

2014年度 卒業論文

# 波形観測に基づく液体のバーチャル化

2015年2月16日

大阪大学 基礎工学部  
システム科学科 生物工学コース  
武村 浩志

主査: \_\_\_\_\_ 日付: \_\_\_\_\_

# 波形観測に基づく液体のバーチャル化

武村 浩志

## 概要

映画業界やゲーム業界といったCG(Computer Graphics)を多用する業界において、現実に即した流体シミュレーションを行うことは重要である。大規模な変形のある流体のシミュレーションを行うことは、格子を用いる方法では難しい。大規模な変形を扱う際に粒子法は有用である。粒子法では流体を粒子の集まりとして表現する。粒子法で主に用いられている手法としてSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法があるが、SPH法ではパラメータの設定の際に、単に既知の物理量を使用するだけでは、正しく対象を模擬することができない。

本論文では、現実の液体の表面形状とSPH法によるシミュレーションでの表面形状とを比較することで、実際の液体の挙動を再現するために最も適したパラメータの一部を推定し、現実の液体をバーチャル化するシステムについて述べる。本システムでは、まず、液体が入った水槽を左右に揺らし、その様子を水槽の側面からカメラで動画撮影する。撮影された動画から、画像処理を用いて水槽内の液体の表面形状の時系列データを取得する。次に、液体の撮影時と同様の環境下におけるSPH法のシミュレーションを、粘性係数と静止密度に対応するパラメータの値を様々に変化させて行う。最後に、計測した表面形状の時系列データと、シミュレーションから得られる表面形状の時系列データを比較して、水面形状が最も合致する場合の粘性係数と静止密度に対応するパラメータを得る。得られたパラメータを用いて粒子法を用いた流体シミュレーションを行うことで、液体をバーチャル化することが可能であり、現実にある液体を用いて、例えば現実では再現できないような、計測時以外の様々な条件下でシミュレーションを行うことができる。

水槽内の実際の液体の表面形状の時間変化を、水槽の側面から撮影した動画に対し、ボックスフィルタを施した後、Canny法を用いて輪郭を検出することで計測した。また、SPH法によるシミュレーションを行うプログラムを作製し、表面に存在する粒子の座標を用いることで、シミュレーションで表現された液体から表面形状の時間変化を取得した。本システムを用いることで、水とサラダ油に対して、100種類のパラメータから表面形状の時間変化が最も合致するパラメータを得られた。また、得られたパラメータを用いて、水柱の崩壊現象のシミュレーションを行った結果、水とサラダ油で挙動の違いを確認できた。

キーワード：CG, パラメータ推定, 形状計測, SPH法, 画像処理.

# Virtualization of Liquid Based on Waveform Observation

Hiroshi Takemura

## Abstract

In the movie and game industries that often use CGs(Computer Graphics), the realistic fluid simulation is important. In the method of fluid simulation, a particle method is useful especially for simulating the highly deformed fluid that is difficult to simulate with a lattice method. In a particle method, fluid is described as particles. A SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)-based method is one of the most famous particle methods, but when the parameters of a SPH-based method are just specified based on the physical constants, the fluid is not accurately simulated with a SPH-based method.

This paper proposes a system for virtualizing the real liquid by estimating the several suited parameters in a SPH-based method to simulate accurately the behavior of that liquid. To make liquid virtualized, this system compares the surface profile of the real liquid with that of the liquid simulated based on SPH. In the system, firstly, the movie of the behavior of the liquid from a side view is taken with the camera and the time-series data of the liquid surface profile are obtained from the movie by image processing. Secondly, the fluid is simulated with the SPH-based method varying parameters which describe the viscosity and the rest density in the same environment to the real measurement. Finally, the suited parameters are obtained by comparing the liquid surface profile of the real liquid with that of the liquid simulated with the SPH-based method. Fluid simulation with the suited parameters can make the liquid virtualize, and the real liquid can be simulated in the various situations, for example, the case that the liquid movement is hardly followed with the physical law.

The time-series data of the real liquid surface profile are obtained from the movie taken from a side view by box filter and Canny edge detector. The author makes the SPH-based simulation program and the time-series data of the liquid surface profile in simulation are obtained by the particles' positions on the surface. With the system, the suited parameters for water and salad oil are selected among the 100 types of parameters. The author simulates the dam-break with the obtained parameters, and demonstrating the difference of behavior between water and salad oil.

**Keywords:** CG, parameters estimation, shape measurement, SPH, image processing

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	液体のバーチャル化	3
2.1	流体シミュレーション	3
2.2	シミュレーションと現実との整合	7
2.3	液体の表面形状の計測	10
2.4	本システムで用いる方法	11
第3章	液体のバーチャル化システム	12
3.1	システム概要	12
3.2	SPH法によるシミュレーション	13
3.3	液体の表面形状計測	15
3.4	シミュレーション結果からの表面形状抽出	16
3.5	表面形状の比較	18
第4章	システムの実装と結果	20
4.1	水槽を揺らすためのトレッドミルの制御	20
4.2	液体の表面形状の動画撮影	21
4.3	撮影された動画からの液体の表面形状データの取得	24
4.4	SPH法のシミュレーション環境	25
4.5	表面形状の比較	25
4.6	推定したパラメータを用いた液体のバーチャル化	29
4.7	考察	29
第5章	おわりに	31
	謝辞	32
	参考文献	33

# 目次

1.1	液体のバーチャル化	2
2.1	2次元でのスタガード格子	4
2.2	矩形構造格子	4
2.3	曲線構造格子	5
2.4	粒子法	5
2.5	顔の筋肉モデルに対するパラメータ決定	8
2.6	髪の毛の動きの推定とレンダリング	8
2.7	布の質感をマイクロ X 線 CT 画像を用いて再現する処理の流れ	9
2.8	自然に繰り返し再生できる水面の動画の例	9
2.9	CT アルゴリズムで再構成された拡散する流体	10
2.10	カラーパターン投影による水面形状計測	10
3.1	システムの概要図	12
3.2	流体の表面形状計測環境の模式図	16
3.3	撮影された動画の模式図と座標系の定義	16
3.4	シミュレーション結果の模式図と座標系	17
4.1	Bertec 社のトレッドミル	20
4.2	水面形状を計測するための装置	21
4.3	CASIO 社のカメラ EX-FH20	22
4.4	使用した水槽	22
4.5	水槽の大きさと液体の体積	22
4.6	背景板	22
4.7	使用したライト	23
4.8	撮影された動画	23
4.9	画像処理の各過程の結果	24
4.10	液体の表面形状を抽出した結果	24
4.11	各パラメータにおける $E_l$ の値 (水)	26
4.12	各パラメータにおける $E_l$ の値 (サラダ油)	26

4.13 シミュレーション結果と実際の液体 (水) . . . . .	27
4.14 シミュレーション結果と実際の液体 (サラダ油) . . . . .	28
4.15 水柱の崩壊現象のシミュレーション結果 . . . . .	29

# 表 目 次

2.1	粒子法のまとめ . . . . .	6
4.1	トレッドミルの仕様 . . . . .	20
4.2	カメラの設定 . . . . .	22
4.3	SPH 法のシミュレーション実行環境 . . . . .	25
4.4	SPH 法シミュレーションにおけるパラメータの値 . . . . .	25
4.5	静止密度と粘度の変化する範囲と変化量 . . . . .	25
4.6	得られた最適なパラメータ . . . . .	27
4.7	室温 20 °C での水と油の密度と粘度 . . . . .	29

# 第1章 はじめに

コンピュータの性能の向上は近年目覚ましく、コンピュータシミュレーションは様々な分野で行われるようになった。コンピュータシミュレーションを用いることで、現実では困難な条件における実験を行うことが可能であり、さらに実験では計測することが困難な情報も簡便に得ることが可能である。例えば、地震や津波のシミュレーション [1] や、都市部での災害時における避難シミュレーション [2] などが行われている。また、コンピュータシミュレーションにより、物理などの科学を直感的に理解すること [3] や、手術シミュレータを用いることで手術練習を行うことが可能である [4] ため、コンピュータシミュレーションは教育分野でも利用されている [5]。CG(Computer Graphics) の分野においても、CG を用いたアニメーションやコンピュータゲームでの物体の挙動が、現実的となるよう、コンピュータシミュレーションの技術が応用されている [6]。しかし、コンピュータシミュレーションでは離散的な演算しか行うことができず、流体といったマクロな視点では連続的な物体に関する現象のシミュレーションを、厳密に演算することは難しい。現実を則した流体シミュレーションを行うことは重要である。

コンピュータシミュレーションの中でも、流体が対象の場合、支配方程式である Navier-Stokes 方程式が複雑な偏微分方程式であるため、現実を即したシミュレーションを行うことは非常に困難である。流体シミュレーションは長い間研究されており、非圧縮性流体に対して、格子を用いた方法として、差分法、有限体積法、有限要素法などが開発されている [7, 8]。しかし格子を用いた方法では流体の大規模な変形を模擬することは難しい。近年、流体シミュレーションを行う手法として、格子を用いない粒子法が登場し、盛んに研究されている。粒子法は、流体を粒子の集まりと見なし、粒子同士の近接作用を計算することにより、流体シミュレーションを行う手法である。粒子法は、流体の大規模な変形を模擬することができる点で、格子を用いる方法よりも有用である [9]。

粒子法として主に用いられる手法に、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 法がある。SPH 法は宇宙物理学の問題を解くために開発された手法であり [10, 11]、各粒子に物理量を持たせることで、物理量を離散化し、核関数を用いて粒子間の物理量を補間する手法である。SPH 法は圧縮性非粘性流体のシミュレーション手法として開発された手法であるが、制約条件を追加することで水のような非圧縮性粘性流体のシミュレーションを行うことができる [12]。SPH 法では、制約条件を追加すると、パラメータに単に既知の物理量を代入するだけでは、対象の挙動を正確に再現することができないという問題点があり、パラメータの

設定には困難さが伴う。

本研究では、図 1.1 に示すような、現実の液体の表面形状の変化を模擬することができる粘性係数と静止密度に相当する SPH 法のパラメータを推定することで、現実と同じ性質をもつバーチャル空間での液体を取得できるシステムを構築することを目的とする。本システムでは、まず、実際の液体を水槽に入れ、水槽を左右に揺らした時の表面形状の時間変化を計測する。次に、SPH 法を用いたシミュレーションを、水槽の揺らし方や水量は撮影時と同じ条件で、粘性係数と静止密度に相当するパラメータを様々に変化させて行う。最後に、実際の液体の表面形状とシミュレーション結果における表面形状を比較して、最も合致したシミュレーション結果でのパラメータを求める。求めたパラメータを使用することで、現実の液体をバーチャル化することができる。すなわち、現実では困難な条件を含む、計測時の条件以外の様々なバーチャル空間で、計測した液体を用いた CG を取得することができる。

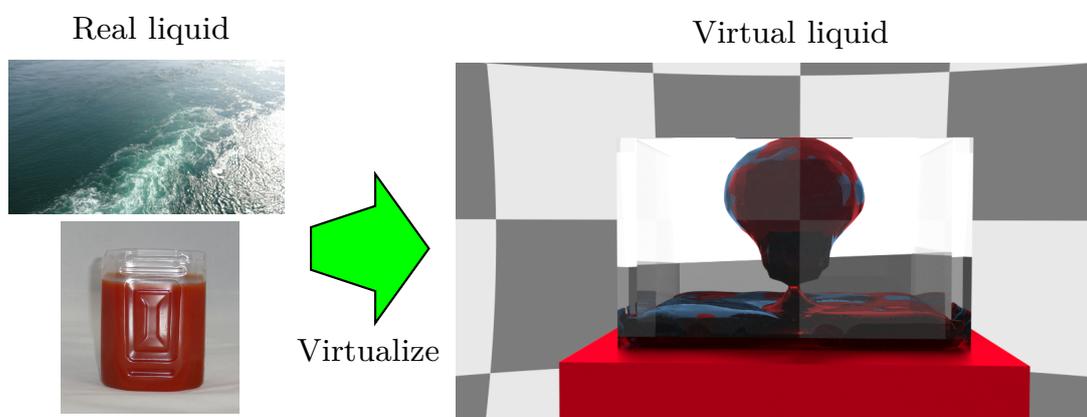


図 1.1: 液体のバーチャル化

## 第2章 液体のバーチャル化

本章では，本システムに必要な流体シミュレーション，シミュレーションと現実との整合，液面の計測に関する関連研究を示す．

### 2.1 流体シミュレーション

流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式を離散化して流体シミュレーションを行う方法は，流体を格子で区切ってシミュレーションを行う格子法と，流体を粒子の集まりとしてシミュレーションを行う粒子法に大別できる．

#### 2.1.1 流体の定義・支配方程式

流体とは液体や気体といった自由に変形できる物質であり，水や煙などが流体の例として挙げられる．流体には，水や油といったせん断応力が速度勾配に比例するニュートン流体と，粘土やアスファルトといったせん断応力が速度勾配に比例しない非ニュートン流体が存在する．また，外力により体積が変化する圧縮性流体と，体積が変化しない非圧縮性流体が存在する [13]．本論文で扱う流体は，非圧縮性ニュートン流体であるため，以降で述べる流体は，特に指定がない限り非圧縮性ニュートン流体を指す．

流体は物理量として，密度  $\rho$ ，圧力  $p$ ，速度  $\mathbf{v}$  をもつ．流体の支配方程式は，式 (2.1)，(2.2) に示す質量保存則と Navier-Stokes 方程式である [14]．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{f}_{\text{ext}} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2.2)$$

ここで， $\mu$  は粘度， $\mathbf{f}_{\text{ext}}$  は単位体積あたりの外力， $t$  は時刻を示す．本研究で考える流体は非圧縮性であるため，式 (2.1) は

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.3)$$

と表される．また，静止した流体の密度を静止密度と呼び，非圧縮性流体は，密度が常に静止密度と一致するよう変形する．

### 2.1.2 格子法

シミュレーションを行う領域を計算格子で区切り、各格子に変数を配置することにより、流体シミュレーションを行う手法は、後述する粒子法と比較して、格子法と呼ばれる [9].

非圧縮性流体のシミュレーション方法のうち、代表的な差分法として、MAC(Marker And Cell) 法が挙げられる。MAC 法では格子で囲まれた領域をセルと呼び、図 2.1 に示すスタガード格子が用いられる。スタガード格子では、図 2.1 に示す通り、流体の物理量のうち、圧力を格子のセル中心に、セル境界に流速ベクトル成分のうちセル境界と直交する成分を配置する。スタガード格子を用いることで、スカラー変数の移流項の保存性が用意に保持でき、また圧力や流速の数値振動を有効に防ぐことができる。

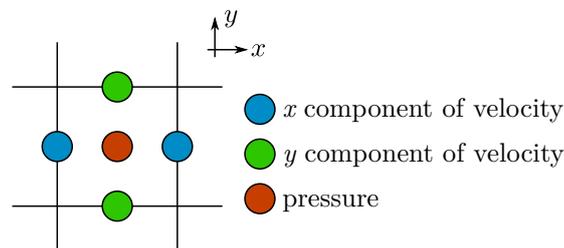


図 2.1: 2次元でのスタガード格子

MAC 法では、セルにおける物理量の流出入をセル境界で計算する。また、圧力のポアソン方程式を解くことで、質量保存則が陰的に満たされる。MAC 法は現在、SMAC(Simplified MAC) 法, SOLA(SOLution Algorithm) 法へと進化し利用されている。MAC 法では、図 2.2 に示す矩形の構造格子を用いる方法であるため、複雑な形状の領域でのシミュレーションには適していない。

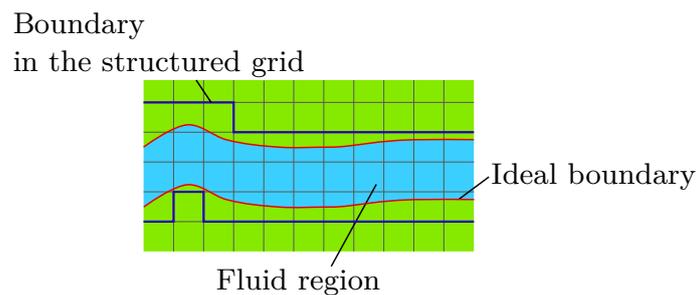


図 2.2: 矩形構造格子

複雑な形状の領域における非圧縮性流体のシミュレーション手法として、SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 法といった有限体積法がある。有限体積法では、スタガード格子を用いると、計算空間での支配方程式が非常に複雑になることが判明しており、スタガード格子を用いず、圧力と流速を同じセル中心に配置し、補助変数とし

て流束をセル境界に配置する方法が用いられている。この方法では、格子は任意の形状を用いることができる [7]。故に有限体積法では、図 2.3 に示す曲線構造格子を用いてシミュレーションを行う領域を区切ることが多い。また、有限体積法と同様に、任意の形状に対して流体シミュレーションを行うことができる方法として、有限要素法がある。有限要素法では、領域を有限個の要素に分解し、微分方程式を数値計算する。ただし、微分方程式自体を離散化せず、積分形を用いる。計算精度は有限体積法よりも高いが、領域の形状の影響の反映能力は劣っている [14]。

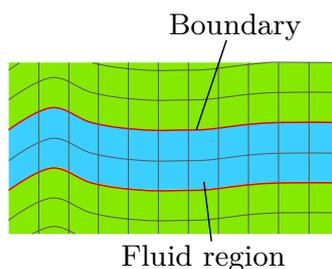


図 2.3: 曲線構造格子

格子法の問題点として、計算精度と計算時間が均衡する格子幅を設定することは難しく、格子の生成に多大な労力が必要な点が挙げられる [7]。また、シミュレーション領域が格子を生成した領域に限定されるため、領域が混合する混相流や、領域をはみ出す可能性のある大変形といったシミュレーションを格子法で行うことは難しい点も挙げられる [9]。

### 2.1.3 粒子法

図 2.4 で示すようにシミュレーション対象である流体を粒子を用いて表し、各粒子に物理量を配置することにより流体シミュレーションを行う手法は、粒子法と呼ばれる [9]。粒子法のシミュレーション手法として主に SPH 法と MPS(Moving Particle Semi-implicit) 法が挙げられる。

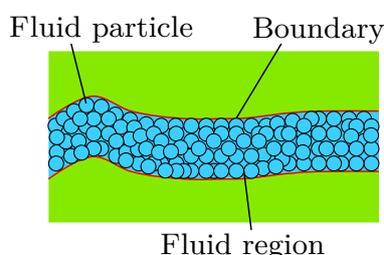


図 2.4: 粒子法

SPH 法 [15] は、各粒子に変数を持たせることにより離散化し、核関数を用いることで粒子

間の物理量を補完する手法である。SPH法は、宇宙物理学における問題を解くためのシミュレーション手法として開発された粒子法であり [10, 11], 液体のような非圧縮性粘性流体のシミュレーションを行うことも、制約条件を追加することで可能である [12]。厳密に非圧縮性を保証するためには、制約条件としてポアソン方程式を導入し、半陰的にシミュレーションを行えばよいが、計算コストが増大し、実時間でシミュレーションを行うことが難しくなる。計算コストを下げるため、非圧縮性を近似的に保証する制約条件を追加することで、陽的にシミュレーションを行うことがSPH法では多い。しかし、近似的な制約条件であるため、パラメータを適切に設定しなければ、安定したシミュレーションを行うことが難しくなる。また、粘性に関しては擬似的に再現しているため、パラメータを現実の流体の物性値として設定しても、現実の流体と同じ粘性を持つ流体とならないことがある。SPH法における非圧縮性を高めるために制約条件を修正したWCSPH(Weakly Compressible SPH)法 [16]が存在するが、時間の刻み幅を、状態方程式に基づいて圧力を計算するDesbrunの方法 [17]で設定できる最大値よりも短くしなければならず、計算コストが高くなっている。この時間の刻み幅が短いという問題点を克服するため、SPH法における非圧縮性の近似による密度の偏りを時々刻々と修正する処理を加えたPCISPH(Predictive-Corrective Incompressible SPH)法 [18]が存在する。最近では、Position Based Dynamics[19]に基づいた修正処理を導入し計算速度を向上させたSPH法の派生方法であるPBF(Position Based Fluids)法 [20]も存在する。

MPS法 [21] は、重み関数を用いた粒子間相互作用モデルを用いることで各粒子が持つ物理量を計算し、流体シミュレーションを行う手法である。MPS法は非圧縮性を保証するためにポアソン方程式を用いて半陰的にシミュレーションを行うため、計算コストが高いが、シミュレーションの精度は高い。SPH法はゲームなどの実時間シミュレーションが必要なCG分野において頻繁に用いられているが、MPS法は実時間性を問題とせず、精度の高い演算が必要な土木関係のシミュレーションで多く用いられている。以上に示した粒子法について、表 2.1 にまとめる。

表 2.1: 粒子法のまとめ

方法	計算コスト	非圧縮性	計算精度
SPH法	低	低	低
WCSPH法	高	中	中
PCISPH法	中	高	高
PBF法	中	高	高
MPS法	高	非圧縮	高

シミュレーション環境を構築する際に、格子法では格子の生成に多大な労力が必要であるが、粒子法では、粒子を配置するだけよいため、格子法よりも簡便である。また、混相流や大変形を伴うシミュレーションといった、格子法では難しいシミュレーションを、粒子法では容易に行うことが可能である [9]。しかし、粒子法では核関数や重み関数が等方的であるため、格子法では可能な特定の方向のみに精度を上げることができず、精度を上げようとすると、全方向に粒子数を増やすことになり、計算コストが格子法に比べより増大する。規模が大きくなると計算コストの影響は顕著となるが、領域毎に粒子の大きさを変えることで計算コストを下げる方法 [22] や、GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) を用いて並列に計算をすることで、計算時間を短縮する方法などが研究されている [23, 24]。

本研究では、現実の流体とシミュレーションを比較することにより、粒子法における最適なパラメータを求めることで、計算精度が低い方法を用いた場合でも、シミュレーション内の流体の挙動を現実の挙動と整合させる。

## 2.2 シミュレーションと現実との整合

シミュレーション結果を現実と整合させる研究では、物理的挙動を整合させる場合と質感・形を整合させる場合がある。流体以外では、筋肉の物理的挙動を現実と整合させる研究や、髪や布の質感・形を整合させる研究などが行われている。流体関連では、形を計測する研究は存在するが、現実と整合させる研究は見られない。

## 2.2.1 流体以外の対象での研究

### 物理的挙動を整合させる研究

Sifakis らは顔の運動や変形に関して、図 2.5(a) に示す顔の筋肉モデルを作製し、実際の顔の形状変化に基づいて、顔の筋肉の性質に関連するパラメータを決定している [25]。実際の顔の形状変化をモーションキャプチャマーカを用いて計測し、その変化と顔の筋肉モデルを用いたシミュレーションでの変化とが一致するパラメータを求めている。結果、実際の顔の挙動範囲内で、顔の運動のシミュレーション結果を運動学的に現実と整合させることを実現している。

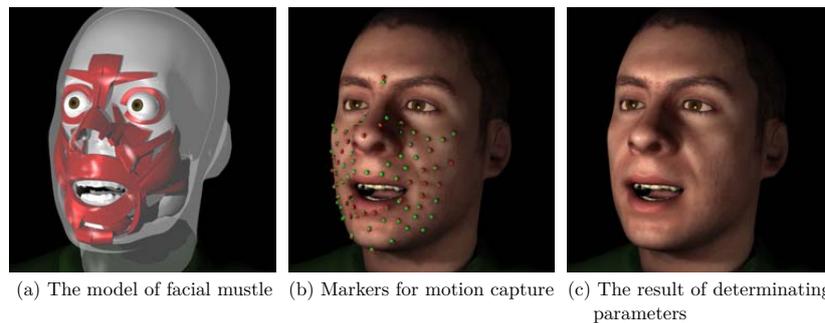


図 2.5: 顔の筋肉モデルに対するパラメータ決定 [25]

Xu らは、図 2.6 に示すように、髪の毛の動きを撮影し、その映像を基に髪の毛の動きを推定し、推定した結果を CG で描画している [26]。髪の毛の動きを時空間的に取得し、取得した時空間画像から、髪の毛の時間的な動きを推定した後、髪の毛のモデルを推定した時間的な動きに基づいて動かすことで、現実味のある髪の毛の動きを CG 内で再現できている。しかし、複雑な髪の毛の動きに対しては、実際よりも複雑でない動きとして推定してしまうという欠点がある。

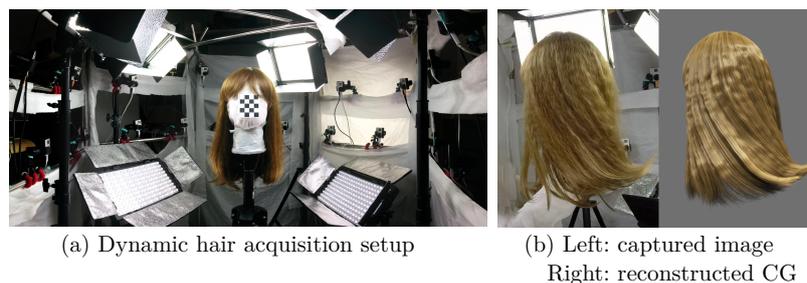


図 2.6: 髪の毛の動きの推定とレンダリング [26]

### 質感を整合させる研究

Zhao らは、布の質感の現実感を高めるため、布のマイクロ X 線 CT 画像を用いている [27]。彼らはベルベットのような複雑な素材の布をマイクロ X 線で撮影することで得られる

図 2.7(a) に示すような X 線 CT 画像に基づいて，図 2.7(b) に示す布の密度分布と繊維方向を得る．その後，実際の写真の質感とレンダリングを行った CG の質感を統計学的に比較し，CG の光学的なパラメータを図 2.7(c) のように決定している．決定したパラメータを用いて，布をレンダリングした結果を図 2.7(d) に示す．シルク生地，ベルベット，フェルト，ウールの織物で実験した結果，物理的に自然な CG を描くことを実現している．ただし，金属繊維などは，X 線 CT 撮影機のダイナミックレンジの問題で，X 線 CT 画像を撮影する際に問題がある可能性がある．

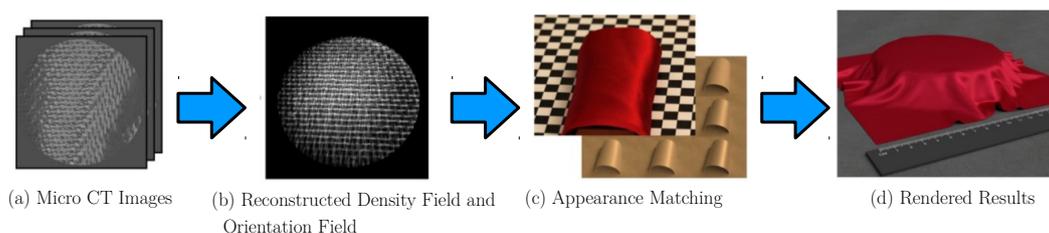


図 2.7: 布の質感をマイクロ X 線 CT 画像を用いて再現する処理の流れ [27]

## 2.2.2 流体での研究

流体においては，シミュレーション結果を現実と整合させる研究は見られないが，実際の流体の質感・形を計測する研究がある．

グラフィック理論を用いて，水面の動画を自然に繰り返し再生する例が，Kwatra らにより示されている [28]．図 2.8 に動画の例を示す．自然に繰り返し再生できる動画をテクスチャとしてメッシュに貼れば，水面の質感を再現できる．しかし，液体の形状が変形するといった，動画とは大きく異なる挙動には適用することが難しい．

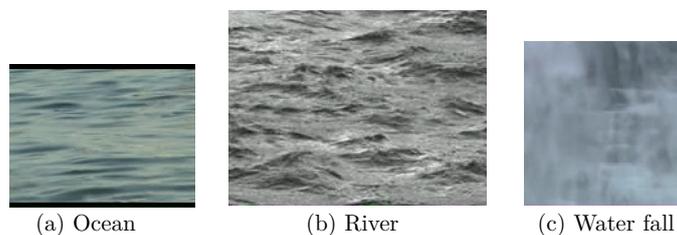


図 2.8: 自然に繰り返し再生できる水面の動画の例 [28]

形を整合させる研究として、Gregson らはストロボを同期した複数のカメラを用いて、流体の拡散を撮影し、撮影された複数の動画に対してランダム・ウォークに基づく CT 再構成アルゴリズムを適用し、拡散する流体の 3 次元構造を再構成している [29]。図 2.9 に撮影環境と結果を示す。

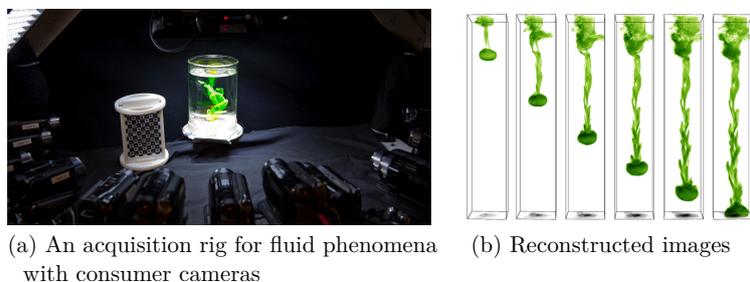


図 2.9: CT アルゴリズムで再構成された拡散する流体 [29]

## 2.3 液体の表面形状の計測

三戸部らは、図 2.10(a) に示す通り、石灰粉で白濁した水面へカラーパターンをプロジェクタを用いて投影し、カラーパターンが投影された水面をカメラで撮影することで、カラーパターンの歪みから水面形状を 3 次元的に計測している。結果の一例を図 2.10(b) に示す。透明な壁付近ではカラーパターンが透過・屈折するため計測できないが、壁付近以外では矛盾のない水面形状が計測できている [30]。

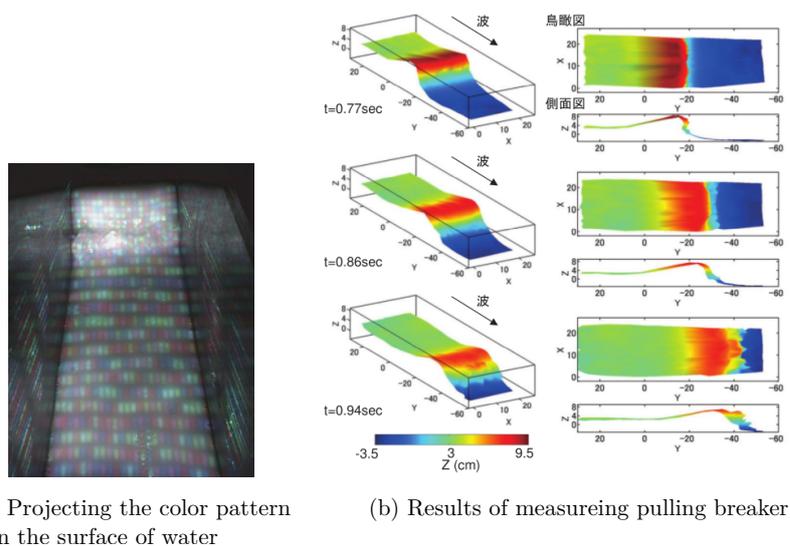


図 2.10: カラーパターン投影による水面形状計測 [30]

## 2.4 本システムで用いる方法

液体のバーチャル化に必要な要素は、流体シミュレーション、シミュレーションと現実との整合方法、液体の表面形状の計測である。流体シミュレーション方法としては、CG分野で頻繁に使用されている SPH 法 [12] を用いる。シミュレーションと現実との整合方法としては、液体の表面形状の時間変化の一致具合を用いて、シミュレーション結果と現実を定量的に比較する。また、本システムでは液体が入った水槽を 1 方向のみに動かすため、水槽内の液体の表面形状の特徴は側面からのみで全て計測可能である。したがって、液体の表面形状変化は、文献 [30] のように 3 次元計測せず、水槽側面を撮影した動画に画像処理を施すことにより計測する。

# 第3章 液体のバーチャル化システム

本章では、シミュレーション内における液体の挙動を、現実の液体の挙動と整合させることで、液体をバーチャル化することができるシステムについて述べる。

## 3.1 システム概要

システムの概要を図 3.1 に示す。

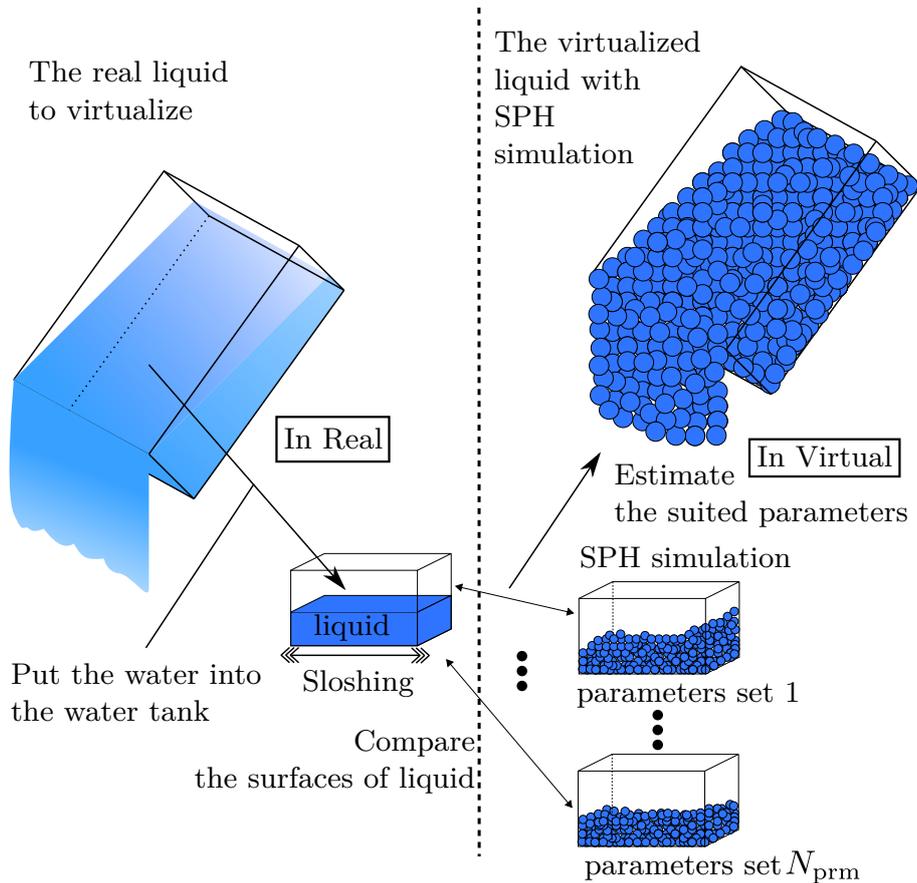


図 3.1: システムの概要図

本システムでは、まず、バーチャル化したい液体を水槽に入れ、水槽を左右に揺らした際の液体の表面形状の変化を、側面よりカメラで動画撮影する。水槽を左右に揺らした際の、水槽の速度も取得する。

次に、動画撮影した時と同じ条件、つまり動画撮影した際に用いた水槽と同じ大きさで、かつ液体の量も同じであり、水槽を動画撮影の際に取得した実際の動きのデータに基づいて揺らす条件で、粘度と密度に相当するパラメータを様々に変化させて SPH 法を用いたシミュレーションを行う。

最後に、様々なパラメータを用いて行われたシミュレーション結果の中から、表面形状の時間変化が、実際に撮影した動画と最も一致する結果を選ぶ。その結果でのパラメータを現実の液体を再現するために適しているとする。表面形状の比較では、水槽の底からの液体の表面の高さの差を、現実とシミュレーション間で求め、その差の二乗和が最も小さい時、表面形状が最も一致したとみなす。得られたパラメータを用いることにより、水槽に入れた現実の液体と同じ挙動を示すバーチャルな液体が得られる。

### 3.2 SPH 法によるシミュレーション

本システムでは、流体シミュレーションを行う方法として、粒子法である SPH 法を用いる [12].

SPH 法では、流体を粒子の集まりとして離散化し、核関数  $W(\mathbf{r}, h)$  を用いて粒子間の物理量を補完する。  $j$  番目の粒子は、質量  $m_j$ 、位置  $\mathbf{r}_j$ 、密度  $\rho_j$ 、速度  $\mathbf{u}_j$  を持つとする。位置  $\mathbf{r}$  での物理量  $A(\mathbf{r})$  は核関数  $W(\mathbf{r}, h)$  を用いて、

$$A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.1)$$

と計算できる。核関数  $W(\mathbf{r}, h)$  は  $r = |\mathbf{r}|$  とすると、  $0 \leq r \leq h$  の範囲のみ値をもち、それ以外では 0 である。また、核関数は正規化されており、

$$\int_{\Omega} W(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1, \quad \Omega = \{\mathbf{r} \mid 0 \leq |\mathbf{r}| \leq h\} \quad (3.2)$$

を満たす。SPH 法では、物理量の空間微分を、式 (3.3), (3.4) に示す通り、核関数の空間微分により計算することができる。

$$\nabla A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.3)$$

$$\nabla^2 A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.4)$$

流体の支配方程式は、式 (3.5), (3.6) で示す、質量保存則と Navier-Stokes 方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{f}_{\text{ext}} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3.6)$$

$\mathbf{f}_{\text{ext}}$  は単位体積あたりの外力， $\mu$  は流体の粘度である．SPH 法では，粒子の数は一定であり，各粒子の質量も一定であるから，質量保存則 (3.5) は常に満たされる．また，粒子法ではラグランジュ的方法を採用するため，式 (3.6) の移流項  $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$  は必要ない．故に， $i$  番目の粒子について解くべき方程式は式 (3.7) および (3.8) となる．

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{f}_i}{\rho_i} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{f}_i = \mu \nabla^2 \mathbf{v}_i - \nabla p_i + \rho_i \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (3.8)$$

方程式 (3.7) および (3.8) を全ての粒子について解けば，流体シミュレーションを行うことができる．

**近傍探索** 核関数の性質から，式 (3.1) を用いて粒子の物理量を計算する際には，その粒子から半径  $h$  内の粒子との相互作用のみを計算すればよい．計算量を減少させるためには，先に近傍粒子を探し近傍マップに保存しておく手法が有用である．近傍粒子の探索方法として，等間隔格子を使用する方法を用いる．この方法は，空間を等間隔格子で分割し，各粒子がどの区画にいるかを示す値を近傍マップに保存しておく．この値から，現在注目している粒子の近傍の格子に存在する粒子を選別し，選別された粒子のみを用いて，式 (3.1) を計算する．

**密度の計算**  $i$  番目の粒子が持つ密度は，式 (3.1) により，式 (3.9) と計算される．

$$\rho_i = \rho(\mathbf{r}_i) = \sum_j m_j W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.9)$$

**圧力項の計算**  $i$  番目の粒子が受ける力について，圧力項  $\mathbf{f}_i^{\text{prs}} = -\nabla p(\mathbf{r}_i)$  は，式 (3.3) によると，式 (3.10) と計算される．

$$\mathbf{f}_i^{\text{prs}} = -\sum_j m_j \frac{p_j}{\rho_j} \nabla W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.10)$$

しかし，式 (3.10) では粒子間で力が非対称になってしまうため，SPH 法では，圧力は式 (3.11) と計算する．

$$\mathbf{f}_i^{\text{prs}} = -\sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.11)$$

各粒子の圧力は，理想気体の状態方程式により， $C$  を温度に依存する気体定数とすると，

$$p = C\rho \quad (3.12)$$

と計算できるが，SPH 法では，Desbrun によって提案された，

$$p = C(\rho - \rho_0) \quad (3.13)$$

を用いる [17]．ここで， $\rho_0$  は静止密度であり，シミュレーション対象の流体の密度である．

粘性項の計算  $i$  番目の粒子が受ける力について，粘性項  $\mathbf{f}_i^{\text{vis}} = \mu \nabla^2 \mathbf{v}(\mathbf{r}_i)$  については，式 (3.4) によると，式 (3.14) と計算される．

$$\mathbf{f}_i^{\text{vis}} = \mu \sum_j m_j \frac{\mathbf{v}_j}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.14)$$

しかし，圧力項と同様の理由により，SPH 法では粘性項は式 (3.15) と計算する．

$$\mathbf{f}_i^{\text{vis}} = \mu \sum_j m_j \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \quad (3.15)$$

核関数 圧力項を計算する際は，式 (3.16) に示す Desbrun の Spiky 核関数を用いる．

$$W_{\text{spiky}}(\mathbf{r}, h) = \frac{15}{\pi h^6} \begin{cases} (h-r)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.16)$$

粘性項を計算する際は，式 (3.17) に示す核関数を用いる．

$$W_{\text{vis}}(\mathbf{r}, h) = \frac{15}{2\pi h^3} \begin{cases} -\frac{r^3}{2h^3} + \frac{r^2}{h^2} + \frac{h}{2r} - 1 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.17)$$

圧力項と粘性項の計算以外では，式 (3.18) に示す Poly6 核関数を用いる．

$$W_{\text{poly6}}(\mathbf{r}, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - r^2)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

境界の扱い SPH 法での水槽の壁などといった境界の扱い方として，壁を表現する粒子を配置する方法がある．壁を表す粒子を壁粒子と呼ぶ．壁粒子は，流体を表す粒子と同様に，質量，位置，密度，速度を持ち，各粒子の密度や圧力は，流体粒子と同様に式 (3.9)，(3.13) で計算されるが，位置の更新は，Navier-Stokes 方程式に基づいて行わず，壁の動きに合わせて位置を更新する．

### 3.3 液体の表面形状計測

計測する液体は，水槽に入れられており，計測中は，水槽が左右に揺らされている．揺らされている水槽内の液体について，図 3.2 のように暗室で流体の表面を照光することで，流体の表面を白く強調することができる．この白く強調された表面を水平方向からカメラを用いて動画撮影する．なお，水槽を揺らす方向は，図 3.2 での紙面に対して垂直な方向である．

撮影された動画に対して，液体の表面が存在する範囲を手動で選択する．選択した範囲内で，動画の各フレームに対してボックスフィルタを施した後，Canny 法 [31] を用いて輪郭を検出する．検出された輪郭を液体の表面とし，その表面上から， $N_{\text{msr}}$  個の点の座標を水槽内

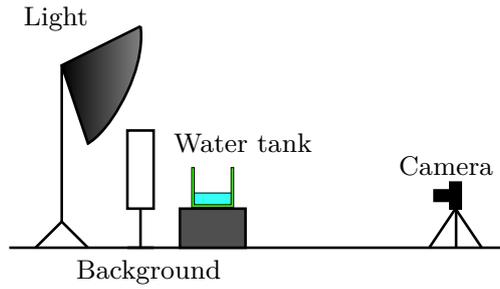


図 3.2: 流体の表面形状計測環境の模式図

で図 3.3 のように等間隔で取得する．水槽を揺らす方向に  $x$  軸を，鉛直上向き方向に  $y$  軸を  
 図 3.3 に示す通り設定し，取得した点の座標を  $(x_1^{\text{msr}}, y_1^{\text{msr}}), (x_2^{\text{msr}}, y_2^{\text{msr}}), \dots, (x_{N_{\text{msr}}}^{\text{msr}}, y_{N_{\text{msr}}}^{\text{msr}})$   
 とする．ただし，座標系は水槽とともに動かず固定されている．液体の表面形状を表す点の  
 うち，取得に失敗した点が存在した場合は，左右それぞれの方向で最も近い，取得に成功し  
 た 2 点を用いて線形補間する．

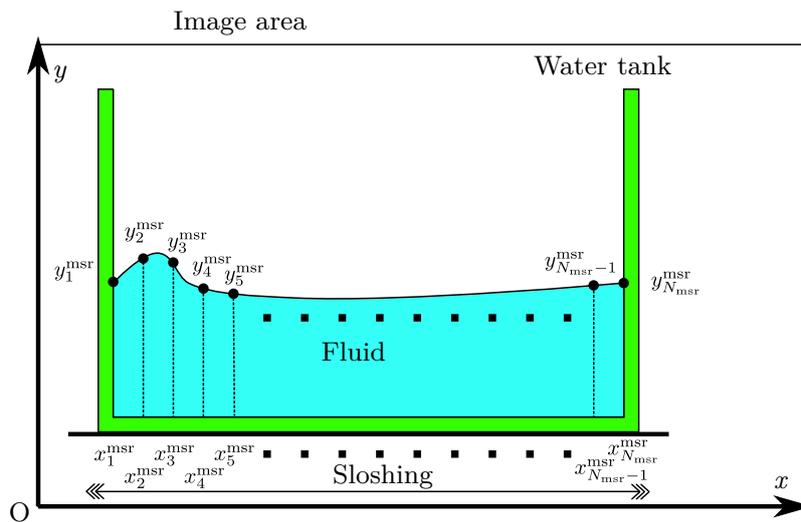


図 3.3: 撮影された動画の模式図と座標系の定義

### 3.4 シミュレーション結果からの表面形状抽出

シミュレーション結果からの表面形状抽出方法を示す．シミュレーションは粘度と密度に  
 相当するパラメータを  $N_{\text{prm}}$  通り変化させて，それぞれのパラメータでシミュレーションを  
 行う．

シミュレーション結果においては，世界座標系に対して図 3.4 のように水槽は配置され  
 ている．SPH 法のシミュレーション結果としては，各粒子の位置の時系列データが得られ  
 ている．このデータから現実との比較に使用する液体の表面上の点を計測時と同じく  $N_{\text{msr}}$

個抽出する．表面形状を表す点は  $x$  軸方向に等間隔に並んでいるとし，その点の  $x$  座標を， $x_1^{\text{sim}}, x_2^{\text{sim}}, \dots, x_{N_{\text{msr}}}^{\text{sim}}$  とする．

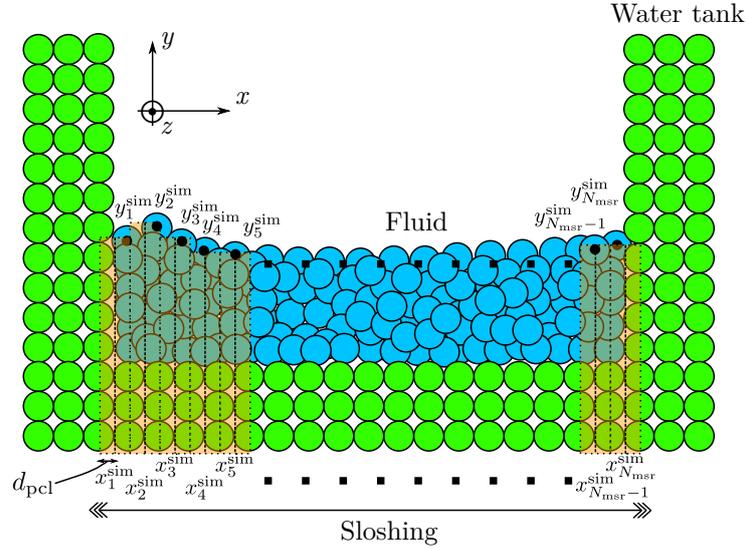


図 3.4: シミュレーション結果の模式図と座標系

比較する点のうち， $k$  番目 ( $1 \leq k \leq N_{\text{msr}}$ ) の点を考える．シミュレーション結果の粒子の位置座標について， $x$  座標が  $x_k^{\text{sim}}$  と一致する粒子が存在するとは限らないため，探索する  $x$  座標には式 (3.19) に示す範囲を持たせる． $d_{\text{pcl}}$  は比較する点の  $x$  座標の間隔の半分の値である．

$$x_k^{\text{sim}} - d_{\text{pcl}} < x < x_k^{\text{sim}} + d_{\text{pcl}} \quad (3.19)$$

実際の計測では，最もカメラに近い部分での表面形状を計測しているため，シミュレーション結果での表面に存在する粒子は，式 (3.19) に示す範囲内で  $z$  座標が閾値よりもカメラに近い粒子のうち， $y$  座標が最も大きい点とし，その粒子の  $y$  座標を計測点における表面の座標として抽出する．パラメータの種類が  $l$  番目 ( $1 \leq l \leq N_{\text{prm}}$ ) の時の取得した座標を  $(x_1^{\text{sim}}, y_1^{\text{sim},l}), (x_2^{\text{sim}}, y_2^{\text{sim},l}), \dots, (x_{N_{\text{msr}}}^{\text{sim}}, y_{N_{\text{msr}}}^{\text{sim},l})$  とする．シミュレーション結果における表面形状を表す点のうち，取得に失敗した点が存在した場合は，左右それぞれの方向で最も近い，取得に成功した 2 点を用いて線形補間する．

この方法では，粒子が単体で飛び跳ねた場合，飛び跳ねた粒子を誤って表面に存在する粒子として捉える可能性があるが，比較する際の水槽を揺らす動きの周波数は，粒子が飛び跳ねないように十分低く設定している．

### 3.5 表面形状の比較

現実の液体における表面形状を計測する点とシミュレーション結果での表面形状を表す点は同じ個数ある。さらに、計測点は水槽内で等間隔に設定し、かつ、シミュレーション結果での表面形状を表す点も水槽内で等間隔に設定したため、実際の計測点とシミュレーション結果での表面形状を表す点の  $x$  座標は水槽内での相対的な位置としては一致する。したがって、表面形状の比較としては、実測して得られた点と、シミュレーション結果から得られた点のうち、計測点の番号が同じ点同士で  $y$  座標を比較すればよい。しかし、単純に比較するだけでは、動画と CG での縮尺が異なるため、正しく比較できない。正しく比較するために、水槽の大きさを基準に縮尺を一致させる必要がある。

縮尺を一致させる方法を述べる、現実の水槽の  $x$  軸方向の幅  $w_{\text{msr}}$  は、図 3.3 より、

$$w_{\text{msr}} = x_{N_{\text{msr}}}^{\text{msr}} - x_1^{\text{msr}} \quad (3.20)$$

である。シミュレーション結果における水槽の  $x$  軸方向の幅  $w_{\text{sim}}$  は、図 3.4 より、

$$w_{\text{sim}} = x_{N_{\text{msr}}}^{\text{msr}} - x_1^{\text{msr}} \quad (3.21)$$

である。縮尺を一致させ、 $w_{\text{msr}}$  と  $w_{\text{sim}}$  が共に 1 となるための比率である  $\gamma_{\text{msr}}$ ,  $\gamma_{\text{sim}}$  を

$$\gamma_{\text{msr}} w_{\text{msr}} = 1 \quad (3.22)$$

$$\gamma_{\text{sim}} w_{\text{sim}} = 1 \quad (3.23)$$

を満たすように定義する。これら  $\gamma_{\text{msr}}$ ,  $\gamma_{\text{sim}}$  と、それぞれの座標データとの積を計算することで、現実の水槽と、シミュレーションでの水槽の縮尺を一致させることができる。すなわち、縮尺を一致させた  $k$  番目 ( $1 \leq k \leq N_{\text{msr}}$ ) の点の水槽の底からの液体の表面までの高さのうち、計測点の高さを  $Y_k^{\text{msr}}$ , シミュレーション結果の表面形状を表す点の高さを  $Y_k^{\text{sim},l}$  とすると、

$$Y_k^{\text{msr}} = \gamma_{\text{msr}} (y_k^{\text{msr}} - y_{\text{btm}}^{\text{msr}}) \quad (3.24)$$

$$Y_k^{\text{sim},l} = \gamma_{\text{sim}} (y_k^{\text{sim},l} - y_{\text{btm}}^{\text{sim}}) \quad (3.25)$$

と計算できる。ただし、 $y_{\text{btm}}^{\text{msr}}$  は現実の水槽の底の  $y$  座標であり、 $y_{\text{btm}}^{\text{sim}}$  はシミュレーションでの水槽の底の  $y$  座標である。

縮尺を一致させた底からの液体の表面の高さについて、計測点の高さとシミュレーション結果の点の高さの差を求め、全計測点で差の二乗和を求める。求めた二乗和の時刻  $t = t_0$  から  $t_1$  までの値の和を比較する指標として用いる。すなわち、用いる指標を  $E_l$  とすると、 $E_l$  は式 (3.26) のように求められる。ただし、パラメータの種類は  $l$  番目であり、水槽の両端に

相当する  $k = 1$  番目と  $k = N_{\text{msr}}$  番目のデータは，水槽の側面と分類して計測することが困難であり，誤差が大きくなるため，使用しない．また，時間の刻み幅を  $\Delta t$  とし， $\tau$ ， $\tau_0$ ， $\tau_1$  は整数で， $t_0 = \tau_0 \Delta t$ ， $t_1 = \tau_1 \Delta t$  とする．

$$E_l = \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_1} \sum_{k=2}^{N_{\text{msr}}-1} (Y_k^{\text{msr}}(\tau \Delta t) - Y_k^{\text{sim},l}(\tau \Delta t))^2 \quad (3.26)$$

$E_l$  を  $l = 1$  から  $N_{\text{prm}}$  まで求める．式 (3.27) を満たす  $l_{\text{min}}$  番目のパラメータを，最適なパラメータとする．

$$E_{l_{\text{min}}} = \min\{E_l \mid 1 \leq l \leq N_{\text{prm}}\} \quad (3.27)$$

ただし， $\min\{\text{集合}\}$  は， $\{\text{集合}\}$  内の最小の要素を表す．

## 第4章 システムの実装と結果

本章では，使用した機器と実装したシステムを示し，パラメータ推定を行った結果について述べる．

### 4.1 水槽を揺らすためのトレッドミルの制御

水槽を揺らす装置として，図 4.1 に示す Bertec 社のトレッドミル [32] を用いている．トレッドミルは，PC と USB 端子で接続されており，PC に搭載されているソフトウェアを用いて制御できる．このソフトウェアは手入力によりトレッドミルのベルトの速度・加速度を指定することができるだけでなく，TCP 方式または UDP 方式の通信を用いた遠隔操作により，トレッドミルのベルトの速度・加速度の制御が遠隔で行える．トレッドミルの仕様を表 4.1 に示す．



図 4.1: Bertec 社のトレッドミル

表 4.1: トレッドミルの仕様 [32]

名称	Mini-FIT for Animal Application
大きさ	2.06 m × 1.39 m × 0.389 m
速度範囲	0 - 24 km/h
加速度範囲	0 - 25 m/sec <sup>2</sup>
最大騒音値	90 dB
ベルトの数	2 本
ベルトの大きさ	約 1 m × 0.3 m

本実験では、トレッドミルのベルトの速度と加速度について、事前に指定した通りのデータを、トレッドミルのソフトウェアに TCP 方式で送信し、トレッドミルを指定した通りに制御し、同時にトレッドミルから送信されるベルトの速度情報を、ソフトウェアを介して TCP 方式で受信した。ただし、実際のベルトの挙動は、モーターの状態などにより、指定した通りに動くとは限らない。

TCP 方式を用いた遠隔操作により、1 sec ごとに、ベルトの速度を 0.1 m/sec と -0.1 m/sec の間を加速度  $1.0 \text{ m/sec}^2$  で変化させる動作を繰り返すことで、水槽を揺らす動作が行えるようにした。また、受信したデータを SPH 法のシミュレーションに読み込ませることで、SPH 法での水槽の動きにトレッドミルによる水槽の動きを反映することができた。

## 4.2 液体の表面形状の動画撮影

水槽の側面より、液体の表面形状を計測するため、図 4.2 のように水槽、背景、ライト、カメラを配置した。ただし、撮像の際は部屋の灯りは設置しているライト以外消している。図 4.2 のようにカメラを水槽から可能な範囲で離し、光学ズーム機能を利用して水槽を撮影することで、動画の透視撮影による影響を可能な限り小さくなるようにした。

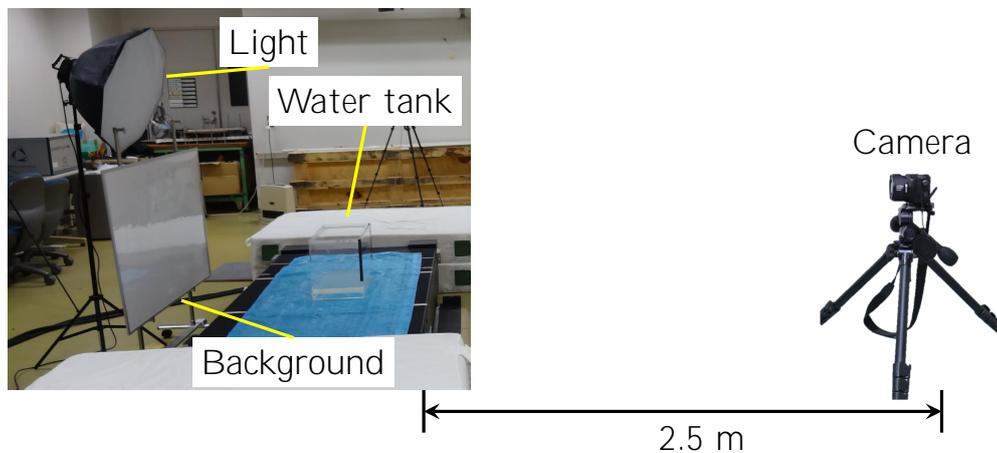


図 4.2: 水面形状を計測するための装置

使用したカメラは図 4.3 に示す CASIO EX-FH20[33] であり，動画撮影を行っている．動画撮影時のカメラの設定を表 4.2 に示す．



図 4.3: CASIO 社のカメラ EX-FH20

表 4.2: カメラの設定

解像度	1280 pixels × 720 pixels
FPS	30 fps

本実験で用いた水槽を図 4.4 に示す．水槽の大きさと，実験中の液体の分量を図 4.5 に示す．液体の体積は 4.8 L である．



図 4.4: 使用した水槽

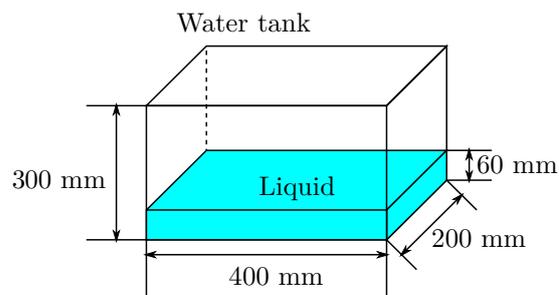


図 4.5: 水槽の大きさと液体の体積

撮影した動画に対し，画像処理を施す際に背景が一様であると処理を簡便にすることができる．図 4.6 に示す白色の板を動画の背景として用いることで，背景が一様となるようにした．



図 4.6: 背景板

暗室にて，図 4.7 に示すライトを用いて液体の表面を照光することにより，図 4.8 に示すような液体の表面が強調された動画が得られた。



図 4.7: 使用したライト

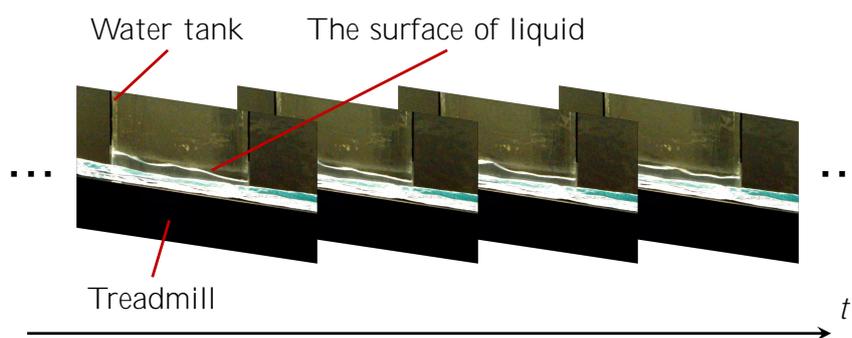


図 4.8: 撮影された動画

### 4.3 撮影された動画からの液体の表面形状データの取得

水槽の側面より撮影された動画に対して、画像処理をすることで、液体の表面形状を抽出した。画像処理の各過程の結果を図 4.9 に示す。図 4.9(a) に示す撮影された動画の各フレーム画像を、まず、図 4.9(b) に示すように濃淡階調のみで表す。次に、図 4.9(c) に示すようにボックスフィルタを用いて濃淡階調のみで表現された画像を平滑化する。最後に、ボックスフィルタを施した画像に対して、図 4.9(d) に示すように Canny 法を用いて輪郭を検出する。

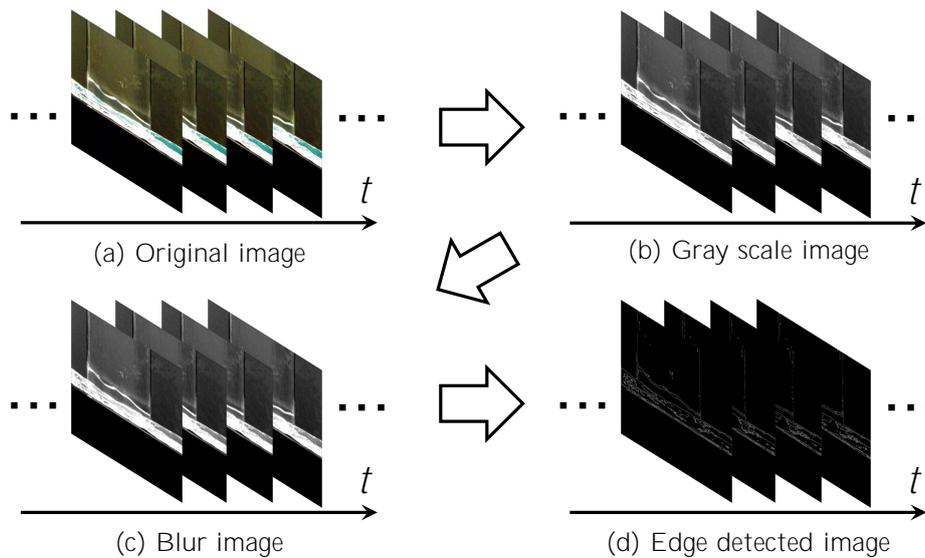


図 4.9: 画像処理の各過程の結果

輪郭が検出された画像に対して、液体の表面が存在する範囲を手動で指定し、表面を表す輪郭に対して、比較に用いる点の座標を抽出し保存する。範囲を指定する際には、最下端は水槽の下に敷いているブルーシートの数ピクセル上を、左端、右端は左右に揺れる水槽がはみ出さない範囲、上端は液体の表面が到達する最上位置の数ピクセル上を目安に指定する。表面を表す点を抽出した結果は図 4.10 のようになる。

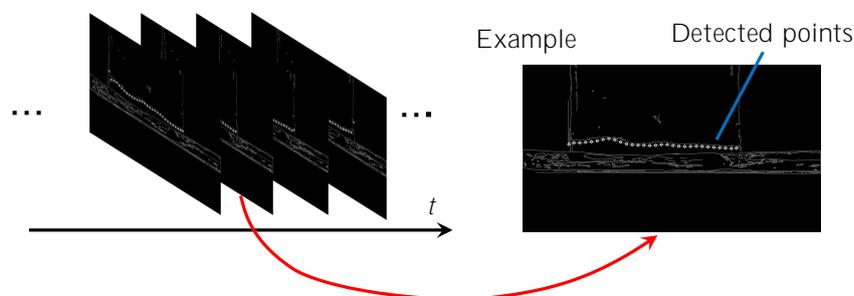


図 4.10: 液体の表面形状を抽出した結果

## 4.4 SPH法のシミュレーション環境

SPH法のシミュレーションの実行環境は表4.3の通りである。

表 4.3: SPH法のシミュレーション実行環境

CPU	Intel Core i7-3770
RAM [GB]	8
グラフィックカード	NVIDIA GeForce GTX 650
OS	Ubuntu 14.04.1

SPH法による流体シミュレーションを行うプログラムを作製した。本研究では、静止密度と粘度を除くパラメータは表4.4のように定義した。なお、粒子数は静止密度により変化する。

表 4.4: SPH法シミュレーションにおけるパラメータの値

気体定数 $C$ [(Pa·mm <sup>3</sup> )/kg]	3000
粒子の質量 $m_j$ [kg]	0.00020543
粒子の半径 [mm]	10
近傍半径 $h$ [mm]	25
単位体積あたりの外力 $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ [N/m <sup>3</sup> ]	(0, -9.8, 0)

また、静止密度と粘度は表4.5に示す通り変化させた。すなわち、パラメータの種類  $N_{\text{prm}}$  は  $10 \times 10 = 100$  通りある。

表 4.5: 静止密度と粘度の変化する範囲と変化量

パラメータ	使用する値	個数
静止密度 $\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	400, 500, ..., 1300	10
粘度 $\mu$ [Pa·sec]	0.1, 0.2, ..., 1.0	10
合計 $N_{\text{prm}}$	$10 \times 10 = 100$	

各パラメータ毎に、シミュレーション結果から抽出した表面形状の時系列データを別々のテキストファイルに保存する。表面に存在する粒子として選別するための  $z$  座標の閾値  $z_{\text{th}}$  は、水槽の奥行き方向の midpoint となる  $z_{\text{th}} = 0$  とした。

## 4.5 表面形状の比較

各パラメータにおけるシミュレーション結果の表面形状と、実際の計測した表面形状とを比較し、式(3.26)に示す  $E_l$  を計算する。式(3.26)について、液体の挙動が定常となるよう時

間が幾分経過した後から和を計算するため  $t_0 = 3 \text{ sec}$  とし, 比較する時間は水槽を揺らす周期が  $2 \text{ sec}$  であるため, 周期に  $1 \text{ sec}$  足した時間で和を取れるよう  $t_1 = 6 \text{ sec}$  とした. 時間の刻み幅  $\Delta t$  はカメラの FPS が  $30 \text{ fps}$  であるため,  $\Delta t = 0.0333 \text{ sec}$  である. ただし, 動画とシミュレーション結果で, 水槽の動きに基づいて時間合わせをしたところ, 12 フレーム分動画が遅れていた. この遅れを修正するため, 実際の比較時間は  $0.0333 \text{ sec} \times 12 \text{ frames} = 0.3996 \text{ sec}$  短くなるが, 水槽を揺らす 1 周期  $2 \text{ sec}$  分のデータは得られる. なお,  $N_{\text{prm}} = 100$  である.

水とサラダ油を用いて, 表面形状を比較した結果をそれぞれ図 4.11 と図 4.12 に示す.

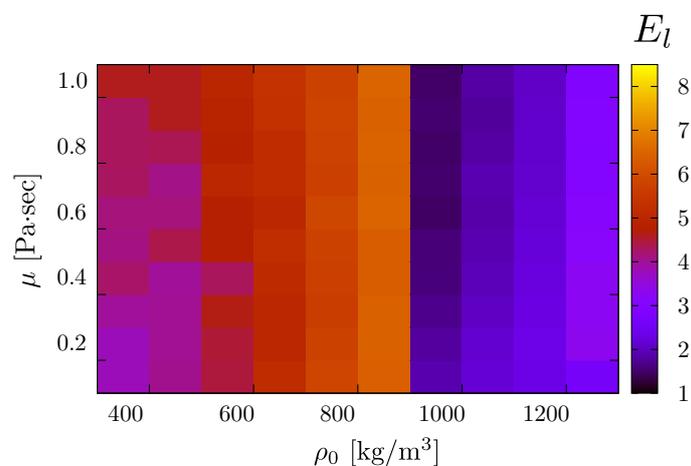


図 4.11: 各パラメータにおける  $E_l$  の値 (水)

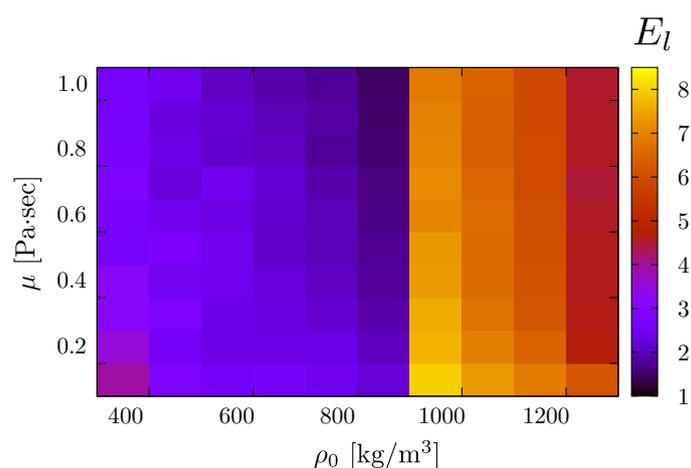


図 4.12: 各パラメータにおける  $E_l$  の値 (サラダ油)

図 4.11 と図 4.12 に基づいて、水とサラダ油に関する最適なパラメータを求めた結果を表 4.6 に示す。複数の液体の違いを、数値の違いとして得られた。

表 4.6: 得られた最適なパラメータ

液体	$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Pa·sec]
水	1000	0.6
サラダ油	900	1.0

表 4.6 に示したパラメータを用いて、SPH 法によるシミュレーションを行いレンダリングした結果の一部と、実際に撮影した動画の一部を図 4.13, 4.14 に同じ時刻の画像同士並べる。実際の液体の挙動と大方一致している。

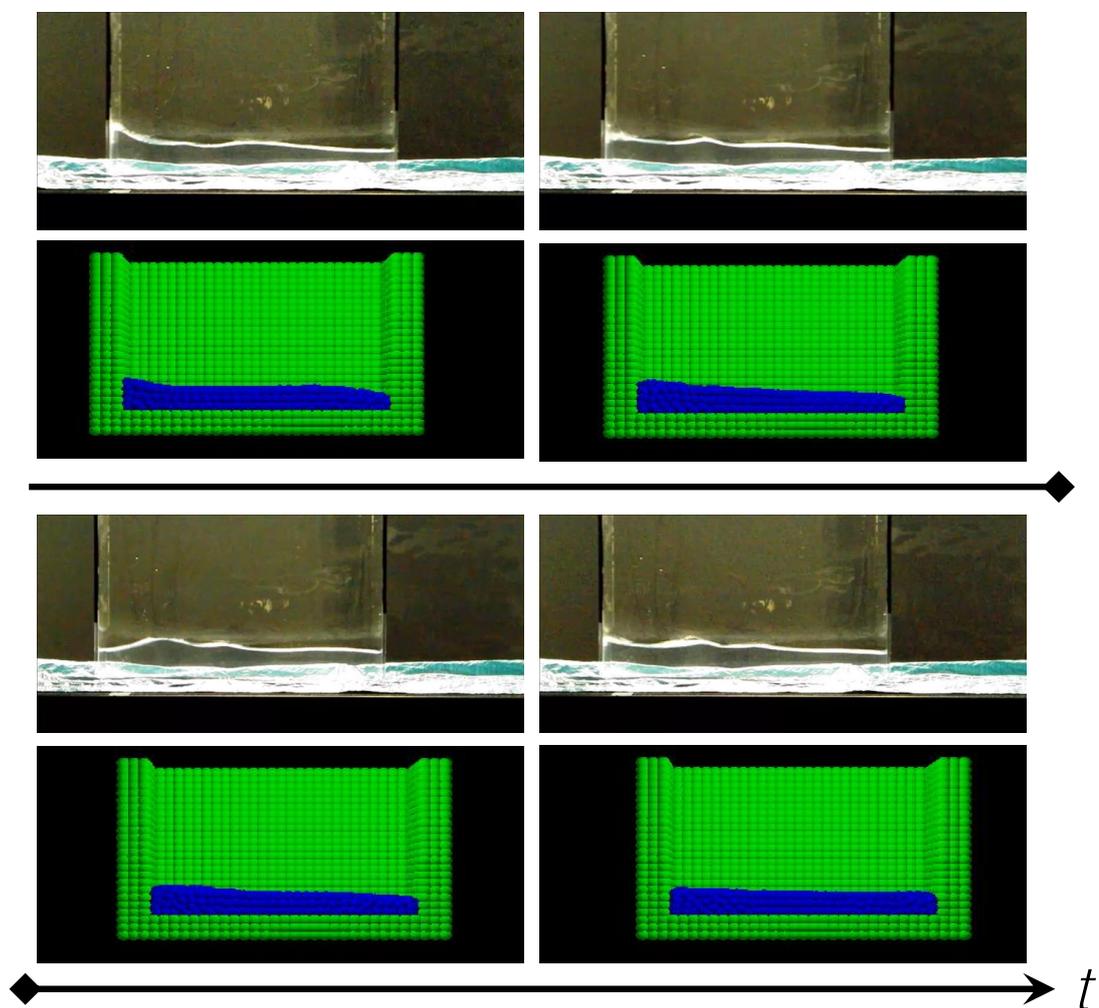


図 4.13: シミュレーション結果と実際の液体 (水)

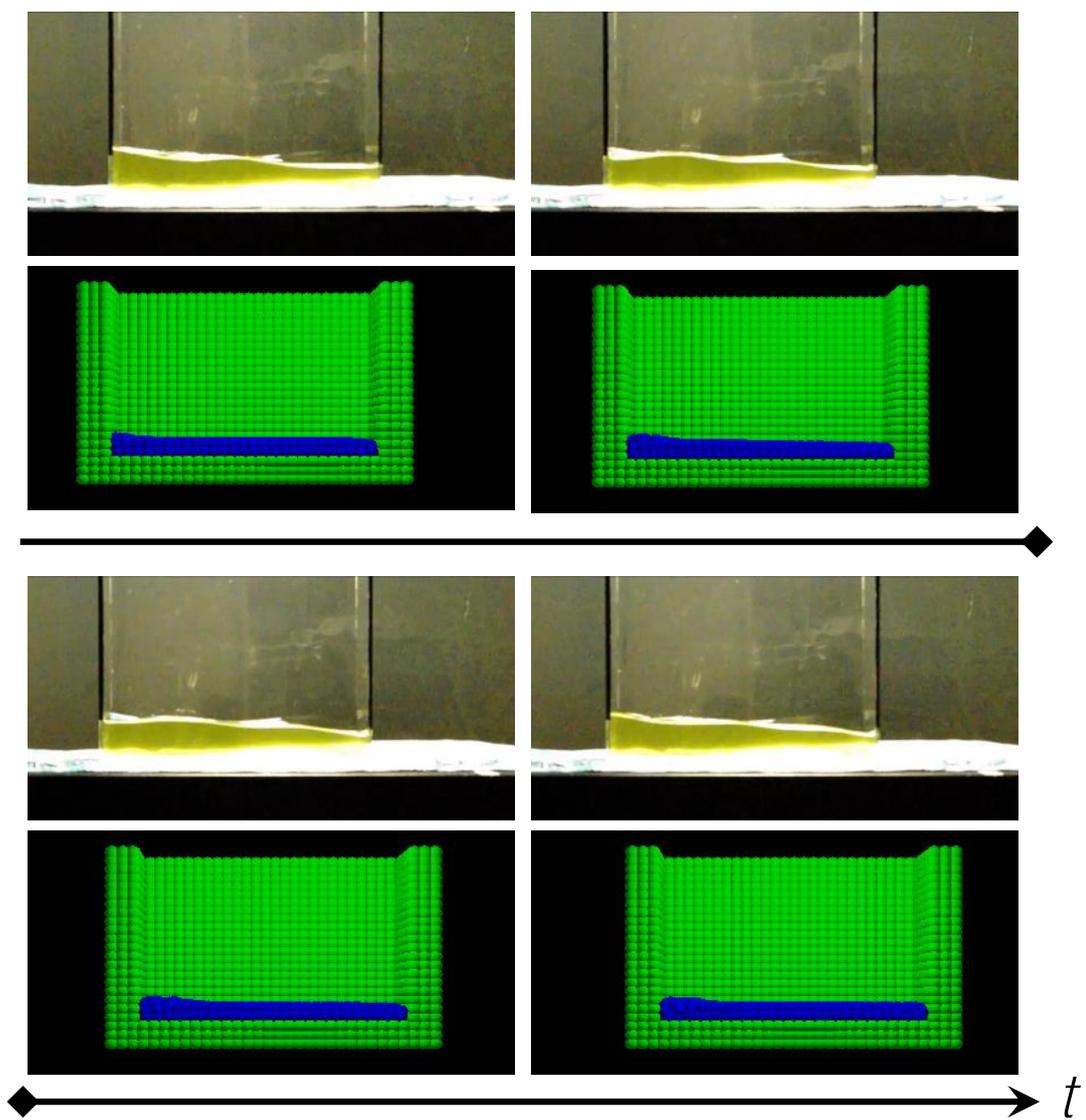


図 4.14: シミュレーション結果と実際の液体 (サラダ油)

## 4.6 推定したパラメータを用いた液体のバーチャル化

本システムを用いて得られた最適なパラメータを用いて、液体のバーチャル化を行うため、得られたパラメータを用いて、水柱の崩壊現象をシミュレーションした。

水とサラダ油それぞれに最適なパラメータを用いてシミュレーションした結果を動画 4.15 に示す。水とサラダ油のパラメータで挙動が変わっている。

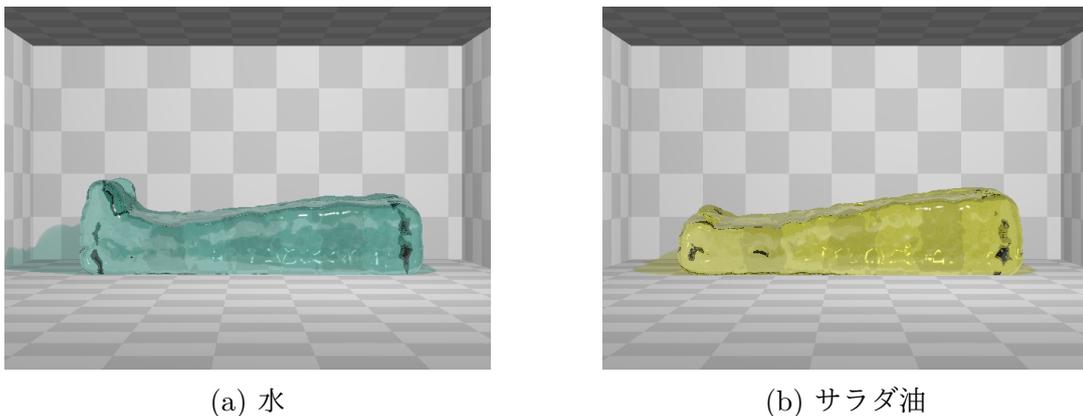


図 4.15: 水柱の崩壊現象のシミュレーション結果

## 4.7 考察

水とサラダ油に対し本システムを用いた結果、異なる静止密度と粘度に関するパラメータが得られた。水とサラダ油に関して、室温における実際の物性値を表 4.7 に示す。ただし、サラダ油については成分の一つであるなたね油の物性値を示す。静止密度に関しては、水とサラダ油ともに実際の物理量と等しい値が得られた。粘度に関しては、水とサラダ油の大小関係は一致するが、水、サラダ油共に実際の物理量よりも大きい値が得られた。しかし図 4.13 を見ると、本システムで得られた粘度を用いたシミュレーションは実際の挙動はほぼ一致している。また実際の物理量をパラメータに設定して行った、SPH 法によるシミュレーションは発散した。故に、本システムで得られた水の粘度は、SPH 法においては適していると考えられる。

表 4.7: 室温 20 °C での水と油の密度と粘度 [34, 35, 36]

液体	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	粘度 [Pa·sec]
水	$9.98 \times 10^2$	$1.0 \times 10^{-3}$
なたね油	$9.11 \times 10^2$	$9.0 \times 10^{-2}$

図 4.11, 4.12 を見ると、 $E_l$  の値が静止密度  $\rho_0$  の値が  $900 \text{ kg/m}^3$  と  $1000 \text{ kg/m}^3$  の間で急激に変化している。この原因として、各粒子の質量が一定であるため、静止密度  $\rho_0$  の変化

により粒子数が変化するが，静止密度  $\rho_0$  の値が  $900 \text{ kg/m}^3$  と  $1000 \text{ kg/m}^3$  の間での粒子数の変化により粒子の層が2層から3層に変化していることが挙げられる．粒子の層数の変化の影響を少なくするためには，各粒子の質量および半径を小さくし，粒子の数を多くして，粒子の各層の厚さを少なくする必要がある．

動画 4.15 を見ると，水とサラダ油について，本システムにより得られたパラメータを用いた水柱の崩壊現象のシミュレーション結果で挙動に違いが見受けられる．水は粘度が小さく，崩壊後の壁からの跳ね上がりが大きいのに対し，油は粘度が高いため，跳ね上がりが小さい．故に，本システムを用いることで，現実の液体の挙動を再現できており，液体をバーチャル化することができたと考えられる．

## 第5章 おわりに

本研究では、現実の液体の表面形状の時間変化と、様々なパラメータでの SPH 法を用いたシミュレーション結果における液体の表面形状の時間変化を比較することにより、現実の液体の挙動を再現することができる SPH 法における最適なパラメータを推定し、液体をバーチャル化することができるシステムを構築した。本システムでは、液体が入った水槽を揺らした際の、液体の表面形状の時間変化を、側面より撮影した動画にボックスフィルタを施した後、Canny 法を用いて輪郭を検出することにより、取得することができた。また、SPH 法を用いた流体シミュレーションの結果から、表面に存在する粒子の座標を抽出することで、表面形状の時間変化を取得することができた。取得できた表面形状の時間変化から、動画とシミュレーションでの縮尺を合わせた上で、水槽の底から液体の表面までの高さを取得し、これら取得した高さの差の全計測点での二乗和を各時刻で取得し、取得した二乗和の比較時間内での和を表面形状の変化を比較するための指標として求めた。この指標を最小とする、液体を表すバーチャル化するために最適なパラメータを得ることで、複数の液体に対して、最適なパラメータを得ることができた。また、そのパラメータを用いて水柱の崩壊現象のシミュレーションを行ったところ、挙動に違いが見られたため、複数の液体のバーチャル化を実現できた。

本システムにより、現実にも似た液体の挙動をバーチャル空間で再現できるようになる。本システムは、流体力学に関する現象を数値シミュレーションで実験する際に有用であると考えられる。またゲームなどで用いられる実時間での流体シミュレーションにおける、パラメータの設定などに対しても、本システムは有用であると考えられる。

# 謝 辞

本研究は、大阪大学 基礎工学部で行ったものである。

大城研究室に正式に配属してからは、数々のゼミナールおよびイベントで多忙な日々の中で、有意義な研究生生活を送ることができました。この密度の濃い一年間を過ごせたことは、一重に私を支えてくださった人々の存在のおかげであると強く感じます。

大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城 理 教授には、研究テーマに対する鋭いご指摘や、研究を遂行する上で必要な研究環境を提供してくださったとともに、有意義なご助言やご提案をしていただきました。また、日々のゼミナールにおいては、議論の重要性を教えていただき、私の拙い意見に対しても真剣にご思慮していただきました。深く感謝するとともに、篤く御礼申し上げます。大阪大学 大学院基礎工学研究科 井村 誠孝 准教授には、担当教員として研究テーマの相談の際には、長時間にわたり、流体シミュレーションの分野における問題点などを丁寧に説明してくださり、その上で私の理解不足や誤解に基づく質問などにも真剣にご返答くださいました。また隔週の研究報告の場では、研究に対する鋭く有益なご指導をしていただき、研究に行き詰った際には親身となってご指導くださいました。物品購入についても、私の提案に対し深くご考慮してくださり、手続きなども快くしてくださいました。深く感謝いたします。大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元 俊輔 助教には、研究テーマの相談では有益な書籍や論文を多数お示しくくださり、昼食時には、進路についてご自身の体験を基に有益なお話を伺うことができました。日々の研究でも、進捗具合などを気にかけてくださり、進捗報告の場などでは有益なご指摘をしていただきました。深く感謝いたします。大阪大学 サイバーメディアセンター 黒田 嘉宏 准教授、京都大学 医学部附属病院 浦西 友樹 助教には、飲み会などの場で進路や研究について有意義なお話を伺うことができました。御礼申し上げます。大阪大学 基礎工学研究科 野村 泰伸 教授、鈴木 康之 助教には、トレッドミルの使用について便宜を図っていただき、ご支援いただきました。御礼申し上げます。

大城研究室の先輩方である井手口 裕太 氏、加藤 雄樹 氏、簗岡 亮 氏、團原 佑壮 氏、長坂 信吾 氏、中藤 寛己 氏、豆野 裕信 氏、和田 章宏 氏、加藤 高浩 氏、上西 健太 氏、川口 純輝 氏、古澤 大樹 氏には、普段の研究室生活において、研究に対する姿勢などを教えていただきました。そして、さまざまなご助言・ご支援もいただきました。感謝申し上げます。同期の加藤 弘樹 氏、桑谷 達之 氏、日夏 俊 氏とは、日々の研究生生活の中で、お互いに励ましあいながら、切磋琢磨できました。感謝します。

最後に、大学に入学して以来、常に気を配ってくださった私の家族に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 古市幹人, 荒木文明, 陰山聡. 大規模地球変動シミュレーションの可視化技術開発. 可視化情報学会誌, Vol. 32, No. 127, pp. 16–21, 2012.
- [2] 横山秀史, 目黒公郎, 片山恒雄. 人間行動シミュレーションによる地下街の安全性評価に関する研究. 地域安全学会論文報告集, No. 3, pp. 160–164, 1993.
- [3] Open Source Physics. <http://www.compadre.org/osp/>. Accessed: 2015-02-06.
- [4] M. Arbabtafti, M. Moghaddam, A. Nahvi, M. Mahvash, B. Richardson, and B. Shirinzadeh. Physics-Based Haptic Simulation of Bone Machining. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 4, No. 1, pp. 39–50, Jan 2011.
- [5] S. Carpin, M. Lewis, Jijun Wang, S. Balakirsky, and C. Scrapper. USARSim: a robot simulator for research and education. In *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1400–1405, April 2007.
- [6] 藤澤誠. CGのための物理シミュレーションの基礎. マイナビ, 東京, 2013.
- [7] 越塚誠一. 数値流体力学. 培風館, 東京, 1997.
- [8] J. F. Wendt. *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*. Springer, Berlin Heidelberg, 3rd edition, 2009.
- [9] 越塚誠一. 粒子法. 丸善出版, 東京, 2005.
- [10] L. B. Lucy. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*, Vol. 82, pp. 1013–1024, 1977.
- [11] R. A. Gingold and J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 181, No. 3, pp. 375–389, 1977.
- [12] M. Müller, D. Charypar, and M. Gross. Particle-based Fluid Simulation for Interactive Applications. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 154–159, 2003.

- [13] 石綿良三. 流体力学入門. 森北出版, 東京, 2000.
- [14] R. Bridson and M. Müller. Fluid Simulation. *SIGGRAPH 2007 Course Notes*, 2007.
- [15] J. J. Monaghan. An introduction to SPH. *Computer Physics Communications*, Vol. 48, No. 1, pp. 89–96, 1988.
- [16] M. Becker and M. Teschner. Weakly Compressible SPH for Free Surface Flows. In *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 209–217, 2007.
- [17] M. Desbrun and M. P. Gascuel. Smoothed Particles: A New Paradigm for Animating Highly Deformable Bodies. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation '96*, pp. 61–76, 1996.
- [18] B. Solenthaler and R. Pajarola. Predictive-corrective Incompressible SPH. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 40:1–40:6, 2009.
- [19] M. Müller, B. Heidelberger, M. Hennix, and J. Ratcliff. Position based dynamics. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 18, No. 2, pp. 109–118, 2007.
- [20] M. Macklin and M. Müller. Position Based Fluids. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 104:1–104:12, 2013.
- [21] S. Koshizuka and Y. Oka. Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. *Nuclear science and engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 421–434, 1996.
- [22] B. Adams, M. Pauly, R. Keiser, and L. J. Guibas. Adaptively Sampled Particle Fluids. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 26, No. 3, 2007.
- [23] A. Kolb and N. Cuntz. Dynamic particle coupling for GPU-based fluid simulation. In *Proc. Symposium on Simulation Technique*, pp. 722–727, 2005.
- [24] 曾田康秀, 渡邊明英, 小島崇. 動的領域分割および複数 GPU を用いた MPS 粒子法の高速度化. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))*, Vol. 69, No. 2, pp. I\_95–I\_105, 2013.

- [25] E. Sifakis, I. Neverov, and R. Fedkiw. Automatic Determination of Facial Muscle Activations from Sparse Motion Capture Marker Data. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, SIGGRAPH '05, pp. 417–425, New York, 2005. ACM.
- [26] Z. Xu, H. T. Wu, L. Wang, C. Zheng, X. Tong, and Y. Qi. Dynamic Hair Capture Using Spacetime Optimization. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 33, No. 6, pp. 224:1–224:11, 2014.
- [27] S. Zhao, W. Jakob, S. Marschner, and K. Bala. Building Volumetric Appearance Models of Fabric Using Micro CT Imaging. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 30, No. 4, pp. 44:1–44:10, 2011.
- [28] V. Kwatra, A. Schödl, I. Essa, G. Turk, and A. Bobick. Graphcut Textures: Image and Video Synthesis Using Graph Cuts. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 277–286, 2003.
- [29] J. Gregson, M. Krimerman, M. B. Hullin, and W. Heidrich. Stochastic Tomography and Its Applications in 3D Imaging of Mixing Fluids. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 4, pp. 52:1–52:10, 2012.
- [30] 三戸部佑太, 大島香織, 渡部靖憲. 面的波浪水面形状計測法の開発と砕波への適用. 土木学会論文集 B, Vol. 2, pp. 86–90, 2010.
- [31] J. Canny. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679–698, 1986.
- [32] Bertec Corporation. *Instrumented Treadmill User Manual*, 2013.
- [33] EX-FH20 - デジタルカメラ. [http://casio.jp/dc/products/ex\\_fh20/](http://casio.jp/dc/products/ex_fh20/). Accessed: 2015-02-06.
- [34] 高分子学会. レオロジーハンドブック. 丸善, 東京, 1965.
- [35] 日本油化学協会. 油脂化学便覧. 丸善, 東京, 1971.
- [36] 水ハンドブック編集委員会. 水ハンドブック. 丸善, 東京, 2003.