，式 (2.1) 右辺に微小乱数値 $\mathbf{R}_i(t)$ を加える．

次に、後者の状態 (2) の液体については体積に基づいた表現を行う。この状態においては、容器内の対流などは計算量を抑えるため考慮しない。すなわち、ある時刻 t において、仮想空間内に定義された容器内に液体が存在している場合、その容器内には体積 V_t の液体が存在していると表現する。また、先述した粒子としての性質とは異なるものとするため、一切考慮しないこととしている。上記2つの状態間での状態の遷移があった場合には、換算比 N [粒子数/体積] による換算を行う。例えば状態 (2) から状態 (1) への遷移を考える。容器内に体積 V の容器内状態の液体が存在するとし、それらを全て容器外へ落下させた場合は容器内の液体体積は 0 になり、自由落下状態の液体の粒子数は NV 増加する。

2.2 仮想容器のモデル

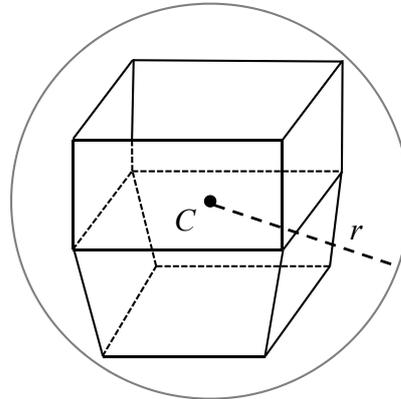
仮想空間内において液体の操作を行うための仮想容器についての説明を行う。凹形状容器については、凸形状容器への分割を行うことで対応可能である [28]。そこで本節では、容器の並行移動や回転操作が可能である凸形状容器の表現の説明を行う。これらの操作を組み合わせることによって、容器で液体をすくう、液体が溜っている容器を運ぶ、容器から液体を流出させる操作が可能である。

2.2.1 容器の表現

まず、図 2.1 のように容器に対して、それを内包する球を考える。その内包球の中心を C 、半径を r とし、容器の世界座標系における位置はベクトル C により表現される。このベクトル C により、容器の平行移動については表現できる。

次に容器の回転操作を考える。図 2.2 のように、 C を原点とし容器座標系 (軸 x_c, y_c, z_c) を設定する。容器の傾きは、軸 y_c と球との交点 (図 2.2 の d_1) の位置の変化 (極座標的な表現) により表す。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、更に z_c を軸として点 d_2 が点 d_3 に移動するように容器を角度 θ だけ回転する。これにより、 ϕ, θ の2つのパラメータで容器の傾きを表現することが可能である。例えば、値がともに 0 の時には、容器が傾いていない状態である。また、容器の方向の変化としては y_c を軸として角度 ψ だけ回転を行う。これにより、実際の容器の向きについては点 d_4 によって表現される。 ψ の回転による容器の傾きについては変化が無い場合、容器内に満たしうる

液量の変化はない．これら $C \theta \phi \psi$ は空間内に存在する容器それぞれに設定されており移動する容器については時刻 t の関数として表す．



仮想容器

図 2.1: 仮想容器を内包する球

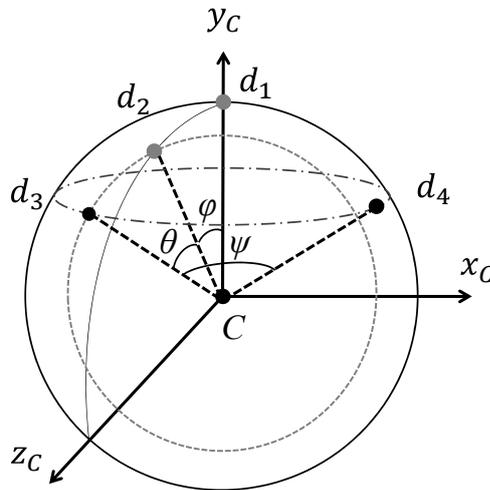


図 2.2: 傾きと向きの変現

2.2.2 液体の流出点，および液位

容器の液体が状態 (2) から状態 (1) に遷移する，つまり容器を傾け液体をこぼす状況を考える．その際の仮想容器の各パラメータを図 2.3 に示す．この時，容器内に入りうる液体の最大量を最大容積 V_m とすると，液体の体積が V_m を超えた場合に流出点 F から流出が起きるものとする．厳密に計算すると，流出点は線分になる場合もあるが実際にはそのようなことは稀であるため，本モデルでは流出は一点からおこるものとしている．流出点 F を点 C を基準とするとする相対的なベクトル \mathbf{F} として式 (2.2) により表す．

$$\mathbf{F} = f(\theta, \phi, \psi) \quad (2.2)$$

また，容器内で静止している液体の高さを液位と呼ぶ．ある時刻 t における液位は， C から鉛直方向へ H の位置であるとする．この時の容器内に存在する液体の体積が $V (V \geq 0)$ であるとする， H は式 (2.3) により表す．

$$H = h(\theta, \phi, V) \quad (2.3)$$

ここで液位 H の取りうる範囲は容器が内包される半径を r としているため， $-r < H < r$ となる．しかし，実際には容器の形状や傾きによってさらに狭い範囲に存在することとなる．また，式 (2.3) を体積 V について変形することで式 (2.4) を得る．

$$V = v(\theta, \phi, H) \quad (2.4)$$

式 (2.4) において容器より下方の H を引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 F の鉛直成分の y 座標を F_y とし， $V = v(\theta, \phi, F_y) = V_m(\theta, \phi)$ となる．これは， F_y が角度 ψ に依存しないためである．また，液面よりも下方の容器の厚みを考慮した時の液位 H 時の体積を V^+ とし，式 (2.5) と図 2.4 で表す．

$$V^+ = v^+(\theta, \phi, H) \quad (2.5)$$

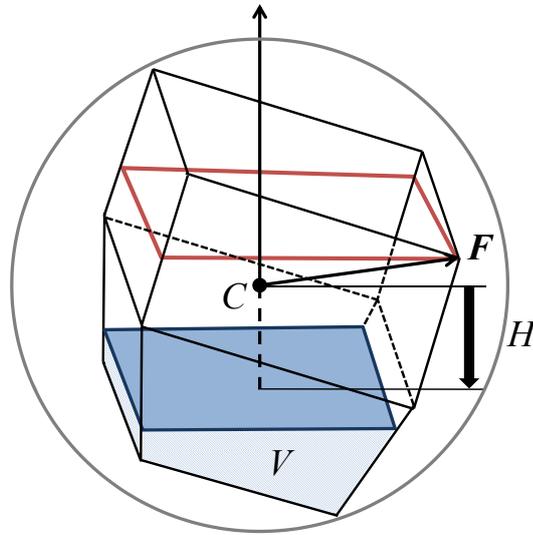


図 2.3: 仮想容器のパラメータ

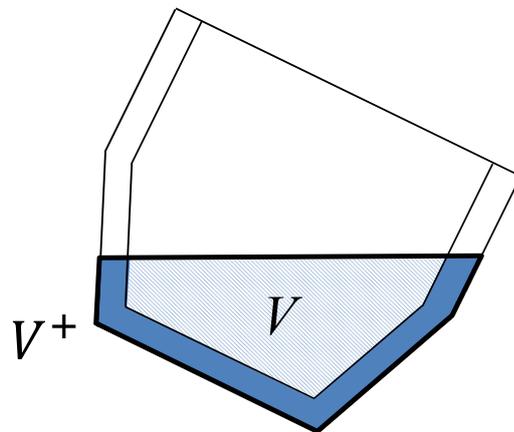


図 2.4: 仮想容器の厚みの考慮

2.3 容器と液体の相互作用モデル

本節では、流れ落ちる液体を容器で受け止める、液体が溜まっている容器に異なる容器を入れ液体をすくう、容器を傾け液体をこぼすなどの動作を行う際の自由落下状態および容器内状態の液体と仮想容器との相互作用について説明する。

2.3.1 自由落下状態の液体と容器の相互作用

自由落下状態の液体の粒子が液面や容器に達した場合、液体の状態を状態 (1) から (2) へと変換させる。すなわち、粒子の状態である液体を消滅させ一定の換算比をもとに体積へと変換させる必要がある。体積に変換するべき粒子が n 個 ($n \geq 0$) の場合、その容器内の時刻 t における液体の体積を式 (2.20) で表す。

$$V(t)^{(0)} = V(t - \Delta t) + n/N \quad (2.6)$$

次節で述べる容器内状態の液体と容器との干渉がなければ、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、液位 H は式 (2.7) により決定される。

$$H(t) = h(\theta, \phi, V(t)^{(1)}) \quad (2.7)$$

2.3.2 容器内状態の液体と容器の相互作用

操作者が自由に移動、回転が可能な容器を容器 1、移動させられない容器を容器 2 とし、液体との相互作用について述べる。各式の添字 1, 2 はそれぞれ容器 1, 容器 2 に対応している。ある時刻 t において式 (2.8) 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とする。

$$C_{1y} - r_1 < C_{2y} + h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)}) \quad (2.8)$$

ここで C_{jy} は容器 j の内包球の中心 C_j の鉛直方向の座標である。このとき、容器 2 内の液体の液位が容器 1 に上昇させられている体積を $U_{21} \geq 0$ とし、式 (2.9) により表す。

$$U_2 = \sum_j U_{2j} \quad (2.9)$$

容器と液体が干渉しており，かつ式 (2.10) が成立するとき，容器 1 の流出点よりも下の部分と容器 2 の液面が干渉してゐる．

$$C_{2y} + h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)} + V_{m1}^+) < C_{1y} + F_{1y} \quad (2.10)$$

式 (2.10) が成立しない場合，つまり容器 2 内の液体中に容器 1 の流出点が存在していることとなり，容器 2 内の液体が容器 1 に流入する．

2.3.3 液面上昇

容器と液面が干渉しているとき，容器 1 が容器 2 内の液体の液位を上昇させている．このときの液位 H_2 を式 (2.11)，式 (2.12) により表す．

$$H_2 = h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(0)} + U_{21}) \quad (2.11)$$

$$U_{21} = V_1 + (\theta_1, \phi_1, C_{2y} + H_2 - C_{1y}) \quad (2.12)$$

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 (2.7) より求められる．

2.3.4 容器内への液体の流入

容器 1 に容器 2 の液体が流入し，さらに式 (2.13) が成立するとき，液体の流入は容器 2 の液面が容器 1 の流出点に達した時点で止まる．

$$V_2^{(0)} + U_{21} - v_2(\theta_2, \phi_2, C_{1y} + F_{1y} - C_{2y}) < V_{m1} - V_1^{(0)} \quad (2.13)$$

この時，容器 2 の液位が容器 1 の流出点となるように H_2 を式 (2.14) により表す．

$$H_2 = (C_{1y} + F_{1y}) - C_{2y} \quad (2.14)$$

これに合わせて，各容器の体積を式 (2.15)，式 (2.16) により計算する．また，容器 1 の液位を式 (2.7) により求める．

$$V_2^{(1)} = v_2(\theta_2, \phi_2, H_2) - U_{21} \quad (2.15)$$

$$U_1^{(1)} + V_2^{(1)} = V_1^{(0)} + V_2^{(0)} \quad (2.16)$$

式 (2.13) が成立しない場合は、容器 1 の流出点より容器 2 の液面が上方に存在していることとなる。この場合、容器 1 の液体の体積 $V_1^{(1)}$ を最大容量 V_{m1} 、液位 H_1 を r_1 とし、液面は考慮せず表示しないものとする。この時の容器 2 の液体の体積と液位は式 (2.16) および式 (2.17) により表す。

$$H_2 = h_2(\theta_2, \phi_2, V_2^{(1)} + U_{21}) \quad (2.17)$$

以上のように設定することにより、時刻 $t + \Delta t$ において 2 つの容器間での液体の移動がなくなった場合に、液体をすくい取る操作が可能となる。

2.3.5 容器外への液体の流出

容器の移動による容器同士の干渉や、容器の傾きにより、時刻 t において式 (2.18) を満たす場合、液体が容器から流出する。

$$V^{(1)} + U > V_m \quad (2.18)$$

流出が起きた場合、流出する液体の体積は式 (2.19) となる。

$$V_f = V^{(1)} + U - V_m \quad (2.19)$$

流出した液体は自由落下状態となるため、液体の状態は体積から粒子へと変換される。よって、 NV_f 個の粒子を点 F から流出させる。また、時刻 t における容器内の体積は式 (2.20) により表される。

$$V(t) = V_m - U \quad (2.20)$$

なお、式 (2.18) を満たさない場合には液体の流出がないものとし、 $V(t) = V(t)^{(1)}$ とする。

2.4 様々な状況の液体表現

本節では、本章でこれまで紹介してきたモデルに基づいて研究されてきた、液面における波や渦の発生、液面や容器側面における色の拡散、また凸形状の容器だけでなくさまざまな

容器の形状を表現するための手法，自由落下状態の液体の描画の質を向上させるための手法を説明する [28]–[34]．なお，より詳しい手法については各小節で紹介する文献を参照されたい．

2.4.1 液面の波や渦の表現

液体が容器内に存在し静止状態である時，液面が波立つ表現を行う．この表現のため，液面を図 2.5 のように直行の格子状に分割した平面として考え，各格子点の高さの計算を行う．このため，各格子点は鉛直方向のみに移動可能とし，この格子点の波の伝搬 2 次元波動方程式を差分方程式として解くことで波を表現する [29]．

また渦に関しては，図 2.6 のように液面を直行格子状だけでなく同心円格子としても考える．直行格子上の任意の点に対応する同心円格子状の点を求めることで，波の伝搬が円弧方向となり，擬似的な渦の表現が可能である [30]．

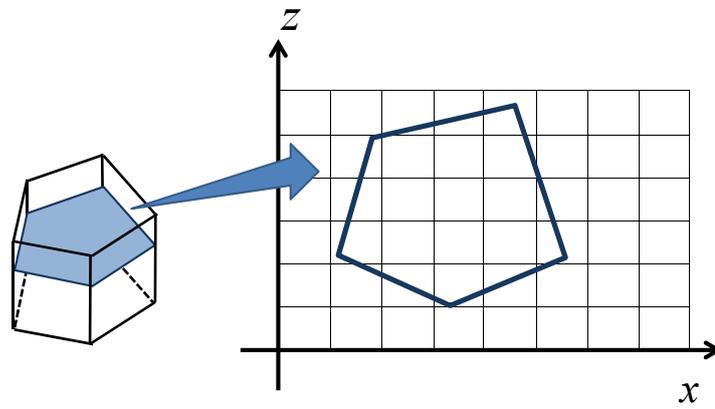
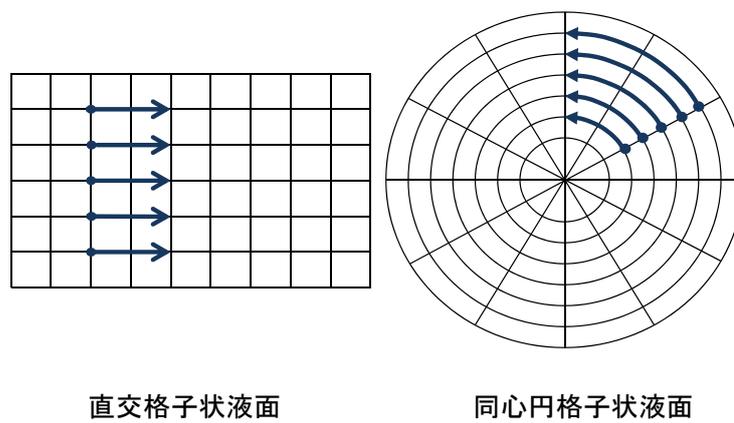


図 2.5: 液面を格子状に分割



直交格子状液面

同心円格子状液面

図 2.6: 分割した格子の対応

2.4.2 色の拡散

本モデルでは前小節のように波の表現の際に液面を格子状に分割し、各格子点で2次元波動方程式を計算することで表現を行う(図2.7)。ただし、色の拡散表現に奥行きを持たせるために若干の厚みを持つ3次元格子とする(図2.8)。この各格子点に、更に色のベクトル値(RGBA値)、および色の伝搬を実現するための重みを表す変数を含める。この色の重みを拡散方程式を用いて拡散させ、ある時刻 t の格子点の色と拡散してきた色とを重みの割合にしたがい混合し、時刻 $t + \Delta t$ の色ベクトル値を算出し、液面の色の拡散表現を行う。

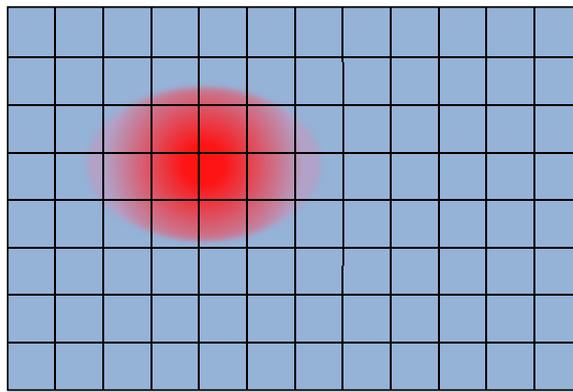


図 2.7: 液面における色の拡散

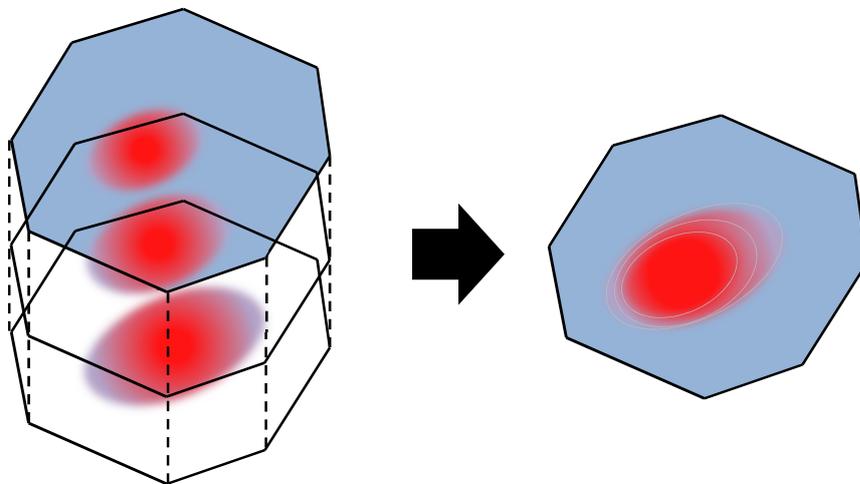


図 2.8: 複数の格子の重ね合わせ

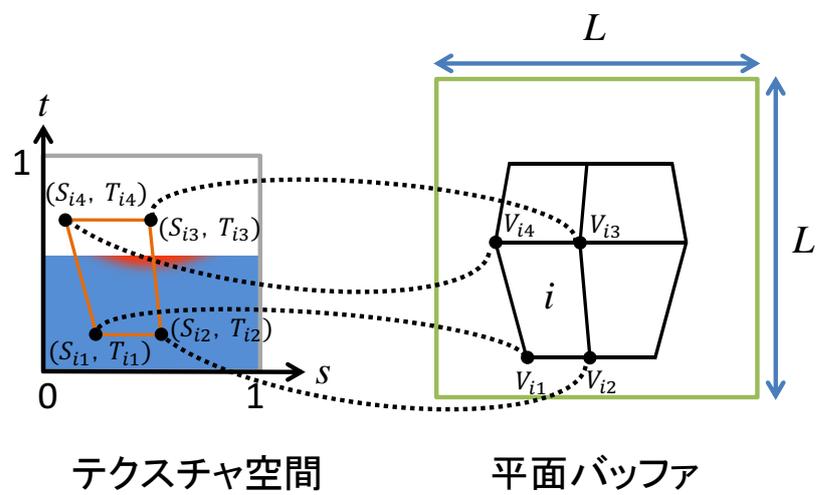
2.4.3 視点位置を考慮した側面描画

本節では容器側面における視点位置を考慮した側面描画について説明する．容器側面の色の拡散に関しては，鉛直方向に平行な平面バッファを用意し，液面と同様に色の計算を行う．この際に平面バッファを視点に対して常に垂直になるように回転させることで，液体が流入したときに適切な位置から色を拡散させることができる．また，容器の各面の各頂点に適切なテクスチャ上の座標を与えることにより，各面にテクスチャマッピングを行う．ある容器側面 i の j 番目の頂点の座標 V_{ij} と前述の平面バッファの一辺の長さ L から，容器側面の各頂点に合ったテクスチャ座標 (S_{ij}, T_{ij}) は次式により求められる．

$$\begin{cases} S_{ij} = \frac{V_{ijx}}{L} \\ T_{ij} = \frac{V_{ijy}}{L} \end{cases} \quad (2.21)$$

容器側面 i の頂点 V_{ij} に求めたテクスチャ座標 (S, T) を割り当てることで，液体側面の各面に適切な部分のみのテクスチャを投影することができる (図 2.9) ．

また，透明な液体の入った容器に着色された液体を入れると，視点の高さによって色の広がる速度が違ってくるように見える．本モデルではこれを「見かけ上の色の拡散速度が異なる」と考え，視点位置に応じた拡散速度で平面バッファの色情報を変化させ，液体側面に投影することで側面の描画を行う．視点が上がる場合は，見かけ上の色の拡散速度が遅くなるため，直前の視点との差に応じて数フレーム前の平面バッファ情報を読み込み，液体側面の描画を行う．下がる場合は，見かけ上の色の拡散速度が速くなるため，直前の視点において現在の視点位置との差に応じて数フレーム先の拡散状況を計算し，平面バッファ情報として適用することで液体側面の描画を行う [32] ．

図 2.9: 容器側面 i における各頂点とテクスチャ座標の対応付け

2.4.4 凹形状容器の表現

2.2節で説明した容器モデルは容器が凸形状である場合を想定していた。しかし、実際に液体操作を行う際にはフラスコのように凹形状の容器を用いることもある。そこで、図2.10のように凹形状容器を複数の凸形状容器の組み合わせで考え、それぞれの凸形状容器間での液体の移動を考えることで、凹形状容器における液体操作を実現する[28]。凸形状容器間での液体の移動はフラスコの筒部分を伝い流れる移動や、容器内を流れ落ちる液体の移動が考えられ、これらの移動を表現することで粒子・体積モデルにおける仮想液体操作の臨場感の向上を図る。そのために容器内を流れる液体を容器内状態と自由落下状態の中間的な状態として扱う。フラスコの筒部分を伝うような容器側面に沿った流れを伝い流れ(図2.11)、容器内を自由落下する流れを落下流れと定義する(図2.12)。伝い流れは流れる液体の体積および容器の形状と姿勢から流れの種類および流れの始点と終点を決定する。伝い流れる速度はモデルの簡略化の観点から等速運動とし、流れ開始から終了までの時間は液体の体積と容器斜面の傾きを用いて決定し描画する。落下流れは、地面に大して垂直な壁面を伝う流れとして扱い挙動の計算を行い描画する。実際には摩擦力や空気抵抗などの力が働くため、落下流れと伝い流れは等しい挙動とはならないが、容器内の限定された条件であるため人が認識できるほどの差異は微小であると考えられるので同様の処理として扱う[33]。

2.4.5 鍵粒子と包絡面による落下液体表現

2.1節で述べたように自由落下状態の液体は粒子間の干渉を考慮しない粒子に基づいて表現する。当初は描画も粒子1つ1つを四角形の半透明ポリゴンによる表現としていた。しかし、視点から粒子までの距離や位置に関係なく全ての粒子が同じ大きさのポリゴンで表現されており、また落下液体に視点を近づけるとポリゴンの間に隙間が生じてしまい不自然な描画であった。そこで描画においては初期の自由落下粒子に代えて新たに少数の鍵粒子を用意し、鍵粒子の影響範囲に対して包絡面を作成することで落下液体を表現する(図2.13)。包絡面を描画する際、どの鍵粒子同士をひとまとまりの液体として包絡するかの判断を容易にするために、各鍵粒子をセグメント毎に管理する。本節の手法により計算量を抑えつつ自由落下状態の液体の描画の質を向上できる[34]。

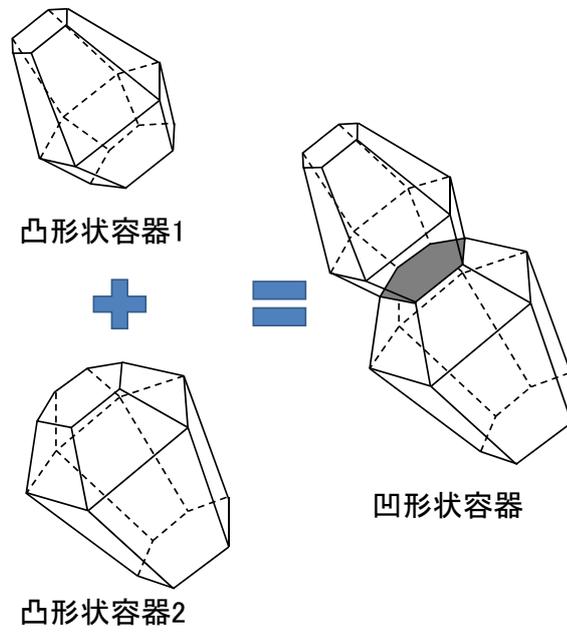


図 2.10: 凹形状容器の表現

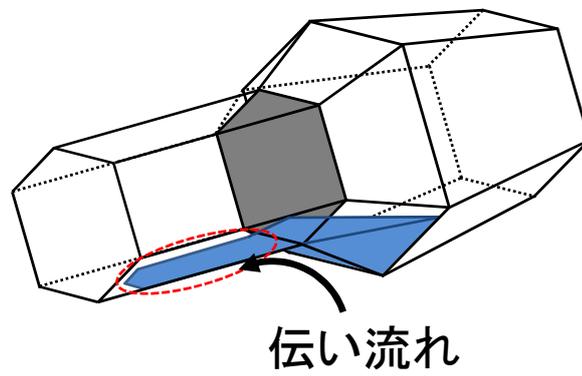


図 2.11: 容器内の伝い流れ

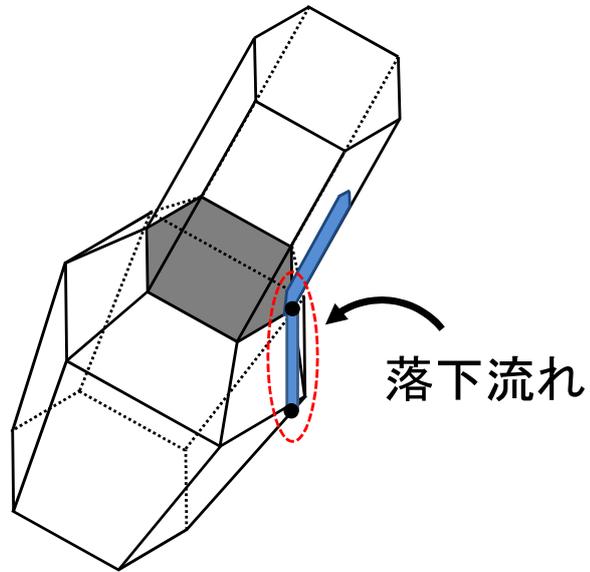


図 2.12: 容器内の落下流れ

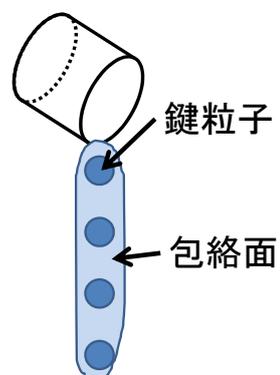


図 2.13: 鍵粒子と包絡面の概要

第3章 タブレット版VR化学実験体験システムの構築

当研究室では2章で述べたように粒子・体積に基づく仮想液体モデルをベースに、より臨場感の高い容器内状態や自由落下状態を表現するための手法を用いた液体表現を研究してきた。その応用例としてPC版VR化学実験体験システムを当研究室では開発してきた。本システムはモーションセンサを用いてビーカーやフラスコを自分の手で操作し化学反応を学ぶことができるシステムである。本章ではまずPC版VR化学実験体験システムについて述べる。

また本研究では教育機関や家庭への同システムの普及を目指し可搬性に優れ、教育機関にも導入が進んでいるタブレット上へVR化学実験体験システムを構築する。その際、従来は3次元モーションセンサーを介して行っていたビーカーやフラスコなどの容器操作および液体のかき混ぜに用いる攪拌棒の操作を可搬性の面からタッチパネルを用いたインタフェースへと変更する。なお、タッチパネルを用いた容器の移動操作のより詳しい手法については3.2節で紹介している文献を参照されたい。また、2章で述べた安価な計算機で高速な処理速度を実現している手法でもタブレットの制約上実現が困難なものがあった。近年のタブレットの成長を見るに将来的には安価なタブレットでも高速な処理能力が期待できる。そのため、現時点では化学実験が行える最低限の機能の実装し、また一部の機能は簡略化した上で実装した。これらについても本章で述べる。

本章の最後ではVR化学実験体験システムの反応の組み合わせの設定について述べる。従来までのVR化学実験システムの試薬および水溶液の設定は代表的な反応を実装したものであり、明確な目的を持ったものではなかった。教育現場や家庭での利用を考えた場合、学習効果の高い実験を行えることが望まれる。そこで本研究では文部科学省が発行している実験の手引きを参考に小学6年生が実際に理科の実験で用いる水溶液および試薬の設定を行う。本設定はPC版タブレット版双方に適用する。

3.1 PC 版 VR 化学実験体験システムについて

当研究室では小学生から中学生を対象とした PC 版 VR 化学実験体験システムの開発を行ってきている。システムの外観を図 3.1 に示す。本システムは表 3.1 に示す計算機とモーションセンサを用いている。タブレット版開発時において水溶液は純水，梅干しの汁，炭酸，硫酸，アンモニア水の 5 種類，試薬は BTB 溶液，石灰水，フェノールフタレインの 3 種類としている。また，図 3.2 のように試薬と水溶液の反応についてマウスを用いて ×クイズ形式で学習し，図 3.3 のように間違っただけを復習する形で画面上に残したまま反応を確認することができる機能や図 3.4 のように PC 画面上に自由に書き込み，試薬の反応についてメモをとることができる機能を実装している。図 3.1 に示すように操作者は現実空間のモーションセンサが取り付けられたコップを操作することで，VR 環境内の容器を操作し液体の混ぜ合わせを観察することができる。

本来は試薬と水溶液は別々の容器に用意し実験を行うが，本システムでは試薬は備え付けのビーカーに最初から入っているとし，水溶液は架空の蛇口から流れ出るとしている。なぜこのようなシステムとしたかという点、自分の手で落下する液体を受け止め，移動させ，液体の混ぜ合わせを確認させる方が操作者の興味を引き，楽しみながら学習できると考えたためである。

表 3.1: 実験に用いたタブレットの性能表

CPU	Pentium(R)Dual-Core CPU E5200 2.50GHz
GPU	GeForce 9500 GT
メモリ	2GB
モーションセンサ	3SPACE ISOTRAK II (POLHEMUS 社)



図 3.1: PC 版 VR 化学実験体験システム



図 3.2: 試薬と反応についての学習クイズ



図 3.3: 実際に操作しながら復習



図 3.4: 書き込み機能

3.2 タッチパネルを用いた容器の移動操作

本節ではタッチパネルを用いた6自由度の移動ができる容器の操作方法について述べる [35]. 平行移動については, 通常のドラッグ操作による2自由度の平行移動, 2本指のドラッグ操作によるタッチパネルに垂直な平行移動とする. 容器自体をタップすることで3自由度の回転移動モードに変更する. 3自由度の回転については, 容器を内包する球を2次元平面を介して回すようなインタフェースを実現する. そのために球体に緯度, 経度で球体上の点を表すことができる地理座標系を取り入れる (図 3.5) 球体の回転方法については, タッチパネル上の指の動きを緯度成分, 経度成分へと分解した上で経線, 緯線それぞれに沿って地球を回すようなインタフェースモデルとする. 具体的にはタッチパネル上の指の動きの移動前の点と移動後の点を a, b とし, 指の動きを緯度成分と経度成分へと分解するための点を w と定義する (図 3.6). 点 a, b の地理座標 (緯度, 経度) を $(\alpha_a, \beta_a), (\alpha_b, \beta_b)$ で表す. この時 w は (α_b, β_a) と表せる. 経度成分, すなわち経度の変化分 $(b - w)$ により地球が地軸回りに回転すると考える. また, 緯度成分, すなわち緯度の変化分 $(w - a)$ により球体は描かれた等経度線が見た目上動かないように回転すると考える. これらの組み合わせにより, 回転後の容器の傾きと方向 (θ, ϕ, ψ) を決定する. 以上の手法により操作者は6自由度の容器操作ができる.

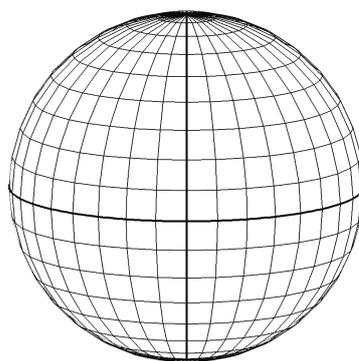


図 3.5: 地理座標系で表される球体

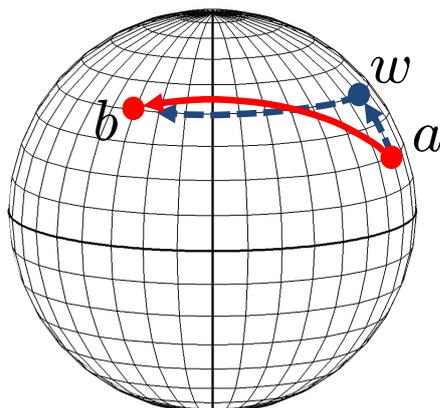


図 3.6: 指の移動成分の分解

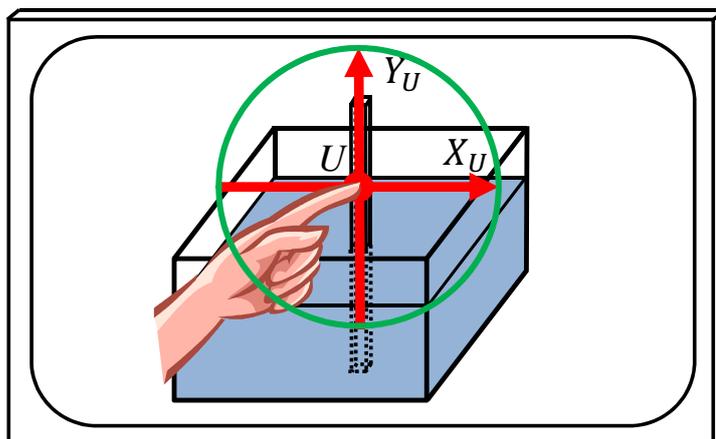
3.3 タッチパネルを用いたかき混ぜ操作

理科の実験の際，攪拌棒で試薬をかき混ぜ，反応の進行具合を溶液色の拡散により観察することが考えられる．従来まではモーションセンサやマウスを用いてかき混ぜ動作を行っていたが本研究ではタブレット版を構築するためにタッチパネルを用いたかき混ぜ操作を実現する．具体的にはタッチスクリーン上で攪拌棒を触りながら円を描くようなインタフェースを提案する．なお，かき混ぜ操作は固定されている容器でのみ行うとし，固定されている容器の液面の中心座標に攪拌棒を設定し攪拌棒の回転の中心も液面の中心座標とする．まず，攪拌棒近傍の最初に触れられた点を原点 U とする座標系を考える (図 3.7)．それと同時に U を中心に事前に定められた大きさの半径を持つ 3 次元上の円を設定し，その円内に指の軌跡の座標がある場合 X_U 軸の正方向とある時刻 t の指の軌跡の座標から角度 γ と半径 R_U を求める (図 3.7)． R_U と γ は式 (3.2) と式 (3.1) から求められる．なお指の軌跡の座標 u は (x_u, y_u) とする．

$$R_U = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} \quad (3.1)$$

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{y_u}{R_U}\right) \quad (3.2)$$

時刻 t と $t - \Delta t$ の γ の差より攪拌棒の回転角度を求め， R_U の大きさにより攪拌棒の回転半径を設定することでかき混ぜ動作が可能である．また，回転角度の増減に応じて色の拡散速度を変化させる．



タッチパネル

図 3.7: かき混ぜ動作の座標系

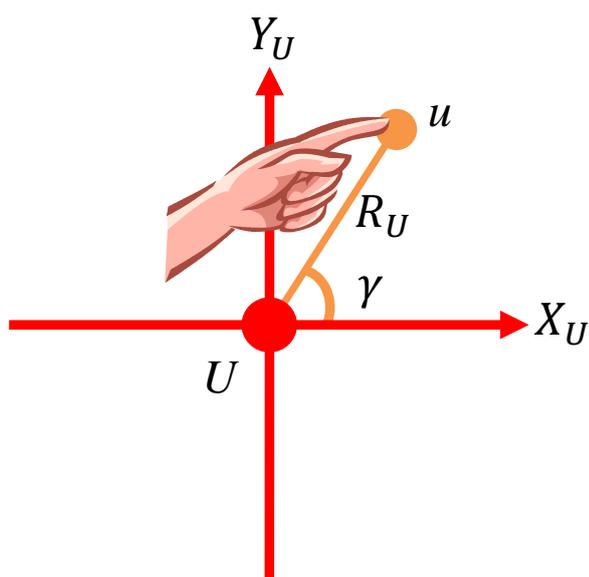


図 3.8: かき混ぜ動作中の γ と R_U

3.4 タブレット版で簡略化した部分について

本節ではタブレット版 VR 化学実験体験システムを構築する際に簡略化した機能について述べる。当研究室では安価な PC でも高速な処理速度を実現できる手法を研究してきた。しかし、実際にタブレット版 VR 化学実験体験システムを構築した際、テクスチャバッファを用いた側面描画では速度の低下が見られた。表 3.1 に示す性能の PC 版では 48fps 以上の描画処理速度を実現しているが、本研究で用いた表 3.2 に示す性能のタブレット版では 8-10fps 程度の描画処理速度しか実現できなかった。一般的に操作者が対話操作をしているように実感するためには 15fps 以上の描画処理速度が必要とされるため、このままでは臨場感の高いシステムとは言えない。そこでボトルネックになっている部分を調査したところ、ボトルネックになっているのは計算処理部分ではなく描画処理部分であることがわかった。よって側面描画の手法そのものではなく、グラフィックボードに処理速度低下の問題があると考えられる。将来的には安価なタブレットにも高性能なグラフィックボードが搭載されると考え、本研究では側面描画については簡略化した手法を用いて評価実験を行う。具体的な簡略化した手法について説明する。本手法では側面においては色の拡散を行わずに 1 色で塗りつぶすこととする。そのためにまず、液面と容器側面との交点を求める (図 3.9)。図 3.9 の面 a のように面を構成する全ての頂点の鉛直方向の座標が交点の鉛直方向の座標より小さい場合、面を構成する全ての頂点を用いて塗りつぶす。図 3.9 の面 b のように面を構成する辺に交点が含まれるときは交点及び、交点の鉛直方向の座標より小さい鉛直方向の座標を持つ頂点を用いて新たな 1 つの面を作り塗りつぶす。塗りつぶす色は液面全体の色の平均とし、視点方向に対して表側となる側面にのみ側面描画を行う。本手法によりタブレット版においても側面描画を表現しつつ、15fps 以上の処理速度が実現できた。

また、鍵粒子と包絡面による落下液体表現は、リスト管理に多くのメモリを用いる必要がある。しかし AndroidOS の制約上、1 つのシステムが確保できるメモリ量に制限があるため、落下液体の描画に上記手法を用いるのは難しい。そこで本研究では落下液体の描画は初期の粒子ひとつひとつを四角形の半透明ポリゴンによるものとした。本手法の問題点についても将来的には 1 つのシステムに多くのメモリを利用できる安価なタブレットが登場することが考えられるためいずれは実装されることが望まれる。

表 3.2: 実験に用いたタブレットの性能表

タブレット名	Xperia Z2 Tablet
OS	Android4.4
CPU	Snapdragon801 2.3GHz
メモリ	3GB

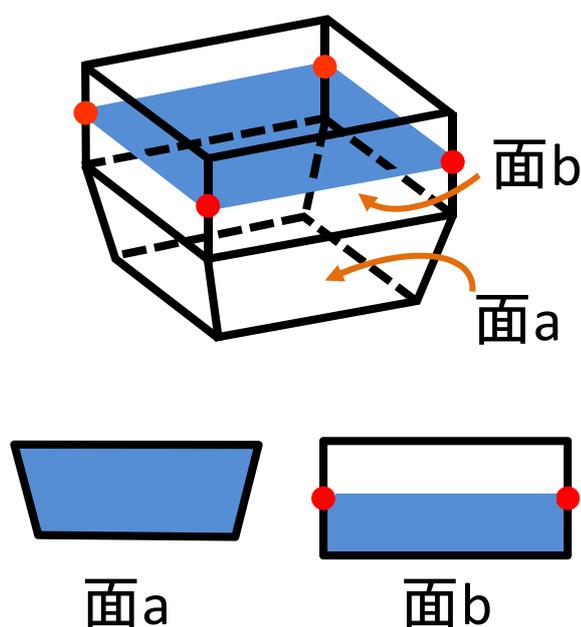


図 3.9: 側面の塗りつぶし

3.5 水溶液および試薬の設定

タブレット版のみならず従来までの PC 版にも言えることだが VR 化学実験体験システムの教育現場や家庭への利用を考えた際、液体の実験は実際に小中学生が学習する実験内容を行えることが望まれる。そこで全国共通の教育指針となる文部科学省が定める実験の手引きを参考に、小学6年生を対象に実験のねらいを定め、実験内容、すなわち試薬の組み合わせとその反応のデータベースを構築する。液体を用いた実験は「水溶液の性質」の単元内で行われる。この単元では

- 水溶液には、酸性、アルカリ性および中性のものがあること
- 水溶液には、気体が溶けているものがあること

- 水溶液には、金属を変化させるものがあること

を学習することがねらいとなる [36]。本研究における VR 化学実験体験では「水溶液には、酸性、アルカリ性および中性のものがあること」を学習することに重点を置くこととする。

まず、試薬の選択について述べる。文部科学省が定める実験ではリトマス試験紙を用いて酸性、アルカリ性、中性を判別するが、今回は試薬を用いた判別を学習してもらうため、リトマス紙を用いた観察、実験後の指導の手立てとして挙げられている BTB 溶液と紫キャベツを用いる。また、VR 化学実験体験は院内学級などの学校に通えなくなってしまった子ども対象としているため通学している小学6年生を対象とした評価実験を行う際に、実際にやったことがある試薬の実験だけでなく、教科書のみで学習した試薬の実験を体験してもらうことでより良いデータが取れると考えた。そこで単元の発展として教科書などで反応の仕方のみを習うフェノールフタレイン溶液とメチルオレンジも試薬として用いる。

次に試薬と反応させる水溶液の選択について述べる。「水溶液の性質」の単元において実験で用いられる水溶液は次の4つとなる。

- 食塩水
- 塩酸水
- 炭酸水
- アンモニア水

また「水溶液の性質」の単元の発展として塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の中和反応を BTB 溶液を用いて学習する事がある。中和反応は酸性、アルカリ性、中性への理解を深めるためには有用な液体の混ぜ合わせの実験であると考えられる。そこで本研究では食塩水を純水に変えた上記の4つに水酸化ナトリウム水溶液を加えた計5つを水溶液として設定する。

各試薬の初期状態の色と反応後の色については表 3.3 と表 3.4 に示す。なお、各水溶液の性質については表 3.5 に示す。

表 3.3: 試薬の初期状態の色

試薬	色
BTB 溶液	緑
フェノールフタレイン	無色
メチルオレンジ	オレンジ
紫キャベツ	紫

表 3.4: 試薬の反応について

試薬	反応する水溶液の性質	反応後の色
BTB 溶液	酸性	黄
BTB 溶液	アルカリ性	青
フェノールフタレイン	アルカリ性	赤紫
メチルオレンジ	酸性	赤
紫キャベツ	酸性	赤
紫キャベツ	アルカリ性	緑

表 3.5: 各水溶液の性質

水溶液	性質
純水	中性
炭酸水	酸性
塩酸水	酸性
アンモニア水	アルカリ性
水酸化ナトリウム水溶液	アルカリ性

第4章 実験とその結果

前述の通りタブレット版 VR 化学実験体験システムを構築し，評価実験を行う．その際に，「学習理解度」「操作性」「楽しさ」の3点から評価項目を設定する．また，評価結果からタブレット版 VR 化学実験体験システムの教育効果の検証を行う．なお，実験に用いるタブレットの性能は表 3.2 の通りである．

4.1 評価項目の設定

本論文ではタブレット PC 版 VR 化学実験体験システムの教育効果の検証を行う．その際に，どのような観点から評価を行うかを決める必要がある．そこで，本節では VR 化学実験体験システムの位置づけを考慮した評価項目について述べる．

タブレット版 VR 化学実験体験システムは体験型教育システムとして開発しており，また実際の教育現場での利用を目指している．そのためまず教育効果がどの程度あるのかを調べたい．具体的には本システムを利用することで小学6年生が学ぶ「水溶液の性質」を理解できたかどうかを検証する．そのため「学習理解度」の評価項目として以下の3つを設定する．

- 液体の混ぜ合わせ，色の変化に関する理解度
- 各試薬の反応に関する理解度
- 各液体が酸性，アルカリ性，中性のどれに属しているかに関する理解度

また，タブレット PC を用いたシステムである性質上，操作者が思い通りに動かせるかどうかも重要な要素である．特に本システムでは容器操作および，液体のかき混ぜ操作をタッチパネルを通して行うため「操作性」の評価項目として以下の2つを設定する．

- 思い通りに容器を操作し液体の移動ができたかどうか
- 液体のかき混ぜを思い通りに操作できたかどうか

最後に対象者が小学生から中学生程度なのでシステム自体に興味を持ち、楽しく触ることができるかどうかを検証すべきと考えた。そのため「楽しさ」の評価項目として以下の項目を設定する。

- 実験全体を通してどれくらい楽しめたか

以上の項目からタブレット PC 版 VR 化学実験体験システムの評価実験を行う。

4.2 評価方法と実験対象者について

評価方法は5段階評価の点数制とする。タブレット版 VR 化学実験システムを体験してもらった後、4.1 節で提案した6つの項目について評価してもらう。また「学習理解度」「操作性」「楽しさ」に関する設問それぞれに自由筆記欄も設けた。実験対象者は学習塾「学研なかよし教室」およびダンス教室「キッズ HipHop クラブ」の小学生6年生13名、小学5年生3名、小学4年生3名である。このうち小学4、5年生については「水溶液の性質」の単元の予備知識がない状態であるため、「学習理解度」を除いた項目で評価実験および検証を行う。

4.3 実験の様子

実験に利用したタブレットの画面を図4.1に示す。画面左の容器内の試薬の変更は画面左側のボタンで行う。画面右側の落下してきている水溶液の変更は、落下してきている液体の出所をタッチすることで行う。画面右側のボタンで中和反応および各試薬の反応をテキストと絵で学習することができる。本来であれば試薬と水溶液を別々の容器に入れ実験を行うが3.1 節で述べたように、興味をもって触ってもらうシステムとするため、試薬は備え付けの容器に最初から入っているとし、水溶液は架空の蛇口から流れ出ているとする。通常時は3.2 節で述べた移動モードとし(図4.2)、左下の「かき混ぜボタン」を押すこと3.3 節で述べたかき混ぜを行えるかき混ぜモードに移行する(図4.3)。なおかき混ぜモード時に設定している3次元上の円は画面上では楕円として表示している。また、実際の実験の様子を図4.4-4.6に示す。

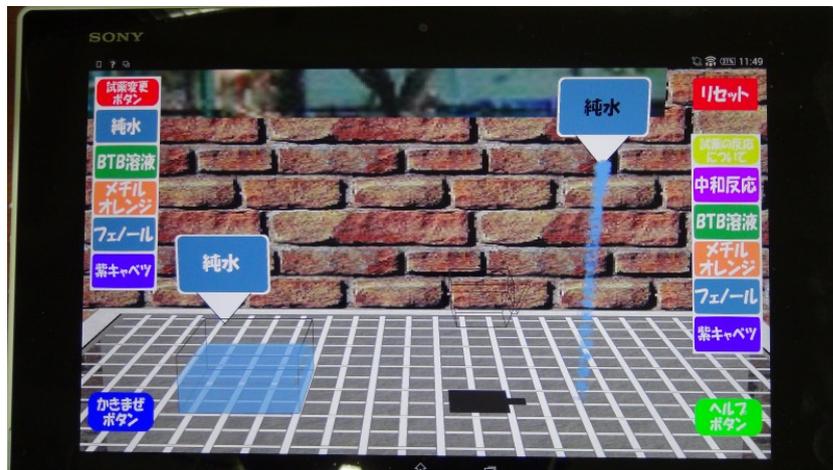


図 4.1: 実験に用いるタブレットの全容

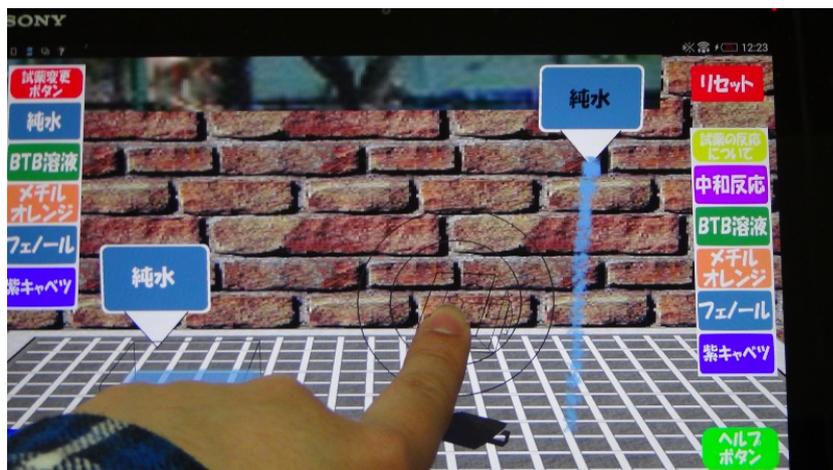


図 4.2: 移動モード

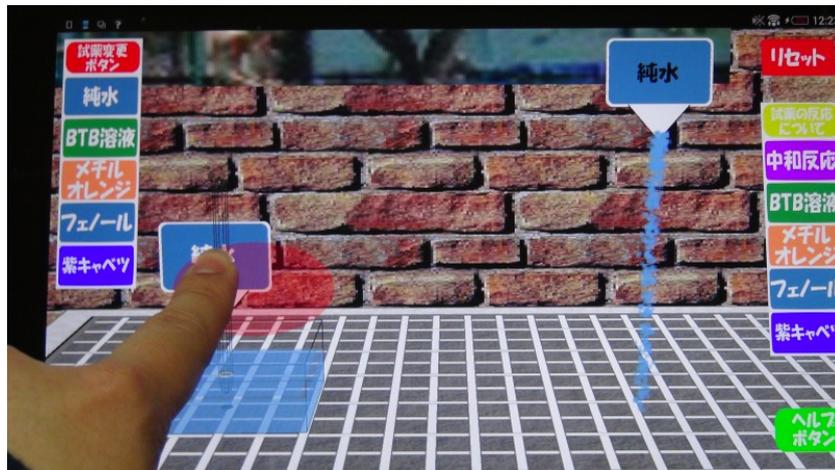


図 4.3: かき混ぜモード

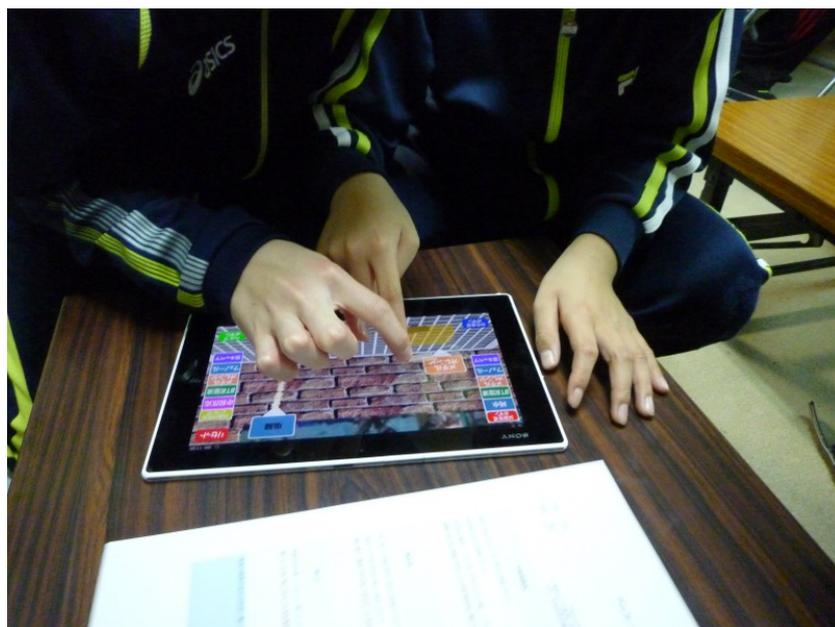


図 4.4: 実験の様子 1

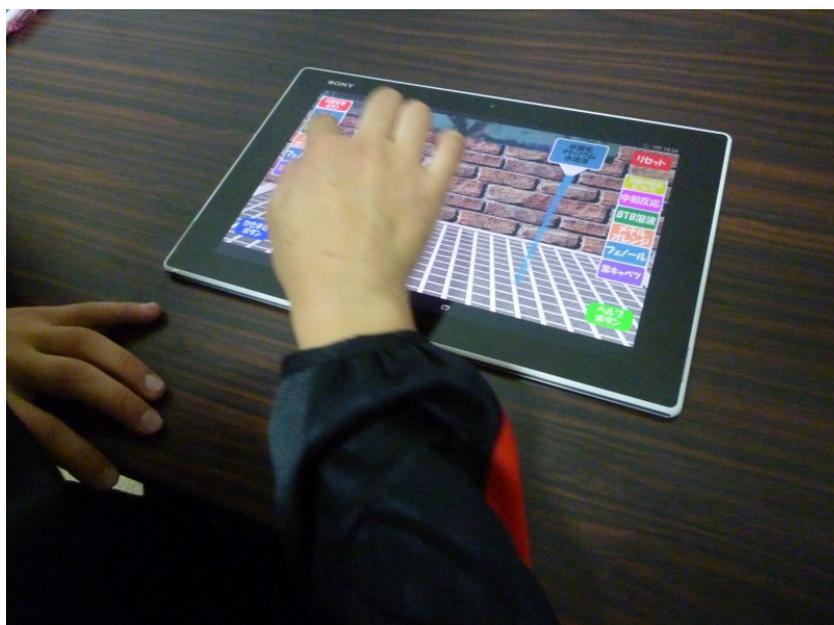


図 4.5: 実験の様子 2

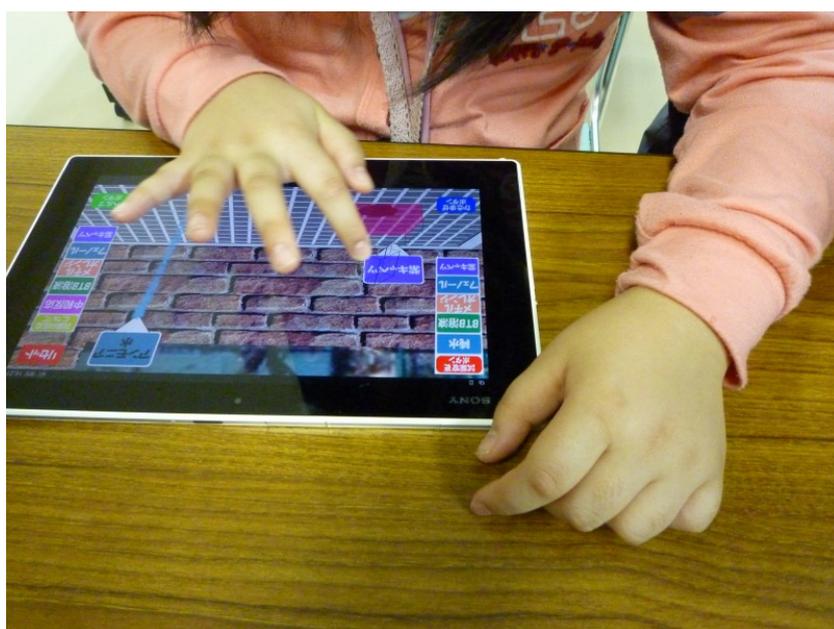


図 4.6: 実験の様子 3

4.4 評価実験の検証

本節では評価してもらった結果についての検証を「学習理解度」「操作性」「楽しさ」それぞれで行う。検証を行う際、得られた結果をグラフにし結果を比較する。また自由筆記欄に書かれた意見および実際の実験の様子も参考にして検証する。

4.4.1 外れ値の除外

まず評価実験の検証を行う際に外れ値の除外を行う。対象者のうち小学6年生1名がタブレット自体にあまり触れたことがなく、タッチパネルを用いた操作に大変不慣れであり全項目で2~3点の低評価を付けた。例として操作に不慣れな子とそれ以外の小学6年生の評価を比較した学習理解度についての結果を図4.7-4.9に示す。本来であれば全く触ったことがない児童も考慮すべきだが、今回得られた結果数に対する全く触れたことのない操作者の結果の割合が低く、データ数としても1人しかいないため、小学6年生のデータを用いる「学習理解度(4.4.2節, 図4.10)」「操作性(4.4.3節, 図4.11-4.12)」「楽しさ(4.4.4節, 図4.13)」では除外して分析する。

また、実験に対するやる気が全くなくタブレットにもあまり触れずに全項目に2点を付けた小学4年生1名もいた。本来であれば学習意欲の低い児童に対しても、興味をもって触れてもらおうシステムが望まれるが、上記と同様に今回得られた結果数に対する全く興味がない児童の結果の割合が低く、データ数としても1人しかいないため、小学4年生のデータを用いる「操作性(4.4.3節, 図4.11-4.12)」「楽しさ(4.4.4節, 図4.13)」では外れ値として除外して分析する。

以上より「学習理解度」については計12名、「操作性」と「楽しさ」については計17名に評価してもらった結果について述べる。

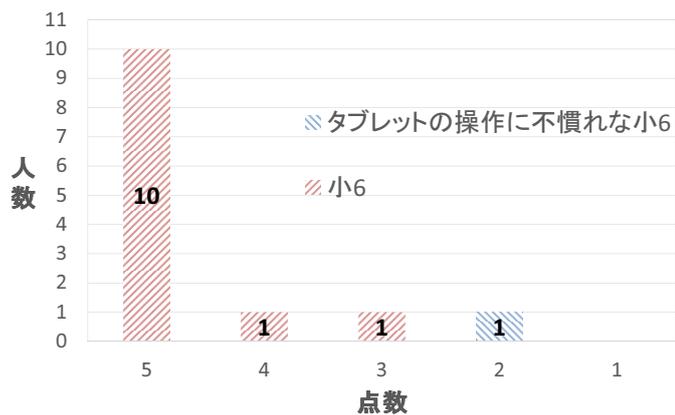


図 4.7: 液体の混ぜ合わせ，色の変化を理解できたかについての比較

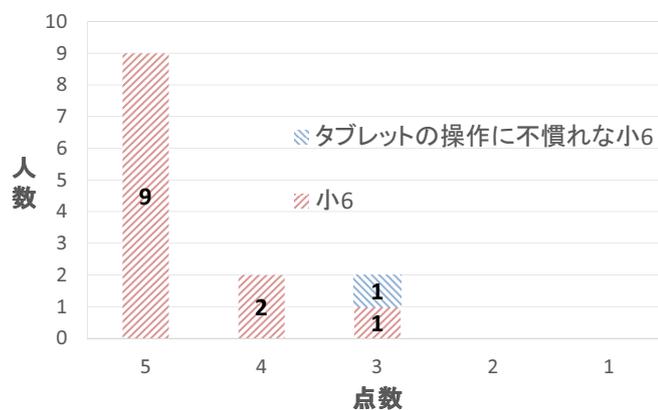


図 4.8: 各試薬の反応を理解できたかについての比較

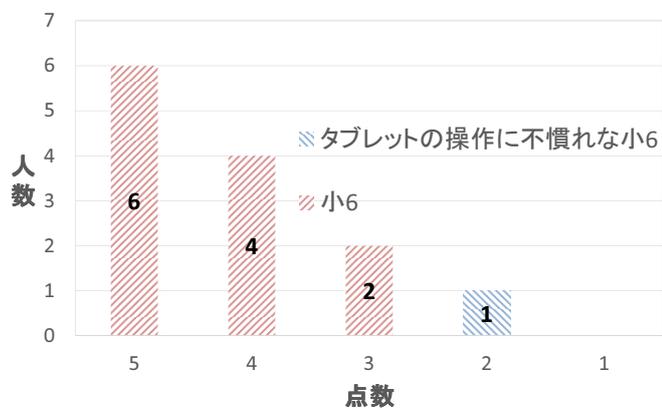


図 4.9: 各液体が酸性、アルカリ性、中性のどれに属しているか理解できたかについての比較

4.4.2 学習理解度の結果についての検証

学習理解度の評価結果を図 4.10 に示す。本節における 5 段階評価の目安は以下の通りとした。

- 5: とても良く理解できた
- 4: 良く理解できた
- 3: 理解できた
- 2: あまり理解できたなかった
- 1: まったく理解できなかった

学習理解度については全ての評価項目で 80%以上の児童から 4 点以上の高い評価が得られた。自由筆記欄でも「試液に特定の液体を入れると色が変わることがわかった」、「色が変化の様子が観察できた」などの好意的な評価が得られ、本システムの液体の混ぜ合わせの表現は「水溶液の性質」を学習するのに有用であると判断できる。また実験中の様子を観察していたところ、教科書でしか習っていない、すなわち実験を体験したことがないフェノールフタレインやメチルオレンジの反応も学習できていた。

しかしながら「水溶液の性質」の単元のねらいである「各液体が酸性、アルカリ性、中性のどれに属しているか理解できたか」の項目は他 2 つに比べて 5 点を付けた人数が少ないことが図 4.10 からわかる。これについては自由筆記欄で「中性を混ぜて色が変わる試薬はないのか」との意見が少数見られたため中性を判別できず、5 点を付けられなかったのではないかと考えられる。特に今回実験を行った小学生は理科の授業で中和については学習しておらず、中和反応を上手く観察できた児童はいなかった。「水溶液の性質」に対する知識をより深めてもらうためにもよりわかりやすい中和反応の実装が考えられる。具体的にはマグネシウム片を試薬に入れた状態での中和反応が考えられる。この実験を実現するためにも個体投入による気泡の発生の実装を課題とし、システムの改善を目指したい。

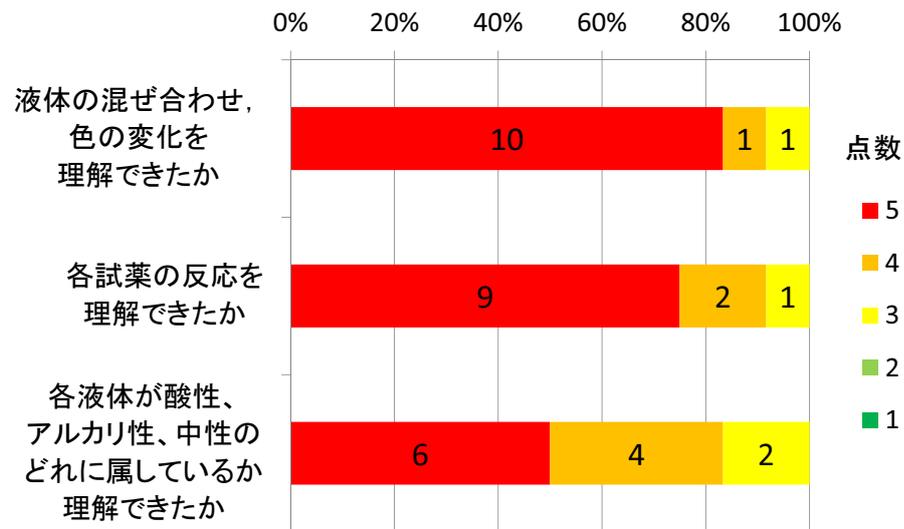


図 4.10: 学習理解度の結果 (単位:人)

4.4.3 操作性の結果についての検証

操作性の評価結果を表 4.1 および図 4.11–4.12 に示す。本節における 5 段階評価の目安は以下の通りとした。

- 5: 完璧に思い通りに操作できた
- 4: ほぼ思い通りに操作できた
- 3: おおよそ思い通りに操作できた
- 2: ほとんど思い通りに操作できなかった
- 1: まったく思い通りに操作できなかった

液体のかき混ぜ操作については、図 4.12 および平均点が 4.529 であることから高い操作性を実現できたことがわかる。その一方で、容器操作については図 4.11 からほとんどの児童が 3, 4 点の評価を付け平均点は 3.765 と他の項目と比べると低い点数となった。上手く操作できなかった点として「容器のどこにあるかわからなくなった時があった」、「容器の上下がわかりにくい」などの意見が自由筆記欄で見られた。本システムの容器の側面描画は 3.4 節

で述べたとおり，1色で塗りつぶすものとしている．処理速度との兼ね合いから容器に液体が入っている状態でのみ側面描画を行うようにしてしまったため，本システムでは空の状態のときに側面を一切描画していなかった，すなわちワイヤフレーム表示であった．このため床のテクスチャと見分けが付きにくくなってしまい上記の問題が発生してしまったのである．今後は，空の状態でも側面を薄い白色透明で描画し容器のガラスの存在を示したい．実験自体を再び行うのは困難であるため，次回の評価実験では修正したシステムで実験に望みたい．ただし，容器が空の場合には確認が困難である点を除けば「慣れると思い通りに動かせるようになった」などの評価が得られ，容器操作のインタフェース自体は有用であると考えられる．

表 4.1: 操作性の評価項目の平均点

思い通りに容器を操作し液体の移動ができたか	3.765
液体のかき混ぜを思い通りに操作できたか	4.529

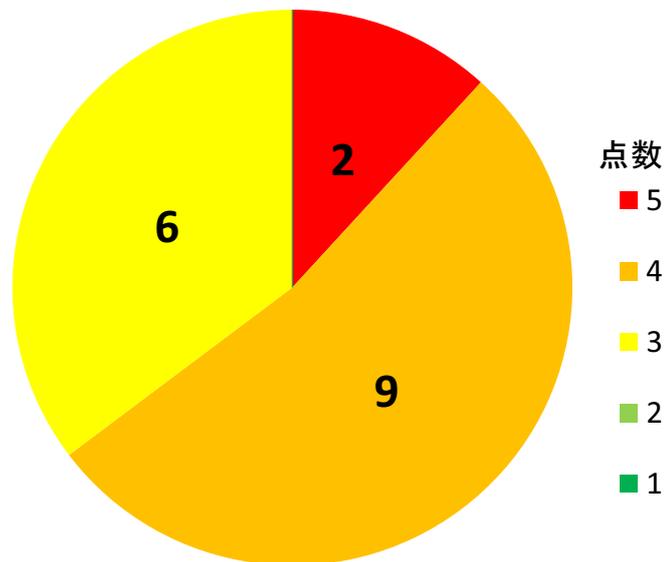


図 4.11: 思い通りに容器を操作し液体の移動ができたか (単位:人)

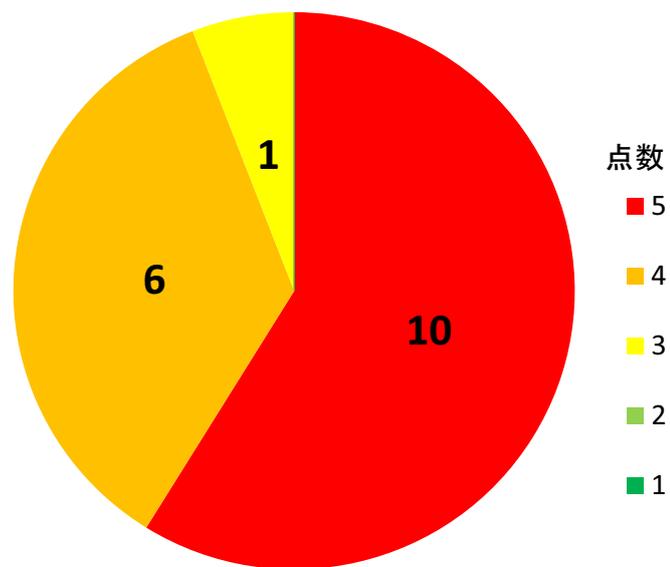


図 4.12: 液体のかき混ぜを思い通りに操作できたか (単位:人)

4.4.4 楽しさの結果についての検証

楽しさの評価結果を図 4.13 に示す．本節における 5 段階評価の目安は以下の通りとした．

5: とても楽しかった

4: それなりに楽しかった

3: 楽しかった

2: ほとんど楽しくなかった

1: まったく楽しくなかった

図 4.13 から分かるようにほとんどの児童から 5 点の評価が得ることができ，平均点は 4.882 であった．また「楽しく勉強できた」「教科書すなわち，文章や写真でしか習っていない実験ができて楽しかった」などの高い評価が自由記述欄からも得られた．実際の実験の様子を観察していたところ図 4.4 のように 1 人がシステムを利用している所に他の実験対象者が一緒に触ろうと近付いてきた場面もあり，本システムは十分に興味を持って触ってもらえることが伺える．

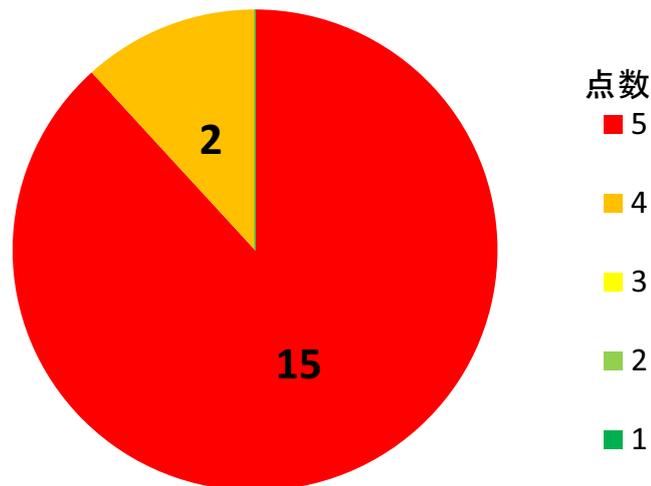


図 4.13: 実験全体を通してどれくらい楽しかったか (単位:人)

第5章 むすび

本論文では，当研究室で提案している粒子・体積に基づく仮想液体モデルをベースに開発してきている PC 版 VR 化学実験体験システムの教育機関や家庭での利用を考え，タブレット版 VR 化学実験体験システムを構築した．また，本システムの教育機関や一般家庭への普及を目指し教育効果の検証も行った．検証の結果を考察した所，本システムを用いることで十分な教育効果が得られることがわかった．また，タブレット版を構築する際に提案したタッチパネルを用いた容器移動およびかき混ぜ動作のインタフェースも有用であることもわかった．

一方でより良いシステムとするための改善すべき点も見つかった．以下にその改善すべき点を挙げる．

- 仮想物体から発生する気泡の表現

中和反応を観察する際，マグネシウム片を試薬に入れた実験を行うことがある．この時，マグネシウム片から気泡を発生させることでアルカリ性，中性，酸性の変化がより分かりやすくなり，操作者の「水溶液の性質」に対する理解がより深めることが考えられる．

- 仮想液体に投入された仮想物体を溶かす表現

「水溶液の性質」の単元では「水溶液には，金属を変化させるものがあること」を学ぶことも目的である．そこで1つ目の点と合わせて，仮想液体に投入された仮想物体が解けていく表現の実現が考えられる．

- タブレットの性能を考慮したシステム(プログラム)の改善

タブレット版を構築する際に簡略化および省略した部分の改善を行い，PC版で実装されている機能や，新たな機能をタブレット版でも実現する．

上記課題の解決を含め、教育機関や家庭で利用できるように VR 化学実験体験システムの体験型教育システムとしての完成を目指していきたい。

謝辞

研究を進めるにあたり，評価実験にご協力頂いた学習塾「学研なかよし教室」およびダンス教室「キッズ HipHop クラブ」の先生方，および小学生の皆様から心から感謝致します。また，本研究に対して御討論頂きました名古屋大学 安田考美 教授，金城大学 岩崎公弥子 准教授，名古屋市科学館主任学芸員 毛利勝廣さんをはじめとする研究グループの皆様および名古屋工業大学 伊藤宏隆 助教，中部大学 岩堀裕之 教授，名古屋工業大学 中村剛士 准教授，愛知教育大学 福井真二 准教授に深く感謝致します。最後に，本研究に多大なご協力を頂きました研究室諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝, 日本バーチャルリアリティ学会, “バーチャルリアリティ学”, 工業調査会, 東京, 2010 .
- [2] 松田國博, “バーチャルリアリティ 人工現実感と人間のかかわりを考える”, クバプロ, 東京, 1999 .
- [3] 富川盛雅, 橋爪誠, “バーチャルリアリティシミュレータを用いた内視鏡外科手術トレーニングシステム”, 日本外科学会雑誌, vol.112, no.4, pp.255-261, 2011 .
- [4] 濱田友貴, 鍵山善之, 黒田嘉弘, 井村政孝, 大城理, “回転骨切り術シミュレータにおける弾塑性体衝撃破壊の力覚提示法”, 映像情報メディア学会技術報告, vol.34, no.25, pp47-52, 2010 .
- [5] 須賀晶昭, 山田常圭, 阿部伸之, “VR 技術を用いた火災体験シミュレータ”fire cube”の開発”, フジタ技術研究報告, no.42, pp43-48, 2006 .
- [6] 片柳亮二, “AR・VR 航空機開発に必須なフライトシミュレータ”, 画像ラボ, vol.23, no.3, pp30-37, 2012 .
- [7] 墨屋直人, 水上嘉樹, 多田村克己, “ドライブシミュレータにおけるスリップ表現手法の研究: 積雪時の路面状態に基づく視野挙動の表現”, 研究会講演予稿, vol.264, pp161-166, 2013 .
- [8] 永田勝也, 小野田弘士, 切川卓也, 大川勝太, 吉岡英輔, “VR 技術を活用した体験型運転教育支援システムの開発について”, 廃棄物学会研究大会発表講演論文集, vol.18, pp79-79, 2007 .
- [9] Kohei Sato, Kenji Funahashi . “VR-Learning System: Virtual Cooking Training System”, Proc. e-CASE and e-Tech 2014, pp.967-993, 2014 .

- [10] Hiromasa Takahashi , Kenji Funahashi , “A Data Adjustment Method of Low-priced Data-glove based on Representative Hand Motion Using Medical Knowledge” , Proc. ICAT2013 (UFD; USB Flash Drive) , 2013 .
- [11] Haruo Shirane , Tomi Suzuki , “Inventing the Classics: Modernity , National Identity , and Japanese Literatur” , Stanford University Press , 2002 .
- [12] Margaret Mehl , “Private Academies of Chinese Learning in Meiji Japan: The Decline and Transformation of the Kangoku Juku” , Nordic Institute of Asian Studies , 2003 .
- [13] Benjamin Duke , “The History of Modern Japanese Education: Constructing the National School System, 1872-1890” , Rutgers University Press , 2009 .
- [14] 日本放送協会 , <https://www.nhk-book.co.jp/recommend/80-02anni/gogaku/>
- [15] D. Randy Garrison , “E-Learning in the 21st Century: A Framework for Research and Practice” , Routledge , 2011 .
- [16] Rita De Cassia Veiga Marriott , Patricia Lupion Torres , “Handbook of Research on E-Learning Methodologies for Language Acquisition” , Information Science Reference , 2008 .
- [17] 加藤潤 , “マルチメディアと教育” , 玉川大学出版部 , 1996
- [18] Kyosuke Uchiyama , Kenji Funahashi , “Tablet VR-Learning System: Chemical Laboratory Experience System” , Proc. SITIS2013 (Workshop on CIS) , pp.416-423 , Japan
- [19] Y. Natsume, A. Lindroos, H. Itoh and K. Funahashi , “The Virtual Chemical Laboratory Using Particle and Volume Based Liquid Model” , Proc. SCIS & ISIS 2010, pp.1354-1359, 2010.
- [20] M. Muller, S. Schirm, M. Teschner, “Interactive Blood Simulation for Virtual Surgery Based on Smoothed Particle Hydrodynamics” , ACM TechNology and Health Care, vol.12, no.1, pp.25-31, 2004.

- [21] Oh-young Song, Doyub Kim, Hyeong-Seok Ko , “Derivative Particles for Simulating Detailed Movements of Fluids”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.13, no4, pp.711-719, 2007.
- [22] Jun Chen, Kejian Yang, Yuan Yuan , “SPH-based visual simulation of fluid”, The 4th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE 2009), pp.690-693, Nanning, Chine, 2009.
- [23] C. Lacoursiere, M. Servin, K. Bodin, “Constraint Fluids”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.18, no.3, pp.516-526, 2012
- [24] 舟橋健司, 岩堀裕之, “仮想容器による仮想液体の対話操作モデルと一実現方法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, no.4, pp.1087-1094, 2000 .
- [25] K. FUNAHASHI, Y. IWAHORI , “Representation of Swinging Liquid on Virtual Liquid Manipulation”, Proc. ICAT2001, pp.179-184, 2001.
- [26] 長谷川聡, 佐原理, 長谷川旭, 田川隆博, 尾崎志津子, “タブレット端末の教育利用 - 名古屋文理大学における iPad 導入-”, ヒューマンインタフェース学会誌, vol.12, no.4, pp.245-252, 2010.
- [27] 文部科学省, <http://www.mext.go.jp/>
- [28] 夏目祐樹, 伊藤宏隆, 舟橋健司, “粒子・体積ベース仮想液体操作モデルにおける凹形状容器での液体操作の実現”, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会講演論文集, 3C1-6 (DVD-ROM), 2010 .
- [29] T. Tanabashi, H. Itoh, K. Funahashi and Y. Iwahori , “Representation of Wave Surface on Virtual Water Manipulation”, Proc. SCIS & ISIS 2008, pp.1460-1465, 2008.
- [30] 棚橋拓也, “対話性を重視した仮想液体操作モデルにおけるかき混ぜ動作の実現”, 平成 21 年度名古屋工業大学修士論文, 2010.
- [31] 蒲将寛, “粒子・体積モデルに基づく仮想液体操作システムにおける色の表現”, 平成 20 年度名古屋工業大学卒業研究論文, 2009.

- [32] 中井恒汰, “VR 化学実験システムのための仮想液体モデルにおける視点位置を考慮した側面描画”, 平成 25 年度名古屋工業大学卒業研究論文, 2014.
- [33] 夏目祐樹, “粒子・体積ベース仮想液体操作モデルにおける液体の流れの表現”, 平成 23 年度名古屋工業大学修士論文, 2012.
- [34] 宮下隼輔, “仮想液体操作モデルにおける鍵粒子と包絡面による落下液体表現”, 平成 24 年度名古屋工業大学修士論文, 2013.
- [35] 内山享佑, 舟橋健司, “VR 化学実験体験システムのためのタッチパネル 3D インタフェース”, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会講演論文集, pp.578-581, 2013
- [36] 文部科学省, “小学校理科の観察, 実験の手引き 第 6 学年 A(2) 水溶液の性質”, http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2012/01/12/1304649_25_1.pdf

発表論文リスト

1. 内山享佑, 舟橋健司, “VR 化学実験体験システムのためのタッチパネル 3D インタフェース”, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会講演論文集, pp.578-581, 2013
2. Kyosuke Uchiyama, Kenji Funahashi, “Tablet VR-Learning System: Chemical Laboratory Experience System”, Proc. SITIS2013 (Workshop on CIS), pp.416-423, Japan
3. 内山享佑, 中江裕介, 舟橋健司, “発表者を重畳表示するプレゼンテーション支援ソフトウェア”, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会講演論文集, pp.262-263, 2014