

特別研究報告書

バーチャルスタジオにおける 現実物体を介した仮想液体操作

指導教員 美濃 導彦 教授

京都大学工学部情報学科

関 亜也加

平成21年2月2日

バーチャルスタジオにおける現実物体を介した仮想液体操作

関 亜也加

内容梗概

バーチャルスタジオでは、実写映像から演者領域を切り出し、それをCGで作成した仮想背景に重畳して合成映像を作成することができる。合成映像はスタジオ内に設置されたフロアモニタに提示され、演者はフロアモニタを確認しながら演技を行う。合成映像にさらにCGで作成された仮想物体を重畳し、演者がその仮想物体を操作できるように機能拡張したバーチャルスタジオがある。理科実験のように教材を操作しながら説明を行う教育用映像を作成することを考えた場合、従来のバーチャルスタジオでは、薬品の化学反応を強調するのにCG効果を付与する程度しかできず、実際にスタジオ内で薬品や実験器具を用いて理科実験を行う必要があった。これに対して、仮想物体操作が可能なバーチャルスタジオでは、仮想の実験器具や仮想液体を用いることで、より安全に、かつ表現力豊かに合成映像を作成することができる。

本研究は、バーチャルスタジオにおいてCGで作成した仮想液体を演者が操作するシステムの構築を目的とする。理科実験で行われるような、液体の注ぐ量の微調整のような細かい液体操作を仮想液体で実現するためには、演者は仮想液体の状態を把握する必要があるが、仮想液体は現時ツンいは存在しないため直接目視することはできない。そこで、システムはフロアモニタなどを介して仮想液体の状態を者にリアルタイムで提示する必要がある。また、演者が行った操作を仮想液体に反映させるため、システムは仮想液体に対する演者の操作を計測しなければならない。さらに、バーチャルスタジオで作成した合成映像は視聴者にとって違和感のない映像になっている必要があり、合成映像に余計なものが映り込んだり、演者が不自然な動きをしたりすることがないことが望ましい。

これらの要件を満たすため、本研究では現実の容器を介して仮想液体を操作する。演者は何も入っていない現実の容器を用いて演技を行い、それを撮影した映像の容器の部分に、現実の容器と同形状で同じ動きをする仮想容器、および仮想容器内の仮想液体を重畳する。仮想容器は現実の容器と同形状の剛体とし、現実の容器の位置・姿勢を検出し、これを基に仮想液体の振る舞いをシミュレートすることができる。

仮想液体操作に関する従来手法では、容器の位置・姿勢検出のため容器にコードを装着していた。この手法は視聴者の存在を考慮していないシステムであるため問題はなかったが、バーチャルスタジオに適用すると、視聴者へ提供する合成映像に装置が映り、違和感の元となる。本研究では、映像に移りこむような装置を使わず非接触で容器の位置・姿勢を検出するために、容器の特徴点の三次元位置と実写映像中での特徴点の二次元位置から、容器の三次元位置・姿勢推定を行う SoftPOSIT アルゴリズムを利用する。演者が操作する容器に特徴点として複数のマーカを貼り、実写映像からマーカの二次元位置を検出することで、容器の三次元位置・姿勢を推定する。推定結果を用いて、仮想容器に現実の容器と同じ動きをさせることができる。

演者には演技をする上で液体の状態を把握しておく必要があるため、システムはリアルタイムで仮想液体の状態を提示する必要がある。一方で視聴者には違和感を与えない高品質な合成映像を提示する必要がある。高品質なシミュレーションをリアルタイムで行うのは困難である。そこで本研究では、演者に提示する合成映像と視聴者に提示する合成映像を個別に作成する。仮想液体の状態をリアルタイムで演者に提示するためにフロアモニタに提示する。合成映像は計算速度を重視し、仮想液体を構成するパーティクル数を減らし、合成映像のフレームレートや解像度を変えることで、仮想液体の状態がわかる程度の品質にする。一方、視聴者用の合成映像は、リアルタイムで提示する合成映像よりも高品質なものを撮影後にオフラインで作成する。以上により、演者にはリアルタイムの合成映像、視聴者には高品質な合成映像をそれぞれ提示することができる。

提案手法に基づいて仮想液体操作システムを構築し、本システムの有効性を確かめるために、現実の容器を介して仮想液体を操作する実験を行った。実験には二つの現実の容器を用い、それぞれに対応した仮想容器を用意する。演者が操作する一方の容器に対応する仮想容器には仮想液体を予め入れておき、その仮想液体の半量を他方の容器に対応する仮想容器に移し変えるタスクを課した。現実の容器を用い、さらにフロアモニタにリアルタイムで合成映像を表示することで、仮想液体の操作、さらに仮想液体の注ぐ量の微調整ができることを確認した。

Manipulation of Virtual Liquid by Real Object in a Virtual Studio

Ayaka SEKI

Abstract

Virtual studio creates the space where the synthetic video could be made by overlaying real image sequences of actors with the virtual CG background. The actors can therefore perform their actions along with the synthetic video displayed on the placed monitor in virtual studios. This study proposed the design of an enhanced interface to enable a smooth manipulation of virtual objects in virtual studios. Images made from computer graphics are able to be integrated with the background as well as objects in the foreground, and allow more comprehensive manipulation of objects by the actors.

This study sought to realize the manipulation of virtual liquid in a virtual studio. The manipulation of liquid is common in chemistry labs, and it contains two important features: a) it usually requires more sophisticated manipulation. Pouring liquid into a vessel, for instance, it is difficult for the actors to confirm the condition of the virtual liquid directly; and b) the real time status of the virtual liquid is necessary after every interaction with the actors to carry out the next action. Therefore, a virtual studio system should be able to show the actors the condition of the virtual liquid, and to measure the actors' manipulation in real time. Moreover, to accentuate the informing features of laboratory experiments, unrelated devices and unnatural motions of the actors should be eliminated to create the smooth representation.

In addressing the conditions above, this study proposes the method to manipulate the virtual liquid by a real vessel. The actor holds an empty vessel in his/her hand in the virtual studio. Then a virtual vessel with virtual liquid is overlaid with the real vessel on the real time image. For the virtual vessel is exactly the same with the real one in shape and motion, the system is able to acquire the actors' manipulation information from the positions and postures of the real vessel.

Wired vessels have ever been used for position acquirement in a previous work about the virtual liquid manipulation, however the wires attached to the

vessels were considered annoying, and could be confusing for the audience. To overcome this problem, this study adopted SoftPOSIT that detects the position and posture of the object from the 3D model and 2D position of the marking points on the real object. In this way, a synchronous motion between the real and the virtual vessel can be guaranteed.

With the limitation to simulate the motion of the virtual liquid in real time, two synthetic videos were made separately at the end. One synthetic video is displayed inside the virtual studio for actors to monitor the status of the virtual liquid. The other video is edited off-line with higher quality for the audience.

An evaluation experiment was conducted in order to verify the effectiveness of the proposing approach. Two real vessels and two corresponding virtual vessels were prepared, and the actor was required to pour half of the virtual liquid out of one vessel to another one. The results suggest that the manipulation and the control of the virtual liquid are possible by using real vessels and the proposed synthetic video.

バーチャルスタジオにおける現実物体を介した仮想液体操作

目次

第1章	緒論	1
第2章	バーチャルスタジオにおける仮想物体操作	4
2.1	バーチャルスタジオ	4
2.2	インタラクティブバーチャルスタジオ	5
2.3	仮想物体操作の従来研究	7
第3章	現実物体を介した仮想液体操作	9
3.1	仮想液体操作へのアプローチ	9
3.2	容器の位置・姿勢推定	10
3.3	仮想液体のシミュレーション	13
3.4	合成映像作成	16
第4章	実験	18
4.1	実験方法	18
4.2	実験結果・考察	20
第5章	結論	24
	謝辞	26
	参考文献	26

第1章 緒論

近年、映像コンテンツ制作の分野においてコンピュータグラフィック（CG：Computer Graphics）の利用が普及している。気象情報番組や教育用映像において、上空から見た雲や講義で使用する実験器具をCGで作成した仮想物体とし、それらの物体に対して並進・回転などの操作や、強調したい部分の色を変えるなどの特殊効果を加えることで、視覚的に分かりやすい映像になる。さらに、CGで作成した仮想物体を実写映像と合成することで、仮想物体について直接説明するような分かりやすい映像を作成することができるため、実写映像と仮想物体との合成映像はテレビのニュース番組や気象情報番組などで利用されている。このような映像を作成する環境としてバーチャルスタジオ（VS：Virtual Studio）がある。バーチャルスタジオは、実写映像とCGで作成した仮想背景や仮想物体との合成映像を作成するためのシステムである。スタジオカメラで撮影した映像から、クロマキー処理によって背景領域を抽出し、抽出された背景領域をCGで作成した仮想背景に置き換え、仮想背景や仮想物体と演者との合成映像を作成する。この合成映像を視聴者に配信する一方で、フロアモニターを通してリアルタイムで演者に提示することにより、演者は合成映像を確認しながら仮想物体を操作することができる。

本研究では、バーチャルスタジオを教育用映像コンテンツの作成に利用することを考える。教師である演者が仮想物体を教材として用いて講義する合成映像を作成する。仮想物体を教材として用いることで、実際に講義室に持ち込むのが困難な巨大な物や危険な物を教材とすることが可能になる。また、通常の講義で利用される教材は、黒板やスライドを使用した二次元のものに限られる。それに対してバーチャルスタジオを利用すれば、CGで作成された三次元の仮想物体や仮想セットを教材として提示できる。そのため、黒板やスライドでは表現が困難であった説明対象を、三次元表現を用いて視覚的に分かりやすく提示できる。特に理科実験などにおける、薬品の化学反応による性質の変化を表現するには、CGを利用した三次元表現を用いることが有効である。スタジオで理科実験を行う場合、演者やスタジオ関係者に危険が及ぶ可能性があるため、実験でよく使用される塩酸や水酸化ナトリウム水溶液などの劇薬を実際に使用するの望ましくない。また劇薬でなくても、液体を誤ってこぼすことによってスタジオ内の機材を汚損する可能性もあるため、液体の代わりに仮想液体を

用いるのが有用である．これを実現するには，理科実験で行われるような，液体を別の容器に一定量注ぎ入れるなどの，演者による微調整が必要な細かい液体操作を仮想液体で実現する必要がある．

仮想液体を用いて理科実験を実現する方法として，劇薬と劇薬の入った容器を全て予めCGで作成し，それに合わせて演者が演技する方法がある．この方法では，予め作成したCGに合わせて演技を行わなければならないが，役者ではない一般の講師にこのような演技力は期待できない．そのため，CGで作成した仮想の容器（以下“仮想容器”と呼ぶ）や仮想液体と実写映像との合成映像が不自然なものになる可能性が高い．別の方法として，現実の容器を使用し，その容器内に劇薬の代わりとして水道水などの安全な液体を入れ，それを用いて演者が演技する映像を撮影し，その映像の液体の部分に仮想液体を重畳する方法がある．この方法では前述の方法の問題点が回避されるが，撮影した映像の液体領域に仮想液体を完全に重畳させるのが困難である．実際に使用した液体が合成映像上に残ると，仮想液体と現実の液体が二重に見えてしまい合成映像として違和感のあるものになるため，現実の液体領域に仮想液体を完全に一致させる必要がある．しかし，スタジオカメラのフレーム数は毎秒30フレームであり，撮影した映像は膨大なフレーム数に達するので，実写映像の各フレームごとに一つ一つ一致させていくのは現実的な方法ではない．しかも今回想定している操作は，容器へ液体を注ぎ入れるような操作であり，注ぎ入れられている液体は細かく飛び散っていると考えられる．飛び散っている液体の部分に一致するように仮想液体を重畳するのは不可能である．そこで本研究では，何も入っていない現実の容器を用いて演者が演技する映像を撮影し，その映像の容器の部分に，現実の容器と同じ動きをする仮想容器と，仮想容器内の仮想液体を重畳する．この方法では，現実の容器を直接操作するため演者は自然な動きができる．また，仮想液体を現実の液体領域に重畳する必要も無いため，前述の二つの方法における問題点を回避できる．

仮想液体を操作するために現実の容器を使用し，演者が動かす容器に合わせて仮想容器を動かし，仮想容器の動きに従った仮想液体のシミュレーションを行う．演者が動かす容器と同じ大きさ・形状の仮想容器を用意し，仮想容器内の仮想液体を操作する．仮想容器に演者が動かす容器と同じ動きをさせるには，容器の位置・姿勢を検出する必要がある．そのために，容器の位置・姿勢を検出するセンサが必要になる．しかし，スタジオカメラでの撮影映像に映り込むよ

うな装置や，バーチャルスタジオに持ち込むのが困難な装置を容器の位置・姿勢検出に用いることは望ましくない．そこで，スタジオカメラをセンサとして用い，撮影した映像から現実の容器の動きを非接触で検出する手法を利用する．

理科実験では，液体を一定量注いだり，注ぐ量を微調整したりするといった細かい液体操作が求められる．このような操作は演者が液体を目視できなければ困難である．そのため，仮想液体を用いて理科実験を実現する際にも仮想液体を演者が目視できるようにする必要がある．演者は仮想液体操作に用いる現実の容器を直接見ることはできるが，仮想液体の入っている仮想容器が現実の容器と同じ動きをすることはいえ，現実の容器の状態から仮想液体の状態を把握するのは困難である．この問題を解決するために，仮想容器と仮想液体を実写映像に重畳した合成映像をリアルタイムでフロアモニタを通して演者に提示する．これにより，演者は仮想容器や仮想液体の状態を確認できる．リアルタイムで合成映像を表示するためには，演者が動かした容器の位置・姿勢にあった仮想容器と仮想液体をリアルタイムで作成する必要がある．リアルタイムで作成する合成映像は，計算速度を重視するため，仮想液体の状態が分かる程度の品質のものとする．一方，教育用映像として視聴者に配信する合成映像は，より高い品質が求められるため，撮影後にオフラインで作成する．

本稿ではまず第 2 章で，仮想物体操作が可能なバーチャルスタジオおよび仮想物体操作の従来手法について紹介する．第 3 章では，演者・容器の現実空間と仮想容器・仮想液体の仮想空間との合成映像を作成する際に生じる課題とその解決法について述べる．第 4 章では提案手法に基づくシステムを用いて作成した合成映像が，演者による細かい液体操作を実現しているかどうかを目視により確認する．最後に第 5 章で，結論と今後の課題について述べる．

第2章 バーチャルスタジオにおける仮想物体操作

2.1 バーチャルスタジオ

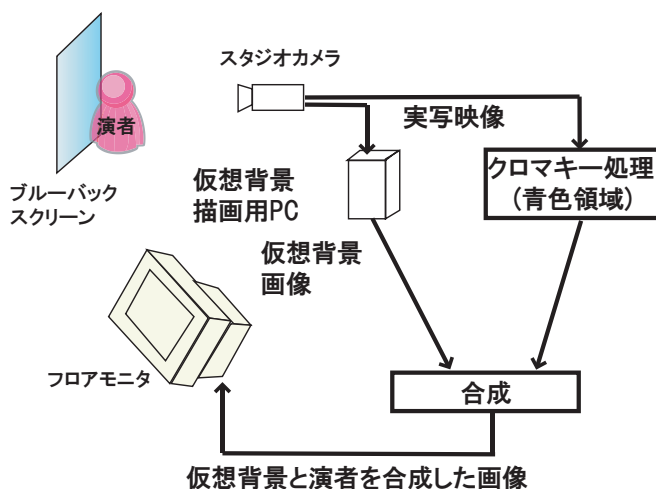


図1: バーチャルスタジオのシステム図

バーチャルスタジオとは、現実空間とCGで表現される仮想空間との合成映像を作成するためのシステムである（図1）。スタジオは壁や床が青などの単色に統一されており、演者や現実物体をスタジオカメラで撮影する。撮影された実写映像は、特定色の領域を除去する装置であるクロマキーに送られる。クロマキー処理によって、撮影映像をスタジオの背景領域とそれ以外の演者・現実物体領域（以下“前景領域”と呼ぶ）に切り分け、前景領域を抽出する。この前景領域を予め用意しておいた仮想背景に重ねて提示することにより、CGで作成された仮想背景や仮想物体のセット（以下“仮想セット”と呼ぶ）内に演者や現実物体が存在しているような映像を作成できる。映像撮影に用いるスタジオカメラにはセンサが装着されており、スタジオ内でのカメラの位置や方向、ズーム値などのカメラのパラメータを獲得することができる。これらのカメラのパラメータを用いて三次元の仮想セットを描画することで、撮影において自由なカメラワークを実現する。こうして作成された合成映像は、視聴者に配信されるとともに、スタジオ内のフロアモニターにもリアルタイムで映し出され、演者はこれを見て自分が仮想セット内にいることを確認しながら演技を行う。

バーチャルスタジオでは、仮想セットを利用することで、背景や道具類のよ

うなスタジオセットの作成，修正，改造や設置，移動や保管，再利用などが自由に行えるという利点がある．また，CGの仮想セットに対して，撮影の途中で色を変えるなどの特殊効果を加えることができるという利点もある．この他に，バーチャルスタジオのクロマキー処理で得る人間の像を，別の場所で撮影している映像に登場させることによって，遠隔地にいる人間が同じ空間にいるかのような映像も作成できる．このようにバーチャルスタジオは，CGの利用により様々な合成映像の作成が可能になるという利用価値から，テレビの気象情報をはじめとして様々な映像コンテンツ制作で利用されることが多い．

2.2 インタラクティブバーチャルスタジオ

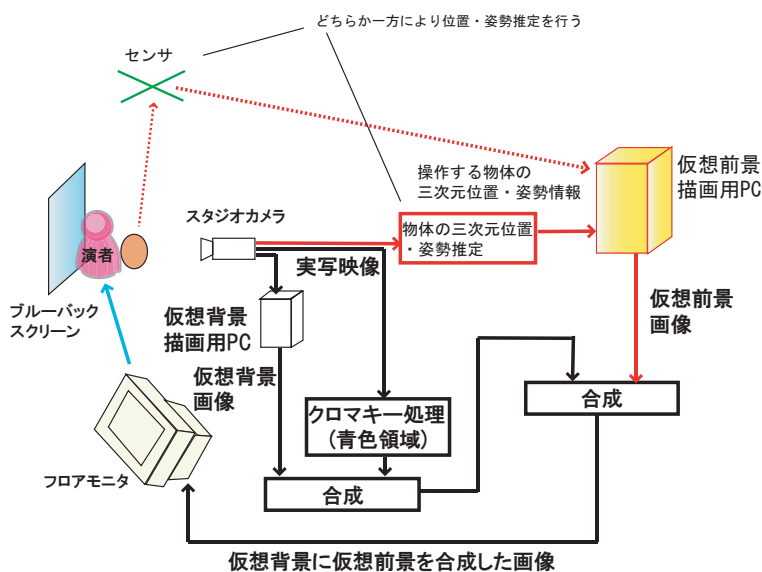


図2: インタラクティブバーチャルスタジオのシステム図

教育用映像を撮影するために，バーチャルスタジオにおいて演者がCGの仮想物体を操作し，自由に動かすことができるシステムの構築を考える．このようなシステムが構築できれば，仮想物体と演者が相互作用しているような（インタラクティブな）映像をバーチャルスタジオで作成できるようになる．このようなシステムをインタラクティブバーチャルスタジオと呼ぶ（図2）．これまでのバーチャルスタジオでは，実写映像の背景領域に仮想セットを合成することしか実現されておらず，演者と仮想物体との相互作用は実現されていなかった．これに対してインタラクティブバーチャルスタジオでは，演者と仮想セッ

トに加えて、演者に操作される仮想物体が登場し、縁者との相互作用によって部分的に演者の前景になることも起こりうる。バーチャルスタジオでの合成映像の作成法と、インタラクティブバーチャルスタジオでの合成映像の作成法を図3に示す。

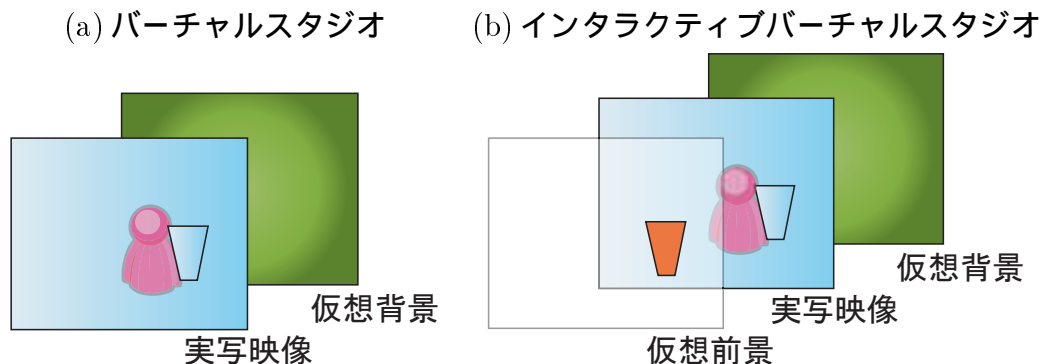


図3: バーチャルスタジオの合成方法 (a) とインタラクティブバーチャルスタジオの合成方法 (b)

インタラクティブバーチャルスタジオで実写映像と仮想セットの合成映像を作成する際に、演者と仮想物体の相互作用の実現のために生じる課題が三つある。一つ目は、仮想物体を操作するためには仮想物体の状態を演者が知る必要があるということである。仮想物体は直接見ることができないので、仮想物体が三次元空間内のどこに存在しているのか、どのような姿勢をしているのかをシステムが演者に提示する必要がある。二つ目は、仮想物体に対する演者の操作を計測する必要があるということである。システムが計測した操作は、仮想物体に反映させる必要がある。操作した仮想物体の状態をシステムが再び演者に提示することで、演者は操作後の仮想物体の状態を把握することができる。これにより、演者は自分の操作が意図していたものと一致するかどうかを判断し、仮想物体の位置・姿勢を微調整することができる。三つ目は、作成する合成映像は演者の他にも視聴者に対して提供しなければならないことである。スタジオカメラで撮影した映像に余計なものが映っていたり、演者と仮想物体の前後関係に誤りがあったり、演者や仮想物体の振る舞いが不自然であったりするような映像は、視聴者に違和感を与える。違和感のない映像を作成するため、演者と仮想物体の相互作用が自然に行われ、また矛盾のない映像合成を実現する

必要がある。

2.3 仮想物体操作の従来研究

仮想液体操作に関して、演者と仮想液体との相互作用を目的とした舟橋らの手法がある [3]。この手法では、演者と仮想液体の相互作用を現実物体を介することで実現している。演者が操作する現実の容器に合わせて仮想容器が動き、仮想容器で仮想液体操作を行う。仮想空間における液体の状態は、自由落下状態と静止状態の二つに分類することで液体シミュレーションを単純化し、仮想液体のリアルタイム操作を可能にしている。しかし、舟橋らはこのシステムを液体シミュレータごと構築しているため、限られた条件下での液体操作を想定したシステムとなっており、使用できる場面が限られている。また、仮想容器と仮想液体の映像をモニターを通してリアルタイムで演者に提示しているものの、演者との合成映像作成までは至っておらず、演者と仮想容器との位置関係が把握しづらい。演者が相互作用している様子の映像を作成しても、容器の位置・姿勢検出に接着型の装置を使用しているため、視聴者に違和感を与える。

演者と仮想物体の相互作用を実現することを目的とした三武らの手法がある [1]。この手法では、現実物体として紅茶缶を使用し、演者は紅茶缶が置かれているテーブル上の仮想キャラクターを、紅茶缶を介して間接的に操作する。また、実写映像と仮想キャラクターの合成映像をモニターを通してリアルタイムで演者に提示し、演者は仮想キャラクターが紅茶缶に向かって歩いたり、紅茶缶に押されて転んだりする動きをリアルタイムで確認することが可能である。しかしこの手法では、演者による紅茶缶に対する操作が平面上に限られているため、多様な操作が想定される液体操作には適さない。

大島らは演者による現実物体に対する操作を非接触で検出する手法を提案している [2]。この手法では、演者は仮想物体と同じ形状の現実物体を介して仮想物体を操作する。仮想物体としてCGの地球を作成し、現実物体として使用する白い球に対して演者が直接手に持って回転・並進などを行い、その操作に従って地球が動くという合成映像を作成する。演者は、CGの地球と同形状の現実物体である球を操作しているため、球の位置・姿勢を目視で確認することで地球の位置・姿勢を把握することができる。地球に演者が操作する球と同じ動きをさせるため、演者が操作する球にはマーカを貼り、そのマーカ位置に基づいて演者による操作を検出する。そのため演者の操作を非接触で検出可能である

が、現実物体と仮想物体が同形状の剛体であることを前提としているので、常に形状を変化させる液体への応用は困難である。また、仮想液体操作には仮想液体の状態をリアルタイムで演者に提示することが必要になるが、この手法では現実物体と仮想物体が同形状の剛体であることを利用した情報提示を行っているため、この前提を満たさない環境では情報提示を行うことができない。

これらの従来手法と本稿で提案する手法との比較を表1にまとめる。

表1: 従来手法と提案手法との比較

	従来手法 [1]	従来手法 [2]	従来手法 [3]	提案手法
仮想物体操作の方法	間接操作	直接操作	容器：直接操作 液体：間接操作	容器：直接操作 液体：間接操作
非接触で操作を検出	×		×	
リアルタイム合成映像		×	×	
液体操作	×	×		

以下、表1に挙げた4点について提案手法ではどのように実現するかを述べていく。

第3章 現実物体を介した仮想液体操作

3.1 仮想液体操作へのアプローチ

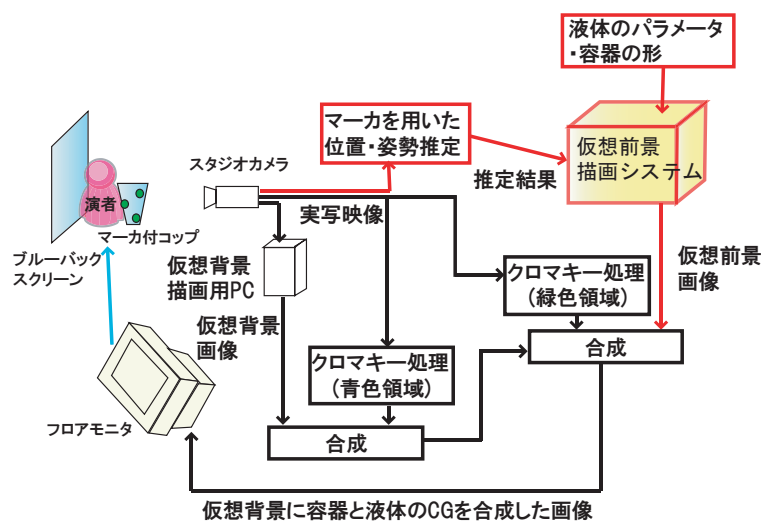


図4: 提案手法のシステム図

演者による仮想液体の操作を実現するため、本研究では現実の容器を用いて間接的に操作を行うアプローチを取る。このアプローチでは、演者は現実の容器を直接手で操作し、システムは現実の容器に対する操作を検出する。システムが内部に持つ仮想容器に対して検出した操作を反映し、これに応じた仮想液体の振る舞いをシミュレートする。このとき、仮想容器を演者が直接操作する現実の容器と同形状にしておけば、縁者による操作は容器の位置・姿勢を獲得することで検出できるが、その検出はバーチャルスタジオでの撮影映像に映りこむような装置を用いずに、非接触で行うのが望ましい。

以上のアプローチによって仮想液体操作を可能にしたバーチャルスタジオのシステム図を図4に示す。スタジオにおいて、演者は現実の容器を直接手で操作する。スタジオ内を撮影した実写映像にクロマキー処理を施し、背景と容器の領域を除去し、演者の領域を抽出する。除去された領域に、予め用意しておいた仮想背景を合成し、仮想セットの中に演者がいるような映像を作成する。一方、実写映像から容器の位置・姿勢を非接触で検出し、予め用意しておいた仮想容器のモデルを検出結果の位置・姿勢に一致させる。また、容器の位置・姿勢情報に基づいて液体シミュレータにより仮想液体のシミュレーションを行う。

仮想容器とシミュレーション結果の画像を、仮想背景と演者の合成映像に重畳し、仮想セットの中で演者が一方の仮想容器から他方の仮想容器へと仮想液体を注ぎ入れている合成映像を作成する。

演者と仮想液体の相互作用をバーチャルスタジオで実現するには、演者の操作をシステムが検出し、仮想容器・仮想液体に反映させる一方で、演者に仮想液体の状態をシステムが提示する必要がある、さらに視聴者には違和感のない合成映像を提示する必要がある。このように、演者から仮想液体、仮想液体から演者、合成映像から視聴者の3つの作用を考慮しなければならない。本手法では、大島らの手法と同様に、現実の容器と同形状の仮想容器を用いるため、現実の容器を見ることで仮想容器の位置・姿勢を確認することができる。しかし、仮想液体は仮想容器が動くと同時に、仮想容器内で流動的に形状を変化させるため、演者が仮想液体の状態を目視で把握することはできない。そこで、上述のようにして作成した合成映像を、フロアモニタを通して演者にリアルタイムで提示する。演者はフロアモニタに映し出された合成映像を目視することで、仮想容器・仮想液体の状態を把握することができ、仮想液体の細かい操作が可能になる。リアルタイムで合成映像を提示するため、仮想液体シミュレーションの計算速度を重視し、低品質ではあるが仮想液体の細かい操作が可能な程度の映像を作成する。また、視聴者には品質を重視した合成映像をオフラインで作成する。

実写映像から合成映像を作成するまでの流れを図5に示す。このようにしてシステムを構築することで、演者・現実の容器と仮想容器・仮想液体との相互作用（インタラクション）を可能にする。以下、インタラクションを実現するのに重要な、容器の位置・姿勢推定、仮想液体シミュレーション、合成映像作成について詳述する。

3.2 容器の位置・姿勢推定

本手法では、大島らの手法と同様、演者の操作する現実の容器そのものを仮想容器の位置・姿勢変化の検出に用いる。スタジオカメラで撮影した実写画像から現実の容器の位置・姿勢を推定し、表示する仮想容器の位置・姿勢を現実の容器の位置・姿勢に一致させる。現実の容器の位置・姿勢推定には、POSITアルゴリズム[4]と、これを改良したSoftPOSITアルゴリズム[5]を用いる。POSITおよびSoftPOSITとは、物体の特徴点の三次元位置を持つモデルと、観測画像中

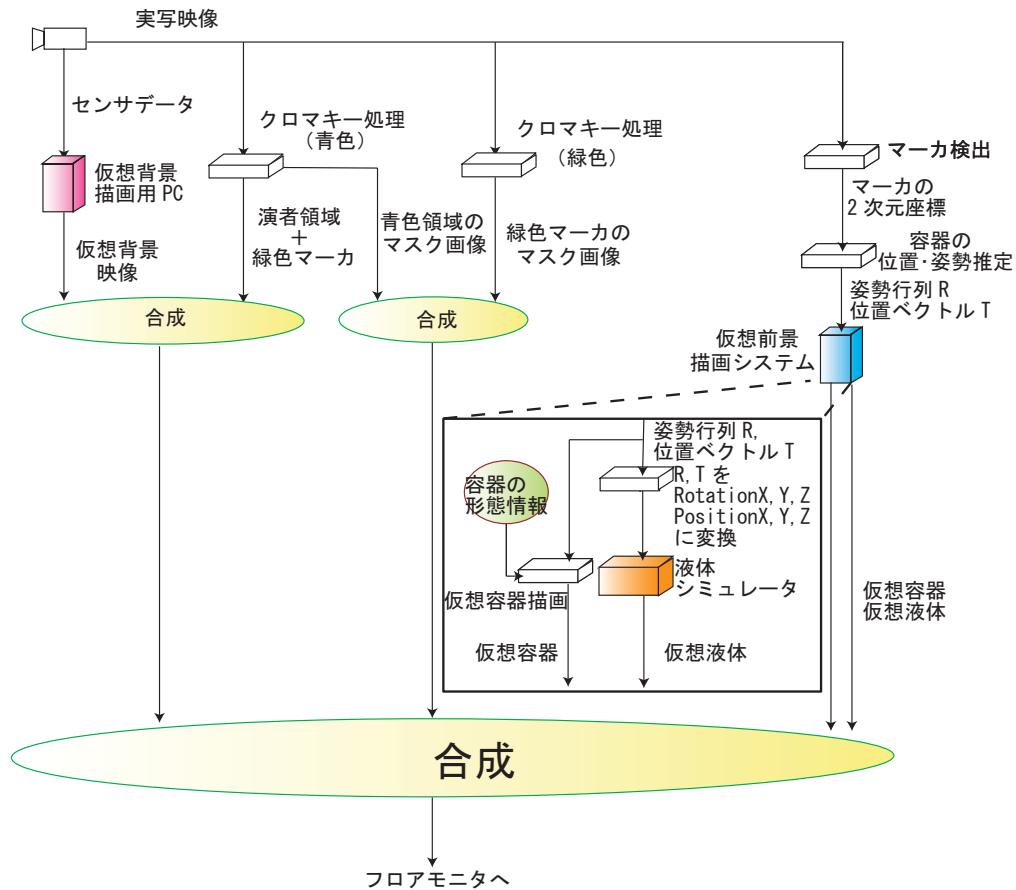


図 5: 実写映像から合成映像作成までの流れ

の特徴点の二次元位置から，観測時の物体の三次元位置・姿勢推定を行う手法である．POSIT は，観測画像中の物体の特徴点位置と物体の特徴点の三次元位置を一意的に対応付けることによって物体の位置・姿勢推定を行う．物体の位置・姿勢を一意的に求めるために特徴点の対応付けを手動で行うので，物体の観測時における位置・姿勢を確実に推定することができるが，演者の物体への操作に対してリアルタイムで推定を続けることができない．これに対して SoftPOSIT は，前時点での特徴点の三次元位置が分かっている場合に利用でき，現時点での物体の特徴点は前時点での位置の近傍にあると考え，物体の取り得る全ての位置・姿勢の組み合わせの中から最も可能性の高いものを現時点での物体の位置・姿勢とする．特徴点の対応付けを確率的に行うことによって，手動での対



図 6: 使用した容器

応付けの必要をなくし，操作される物体に対するリアルタイムでの位置・姿勢推定を可能にしている．

本研究では，まず POSIT によって物体の初期位置を求め，その後の物体の位置・姿勢推定には SoftPOSIT を用いる．初期位置に容器を設置した時点で演者にはまだ触れさせず，手動による特徴点の対応付けを行うことで，POSIT を用いて容器の初期位置・姿勢を得る．また，演者が容器を操作している間は，手動での対応付けが不必要な SoftPOSIT を用いることで，POSIT によって予め獲得しておいた容器の初期位置・姿勢をもとに，容器の特徴点モデルと観測時における容器の特徴点との確率的な対応付けを行い，演者が操作する容器の位置・姿勢をリアルタイムで推定する．仮想液体操作に用いる容器はスタジオの壁と同じ青色にし，物体上の特徴点として，容器の側面にマーカを貼る．本手法では二つの現実の容器を使用するため，二つの容器を色で区別できるように違う色のマーカをそれぞれに貼付した．一方の容器には，撮影時の照明による反射をなくすため，反射しない材質であるフェルトを円形に切ったものをマーカとして用いた．もう一方の容器には，再帰性反射材を円形に切ったものをマーカとして利用し，マーカ領域の輝度が著しく高くなるようにした．使用した二つのマーカ付き容器を図 6 に示す．

POSIT および SoftPOSIT は，撮影したカメラの焦点距離を与えることで，同一平面上にない 4 つ以上の特徴点から物体の位置・姿勢を計算する．操作する現実物体表面上に貼付しているマーカを，その現実物体の特徴点とする．一台のカメラから見える特徴点の画像上での二次元座標から，現実物体の三次元位置・姿勢を計算し，その結果を仮想物体に反映させる．POSIT および SoftPOSIT では式 (1) を満たすような姿勢行列 R と位置ベクトル T として位置・姿勢が得ら

れる．ここで， A は特徴点モデルの座標値を 3×1 のベクトルにしたもの， B は推定時に特徴点の存在する座標値を 3×1 のベクトルにしたものとする．また，姿勢行列 R は 3×3 の行列，位置ベクトル T は 3×1 のベクトルである．

$$B = R \cdot A + T \quad (1)$$

容器に貼付したマーカの三次元位置は，三次元形状計測装置を用いて計測する．この計測装置により，容器中心座標系でのマーカの三次元位置を予め計測しておく．観測画像中からマーカ領域を検出し，獲得したマーカ領域がそれぞれのマーカであるかを割り当て，各マーカの二次元位置を得る．獲得した二次元位置を，予め計測しておいたマーカの三次元位置情報とともに入力として与えることで，観測時の容器の三次元位置・姿勢を表す姿勢行列 R と位置ベクトル T を得ることができる（図 7）．

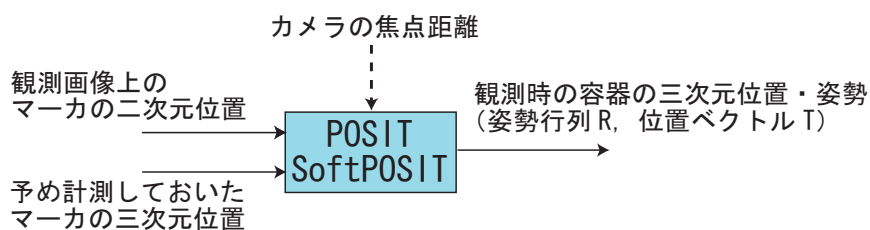


図 7: POSIT の入出力

3.3 仮想液体のシミュレーション

3.2 節で述べたようにして，実写画像から容器の位置・姿勢を獲得し，それと同じ位置・姿勢の仮想容器を作成する．こうして得られた仮想容器と合わせて動く仮想液体のシミュレーションを行う．仮想液体のシミュレーションには，液体シミュレータを使用する．液体シミュレータに計測により構築した仮想容器のモデルを取り込み，その仮想容器内に仮想液体があるとしてシミュレーションを行う．

実写映像を元に液体シミュレータで仮想液体のシミュレーションを行うには，実写映像から得られる容器の位置・姿勢を液体シミュレータ内の仮想容器をその位置・姿勢に一致させる必要がある．実写映像から容器の位置・姿勢を得ることはできるが，ここで得られる仮想容器の動きはフレーム単位の離散的なも

のとなる。しかし、仮想液体のシミュレーションを行うには仮想容器の連続的な運動を得る必要がある。本手法は、リアルタイムで演者に合成映像を提示するため、連続的にシミュレーションを行い仮想液体を作成することになる。そのためには、前回のシミュレーション結果を記憶させておき、その状態の次の状態として最新フレームでのシミュレーションを行う必要がある。

これらの要求を満たすため、本手法では液体シミュレータとして、固体や液体のシミュレーションが可能な RealFlow4[6] を使用する。RealFlow4 は、シミュレーションで使用する物体の位置・姿勢を RealFlow4 のパラメータ (Rotation X,Y,Z と Position X,Y,Z) に変換して与えることで、その物体の位置・姿勢を指定することができる。また、フレーム間の動きを補間するキーフレーム機能がついているため、離散的な動きを連続的な動きとして扱うことができる。さらに、RealFlow4 では液体の密度や粘性などを指定することで液体の性質を指定することができ、解像度や液体を構成する粒子 (パーティクル) の数を指定することでシミュレーションの精度を指定することもできる。RealFlow4 で行ったシミュレーション例を図 8 に示す。

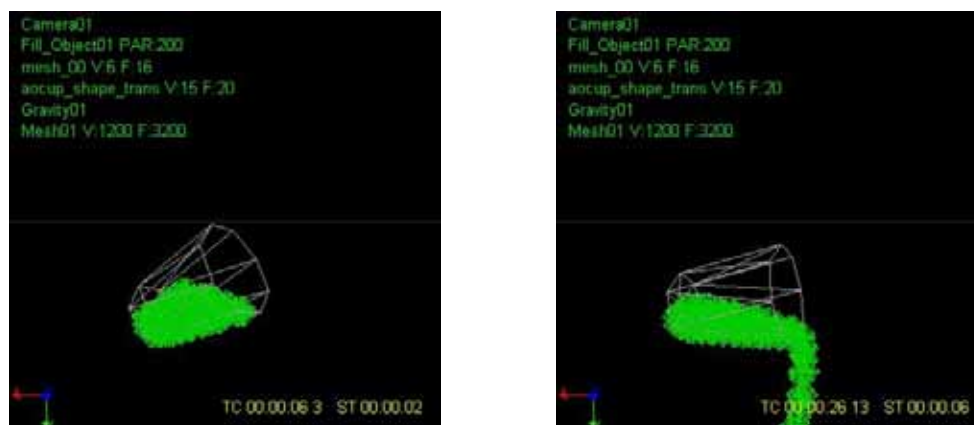


図 8: RealFlow4 でのシミュレーションの例

POSIT から獲得した容器の姿勢行列 R と位置ベクトル T を、RealFlow4 で使用するパラメータ Rotation X,Y,Z と Position X,Y,Z に変換し、RealFlow4 に入力として与える。これにより、シミュレータ内の仮想容器に現実の容器の動きを反映させる。次フレームの容器の姿勢行列 R と位置ベクトル T を獲得し、それを Rotation X,Y,Z と Position X,Y,Z に変換して入力することで、前フレームでのパラメータとの間の仮想容器の動きを補間する (図 9)。得られた仮想容器

の連続的な運動に基づき，仮想液体のシミュレーションを行う．以上のようにして，現実の容器の位置・姿勢に従った仮想液体を作成し，3.2節のようにして作成した仮想容器とともに仮想前景として実写映像に合成する．

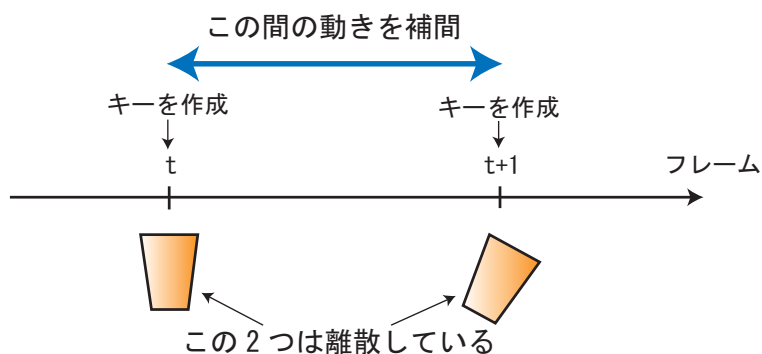


図9: キーフレームでの補間

姿勢行列 R と位置ベクトル T から Rotation X, Y, Z と Position X, Y, Z を求める．Rotation X, Y, Z は，それぞれ X 軸， Y 軸， Z 軸を中心に何度回転したかを表し，Position X, Y, Z は，それぞれ X 軸， Y 軸， Z 軸方向にどれだけ移動したかを表す．Position X, Y, Z には，位置ベクトル T の要素を式 (2) のようにそれぞれそのまま割り当てる．Rotation X, Y, Z は，それぞれの角度を ψ, θ, ϕ とすると姿勢行列 R に対して式 (3) のような関係が成り立つ．これを元に，姿勢行列 R から Rotation X, Y, Z を求める．

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{PositionX} \\ \text{PositionY} \\ \text{PositionZ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= R(Y, \theta)R(X, \psi)R(Z, \phi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \psi \sin \phi & -\cos \theta \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi & \sin \theta \cos \psi \\ \cos \psi \sin \phi & \cos \psi \cos \phi & -\sin \psi \\ -\sin \theta \cos \phi + \cos \theta \sin \psi \sin \phi & \sin \theta \sin \phi + \cos \theta \sin \psi \cos \phi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

RealFLow4における液体シミュレーションでは、仮想液体を高品質に作成しようとするほど計算に時間がかかってしまうため、高品質な合成映像をリアルタイムで演者に提示することは不可能である。そこで本手法では、リアルタイムで演者に提示する計算速度を重視した合成映像と、視聴者に提示する品質を重視した合成映像を別に作成する。仮想液体の品質とシミュレーション計算速度を決定しているのは、仮想液体を構成するパーティクル数、仮想液体の描画方法、フレームレートである。この3つを演者用と視聴者用の合成映像で変更することで、それぞれの品質と計算速度を調整する。演者に提示する合成映像では、仮想液体を構成するパーティクル数を減らし、仮想液体を点で描画、さらに毎フレーム描画せずフレームレートを小さくすることによってリアルタイム合成映像を作成する。ただし、仮想液体の状態を演者に提示できる程度の品質を保つために、パーティクル数とフレームレートのある程度維持する。そうすることで、シミュレーションに時間がかからず、合成映像をリアルタイムで提示することが可能になり、演者は仮想液体の状態を把握しながら操作することができる。システムが計算速度を重視した合成映像をフロアモニタに表示する一方で、撮影後に、視聴者用に品質を重視した合成映像をオフラインで作成する。視聴者に提示する合成映像は、仮想液体を構成するパーティクル数を増やし、仮想液体の三次元形状を求めて液体形状で描画、さらに毎フレーム描画することによって、仮想液体が立体的かつ滑らかに動くような高品質な合成映像を作成する。上記のようにして、演者用と視聴者用の合成映像を別で作成することで、仮想液体操作のためにリアルタイムで仮想液体の状態を把握したいという演者の要望と、あたかも現実の映像であるかのような合成映像を見たいという視聴者の要望を両方満たすことができる。

3.4 合成映像作成

2.2節で述べたように、実写映像に仮想背景と仮想前景を合成する場合、仮想背景が最背面にあり、その前面に演者・現実物体、最前面に仮想前景が描画される。しかし、本手法のように演者が仮想容器を重畳する容器を手で持っている場合、仮想背景と演者・容器の画像の上から仮想前景を重畳してしまうと、容器を持つ演者の指の領域にも仮想前景が重畳され、合成映像上で演者の指が切れるという問題が起こる。これを解決するため、実写画像にクロマキー処理を施した際に得られる青色領域のマスク画像を利用する。このマスク画像では、

背景と容器の領域は白色で、それ以外の領域は黒色に塗りつぶされている（図 10）。この画像の白色領域に仮想前景を重畳することで、指の領域に仮想前景が重畳されることはなくなる。マスク画像上で容器領域も白色になるように、現実の容器として青色の容器を使用した。

上述のようにすることで指による遮蔽の問題は解決するが、青色領域を除去した際、容器の側面にあるマーカの領域は除去されずに残る。すなわち、青色領域をクロマキー処理によって除去した結果、実写画像からスタジオの壁と容器の領域を除去し、演者とマーカの領域のみを残したマスク画像を得る。この画像に仮想容器を合成すると、演者が仮想容器を持ち、その仮想容器にはマーカが貼られているような合成映像を得る。このマーカを合成映像から除去するため、実写画像からそれぞれのマーカの色を基にマーカ領域をクロマキー処理によって抽出する（図 11）。抽出されたマーカ領域に仮想容器を重畳することにより、マーカ領域に仮想容器が重畳された画像を得る。この画像と、先ほど得られたマーカが残る合成画像を合成することで、それぞれのマーカ領域にも仮想容器が合成され、演者がマーカが貼られていない仮想容器を持っているような合成画像を得ることができる。青色領域とそれぞれのマーカ領域を合成したマスク画像を図 16 に示す。このマスク画像の白色領域に仮想前景を重畳することで指による遮蔽、マーカ領域の処理に対処している。

マスク画像の白色領域に仮想前景を重畳するため、仮想液体がこの領域を出ると合成映像上では描画されないという問題が起こる。例えば、演者が容器を体の前で操作した場合、仮想液体が仮想容器からこぼれ出たとき、仮想液体は容器領域を出て演者領域に存在することになり、合成映像上には描画されなくなる。この問題を回避するため、撮影の際に仮想液体の背後には、演者など、容器以外のものが来ないようにするという制約をつける。これにより、仮想液体が容器からこぼれ出ても仮想液体の背後にはバーチャルスタジオの壁しかなく、マスク画像上で白色領域の範囲にあるため、仮想液体を常に描画することができる。



図 10: 青色領域のマスク画像



図 11: 緑色領域のマスク画像



図 12: 青色領域と緑色領域を合成したマスク画像

第4章 実験

4.1 実験方法

3章で提案したシステムを実装し、実際に合成映像を作成した。作成する映像は、バーチャルスタジオで、演者が仮想液体の入っている仮想容器（以下“仮想操作容器”と呼ぶ）を手で操作し、仮想液体を別の仮想容器（以下“仮想固定容器”と呼ぶ）に注ぐというものである。演者が実際に操作する現実の容器（以下“操作容器”と呼ぶ）の形状を予め計測し、そのデータを元に仮想操作容器を作成しているため、仮想操作容器の形状や大きさは操作容器と同じである。仮想固定容器も、演者が操作しない方の現実の容器（以下“固定容器”と呼ぶ）を予め計測し、そのデータを元に同じ形状、大きさで作成し、実験の簡単化のため固定容器は撮影中は移動しないとした。この2つの容器を使用して、演者が仮想液体の状態を確認しながら、仮想液体を半分の量だけ移しかえるという細かい液体操作の実現が可能であることを検証する。

実験の流れを図13に示す。実験の準備として、フレーム0での操作容器と固定容器の位置・姿勢を予め決めておき、その位置・姿勢で設置された二つの容器をスタジオカメラで撮影する。撮影した画像から二つの容器の位置・姿勢をPOSITで推定し、フレーム0での仮想操作容器と仮想固定容器の位置・姿勢を

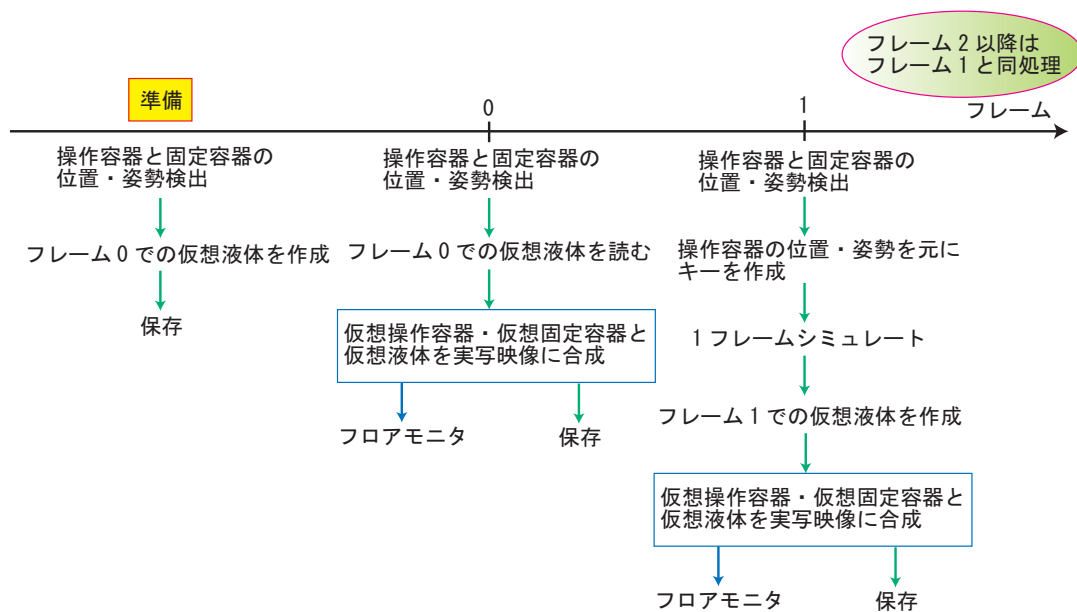


図 13: 実験の流れ

獲得する。撮影開始時までに容器を移動しなければ、予め獲得しておいた二つの容器の位置・姿勢を撮影開始時点での二つの容器の位置・姿勢とすることができる。また、撮影開始時点で仮想液体が仮想操作容器内に入っている必要があるため、操作する仮想液体の性質や量を RealFlow4 内で予め設定しておき、その性質でフレーム 0 での仮想液体を予め作成しておく。作成した仮想液体は、初期位置に設置された仮想操作容器・仮想固定容器とともに合成映像に重畳され、撮影開始時に演者に提示される。

撮影を開始すると、まず初期位置に設置されている仮想液体入りの仮想操作容器、空の仮想固定容器と実写映像の合成映像を作成し、フロアモニタを通して演者に提示する。演者は、その映像を元に仮想液体の状態を把握し、現実の操作容器を介して仮想操作容器の操作を行う。演者が現実の容器を操作すると、その位置・姿勢をシステムがリアルタイムで検出し、仮想操作容器の位置・姿勢に反映させ、仮想操作容器は演者が操作する容器と同じようにフロアモニタの映像上で動く。仮想操作容器の動きに従って、容器内の仮想液体が動き、その状態が変化する。演者はそれをフロアモニタで確認し、さらに容器に対して操作を加える。

このシステムの有効性を確かめるため、細かい液体操作として、仮想操作容器から仮想固定容器に、仮想液体の半量を移しかえるというタスクを演者に課

し、このタスクを達成できるかどうかを検証した。

4.2 実験結果・考察

作成した合成映像の一部を以下に示す。図 14 はスタジオカメラで撮影した実写映像，図 15 は演者にフロアモニタを通してリアルタイムで提示した合成映像，図 16 は視聴者用にオフラインで作成した合成映像である（図の下の数字はフレーム番号を示す）。今回の実験では，リアルタイム合成映像上の仮想液体を構成する粒子数は 100，視聴者用の合成映像上の仮想液体を構成する粒子数 2000 に設定した。

撮影を終えた時点での仮想固定容器内にある仮想液体を構成する粒子数と，仮想操作容器内にある仮想液体を構成する粒子数の比較を表 2 に示す。表 2 より，仮想操作容器から仮想固定容器へ約半量の仮想液体を移しかえることができたと言える。

リアルタイム合成映像は，仮想液体が頂点の集まりとして描画されているため，仮想液体の粒子がはっきり分かる映像になっている。また粒子数は少なく，フレームレートも 61/658 回と低いが，仮想操作容器や仮想固定容器に入っている仮想液体の量が分かる程度の品質は保たれている。従って，演者は仮想液体の状態をリアルタイム合成映像で確認することができるため，タスクを達成することができた。一方，視聴者用合成映像は仮想液体を液体形状で描画しているため，仮想液体に立体感がある。また粒子数はリアルタイム合成映像と比べて多く，仮想液体を毎フレーム描画しているためフレームレートは 658/658 回と高く，仮想液体が滑らかに動く映像を作成することができた。従って，視聴者にはリアルタイム映像よりも品質の良い合成映像を提示することができ，演者・視聴者双方に対して十分な合成映像を提示することができたと言える。

リアルタイム映像上で仮想操作容器の動きと仮想液体の動きにずれが生じる

表 2: リアルタイム映像と視聴者用映像の比較

仮想液体の 粒子数	リアルタイム映像		視聴者用映像	
	仮想操作容器	仮想固定容器	仮想操作容器	仮想固定容器
	54	46	1229	771
フレームレート	61/658		658/658	

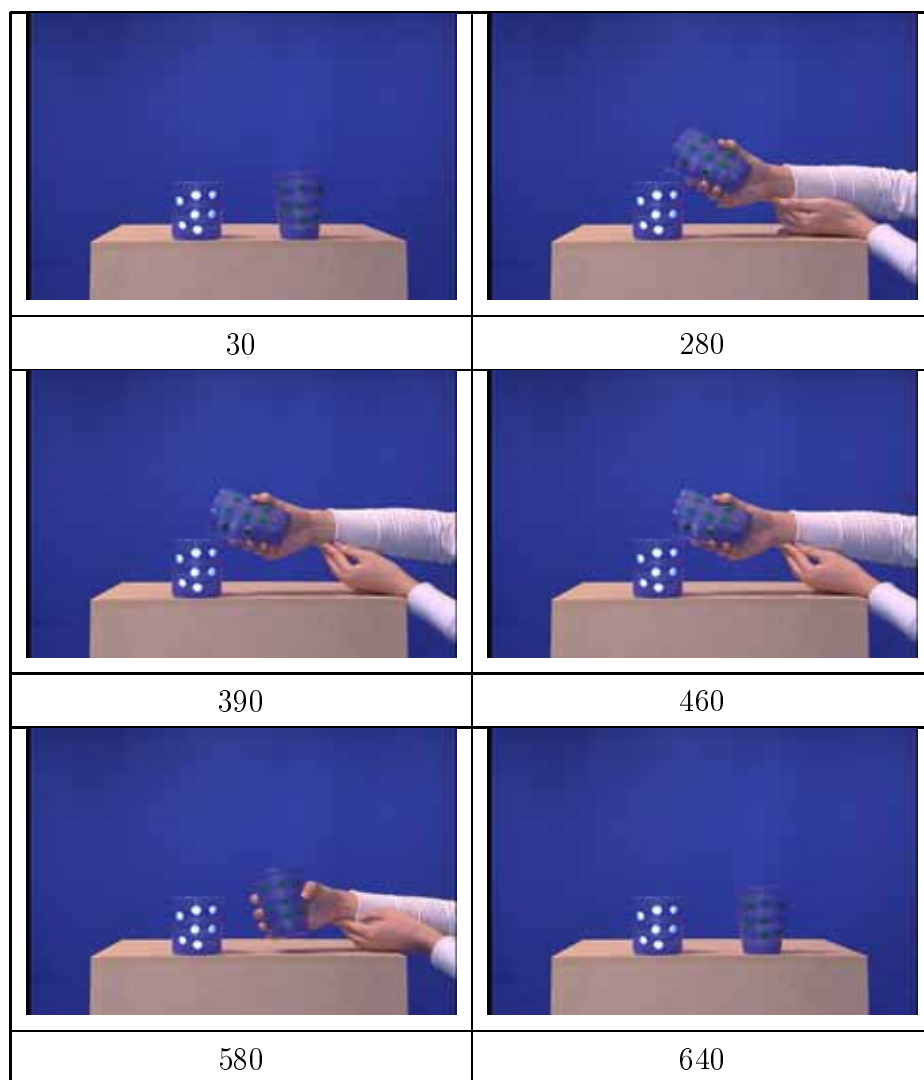


图 14: 实写映像

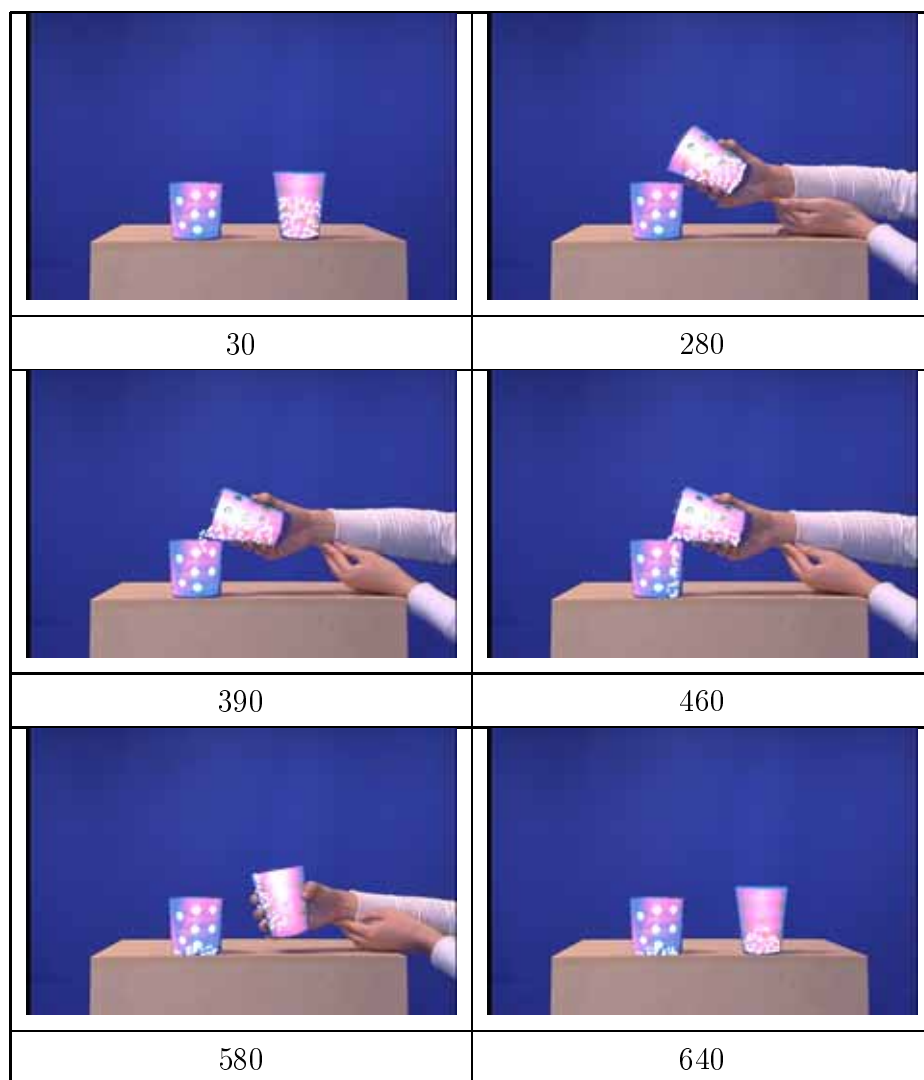


図 15: リアルタイム映像

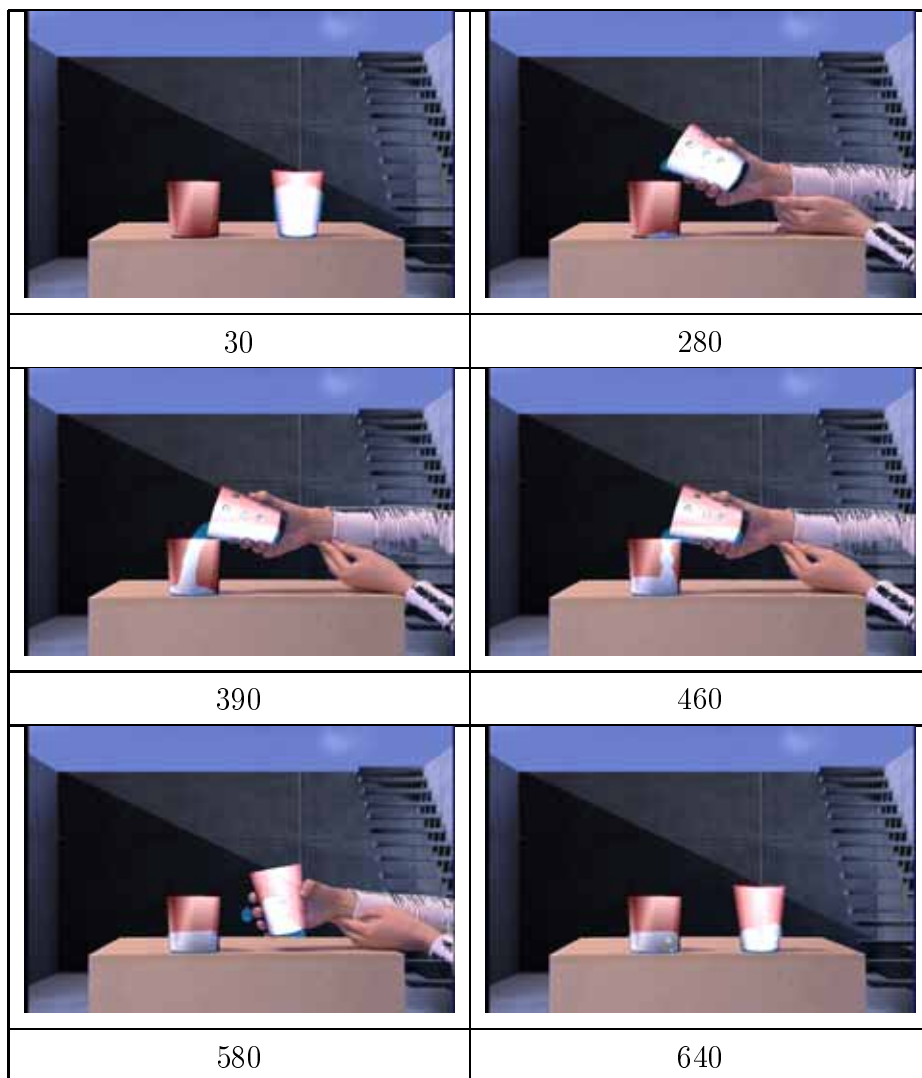


图 16: 視聽者用映像

場面があった。これは、仮想液体のシミュレーションに時間がかかり、仮想液体のシミュレーションに使用した容器の位置・姿勢の時刻と、その位置・姿勢を元にシミュレーションされた液体の描画される時刻がずれるからだと考えられる。この問題を解決するには、液体シミュレーションにかかる時間を短くする必要がある。しかし、計算速度を重視したシミュレーションを行うために仮想液体を構成する粒子数を減らしすぎると、液体らしいシミュレーションを行うことができない。今回は100個の粒子で仮想液体を構成したが、これ以上少ない粒子数で仮想液体を構成すると、リアルタイム映像を確認しても仮想液体の状態を把握することができない。そのため、粒子数をこれ以上減らすことは望ましくなく、ある程度の仮想容器と仮想液体のずれは不可避のものであると考えられる。ただし、仮想容器の動きはRealFlow4のキーフレーム機能によって連続的な運動に補間されているため、ずれが生じても仮想液体の挙動に大きな影響を及ぼさない。また、ずれが生じた場合、演者はリアルタイム映像を通してずれを確認することができる上、実際に生じたずれは最大約2秒程度のものであったので、演者が映像に合わせて容器の操作を待つなどの対処により、ずれの解消は容易であるので大きな問題にはならない。

また、演者が操作している容器と仮想容器の位置・姿勢にずれが生じることがあった。これは、SoftPOSITによる容器の位置・姿勢推定が前フレーム結果を元にした確率的な推定であることから生じると考えられる。SoftPOSITは、現フレームの容器は前フレームに位置していた場所の近傍にあるという仮定のもとに推定をおこなっているため、容器を急速に動かすと、容器の位置・姿勢推定を誤る可能性が高い。今回の実験では、演者が急速に容器を動かさないように注意することでこの問題を回避した。

第5章 結論

本研究では、注ぐ量を微調整するなどの細かい液体操作を仮想液体で行い、その合成映像を作成することを目的とし、バーチャルスタジオにおいて、現実の容器で仮想容器を操作することで、演者が仮想液体を間接的に操作することを実現した。仮想液体操作システムでは、演者が容器を直接手で動かすことによって仮想容器を操作して、仮想容器の位置・姿勢を元に仮想容器内にある仮想液体のシミュレーションを行う。さらに、演者と仮想容器・仮想液体の合成

映像をリアルタイムでフロアモニタを通して演者に提示することにより、仮想液体の状態を確認しながらの操作を実現した。

現実の容器を介した仮想液体操作を実現するため、現実の容器の位置・姿勢を検出し、その結果と仮想容器の位置・姿勢を一致させることで、演者の操作を仮想液体に反映させた。バーチャルスタジオでの撮影には、撮影映像に映りこむような装置を用いることができないので、非接触で容器の位置・姿勢を検出し、そこに仮想容器・仮想液体を重畳する必要がある。これに対し、POSIT アルゴリズムおよび SoftPOSIT アルゴリズムを利用することで、容器に貼られたマーカを用いて容器の位置・姿勢検出を行い、非接触での検出を実現した。

現実の容器を用いる本手法では、現実の容器を見ることで演者が仮想容器の位置・姿勢を目視で確認することができる。また、容器を直接手で扱うことで、仮想容器を直接持っているような触感を得ることもできる。これは、演者が仮想容器操作の演技を困難なく行うことができるという点で有効である。仮想容器の位置・姿勢を目視で確認することができても、仮想容器内の仮想液体の状態を把握できないという問題を、リアルタイムで合成映像を提示することで解決した。合成映像をリアルタイムで提示するため、演者用には計算速度を重視した合成映像を作成した。これにより、演者に仮想液体の状態を把握させ、演者による細かい液体操作を可能にした。その一方で視聴者用には品質を重視した合成映像をオフラインで作成し、演者用と視聴者用の合成映像を分けて作成することで、双方の要求を満たしたシステムを実現した。

仮想前景を実写映像に重畳する際、演者の指に容器の一部が遮蔽された場合にその指の部分にも仮想前景が重畳されることで、合成映像上で演者の指が切れる可能性がある。この問題を解決するために、青色領域のクロマキー処理によって得られたマスク画像を利用し、そのマスク画像上での白色領域に仮想前景を重畳する。これにより、演者領域である指の部分には仮想前景が重畳されず、合成映像上で演者の指が切れることはない。しかし、容器の一部である緑色マーカの部分にも仮想前景が重畳されない、という問題が起こる。これに対しては、緑色領域のクロマキー処理によって得られたマスク画像を利用し、そのマスク画像上での白色領域にも仮想前景を重畳することで対処している。

仮想液体のシミュレーションには、液体シミュレータを用いることで、撮影画像から離散的にしか得られない容器の運動を連続的なものとして扱い、仮想液体のシミュレーションを実現した。さらに、液体シミュレータ内の仮想液体

の各種パラメータを設定することにより，仮想液体の粘性などの性質や量を自由に設定することができ，多種多様な液体の表現が可能である．仮想液体の細かい操作を実現する本手法は，劇薬に対して注ぐ量の微調整などの細かい操作を必要とする理科実験などの教育用映像作成に有効である．

本稿では二つの容器を用いた実験を行ったが，シミュレーションの高速化のため，一つの容器しか動かないという前提の下で行われた．しかし，実際の理科実験では，複数の容器を操作することが想定される．多目的で使えるようなシステムにするため，使用する容器が全て動くという状況下でもシミュレーションを可能にすることが今後の課題である．また，仮想液体に化学反応などの特殊効果を付加させることも課題として挙げられる．本研究では，仮想液体の細かい操作の実現にとどまったが，理科実験の教育用映像の撮影を行う際，例えば仮想液体の色が変化するなどの化学反応の表現が必要になる場合がある．理科実験には，注ぐ量を微調整する操作だけでなく，仮想容器内の仮想液体を棒でかき混ぜる操作や，仮想液体が入っている仮想容器に別の仮想液体を注ぎ入れる操作などが想定され，これらの操作を受けて，仮想液体の色や粘性などが変わることが予想される．これらを実現するには，仮想液体の変色や変質の表現が必要であると考えられる．

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導を賜りました美濃導彦教授，角所孝准教授に深謝いたします．また，実装面に関する支援や本稿に対する校正など，あらゆる面でご指導下さいました船富卓哉助教，飯山将晃講師に深く感謝いたします．グループミーティングなどで様々なアドバイスを下さいました早瀬直之氏をはじめとするモデルグループの皆様，研究を進めるにあたり様々な面でご協力をいただいた美濃研究室の皆様に感謝の意を表します．

参考文献

- [1] 三武裕玄，青木孝文，浅野一行，遠山喬，長谷川晶一，佐藤誠：キャラクターとの物理的なインタラクションのための剛体モデルと多次元キーフレームアニメーションの連動による動作生成法，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.12，No.3，pp.437-446（2007）

- [2] 大島康介, 船富卓哉, 飯山将晃, 角所考, 美濃導彦: バーチャルスタジオにおける現実物体を用いた仮想物体の直接操作, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 (2006)
- [3] 舟橋健司, 岩堀祐之: 仮想容器による仮想液体の対話操作モデルと一実現法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.4 (2000)
- [4] D.F.DeMenthon and L.S.Davis "Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code". Computer Vision-ECCV 92, Lecture Notes in Computer Science 588 : pp.335-343, Springer-Verlag, 1992
- [5] Philip David, Daniel DeMenthon, Ramani Duraiswami and Hanan Samet "SoftPOSIT: Simultaneous Pose and Correspondence Determination". International Journal of Computer Vision Volume 59, Number 3 / September, 2004 : pp.259-284, SpringerLink, 2004
- [6] Next Limit Technologies 社 RealFlow4
<http://www.realflow.com/index.htm>