

修士論文

バーチャルスタジオにおける
再帰性反射材を用いた
演技支援情報の指向性表示

指導教員 美濃 導彦 教授

京都大学大学院情報学研究科
修士課程知能情報学専攻

早瀬 直之

平成21年2月6日

バーチャルスタジオにおける再帰性反射材を用いた 演技支援情報の指向性表示

早瀬 直之

内容梗概

バーチャルスタジオを教育映像の撮影に利用すれば、CGによる特殊効果が加わった三次元の仮想物体を教材として利用できるため、視認性の高い教育映像を作成できる。このとき、教師である演者による説明に迫真性をもたせるためには、演者が仮想物体の説明箇所を直接見て判断し、その説明箇所を視聴者に見せるための並進・回転という直接操作を交えた主体的な説明が要求される。

演者が三次元の仮想物体を直接操作できるようにするため、仮想物体と同形の現実物体を導入し、実写映像中の現実物体を仮想物体に置き換えるという手法がある。この手法では、演者が特定色の現実物体を直接操作する様子をカメラで撮影し、実写映像の特定色領域に仮想物体を重畳することで目的を達成している。しかし、現実物体は単色であることから、演者は仮想物体の説明箇所を直接見ることができないので、演者は主体的に説明することができない。

本研究では、演者が仮想物体の説明箇所を直接見られるようにするため、現実物体に仮想物体のテクスチャ（演技支援情報）を投影する。但し、演技支援情報が実写映像に映り込むと現実物体領域が特定色ではなくなるため、過不足なく仮想物体を重畳できない。また、現実物体に対する演者の視線方向と投影方向が異なると、演者には演技支援情報が投影されない部分が見えてしまう。

本研究では、演者が物体を説明対象として説明する場面において物体に対する演者とカメラの視線方向は異なるという一般的事実に基づき、再帰性反射材を貼付した現実物体に演者の側から演技支援情報を投影することで、演技支援情報の実写映像への映り込みを回避する。また、カメラ・演者・物体の位置関係、再帰性反射材の反射輝度分布、演者の手の動きを基に、演者の身体による遮蔽が発生しない演者後方の投影位置を特定することで、演者の視線方向と投影方向を一致させる。

提案手法の有効性を検証するため、演者の視点位置の近傍に設置したカメラとスタジオカメラの2台のカメラで現実物体を観測し、それぞれのカメラから得られる映像を目視で定性的に評価した。その結果、演技支援情報が演者には視認可能でスタジオカメラには撮影不可能となっていることを確認した。

Directional Display of Visual Action Guide by Projecting onto Retro-reflective Object in a Virtual Studio

Naoyuki HAYASE

Abstract

This paper discusses creating synthetic videos in which an actor as a teacher explains about an educational material in the form of a 3D virtual object on his/her own initiative in a virtual studio. When we produce such videos, two functions are simultaneously required. One is the function that enables the actor to manipulate the virtual object by his/her hand in order to show an explanation area to viewers. The other is the function that enables the actor to see the virtual object in order to find the area.

In this study, we propose that the actor manipulate a real object in a specific color called a key color with the same size and shape as the virtual object. The real object is replaced with the virtual object based on the key color by a technique called chromakeying. The movement of the real object is reflected in that of the virtual object in order to enable the actor to manipulate the virtual object. In addition, we project the texture of the virtual object, which we call a visual action guide (VAG), onto the real object in order to enable the actor to see the virtual object. If the VAG is captured by a studio camera, the real object cannot be replaced with the virtual object by chromakeying because the real object has various colors, none of which is the key color.

In this study, we cover the real object with retro-reflective material, which reflects an incident ray at an angle similar to the angle of incidence, and project the VAG onto the real object along with the direction coinciding with the actor's line of sight. This projection system enables VAG to be visible to the actor and invisible when seen through the camera.

We verified the effectiveness of our method by observing the real object from the actor's and camera's viewpoints respectively. As a result, the VAG is visible to the actor and invisible through the camera.

バーチャルスタジオにおける再帰性反射材を用いた 演技支援情報の指向性表示

目次

第1章	緒論	1
第2章	バーチャルスタジオにおける教育映像撮影	5
2.1	バーチャルスタジオにおける合成映像作成	5
2.2	バーチャルスタジオの問題点	7
2.3	現実物体を用いた仮想物体の直接操作	8
2.4	現実物体への演技支援情報の投影による視覚提示	11
第3章	再帰性反射材への投影による演技支援情報の指向性表示	14
3.1	システムの設計方針	14
3.1.1	カメラ・演者・物体の位置関係	14
3.1.2	再帰性反射材の反射輝度分布	16
3.2	システム構成	17
3.3	演技支援情報の指向性表示	19
3.3.1	現実物体の三次元形状計測	20
3.3.2	プロジェクタとカメラのキャリブレーション	21
3.3.3	現実物体の位置・姿勢推定	22
3.3.4	仮想物体の描画と演技支援情報の投影	24
第4章	実験	25
4.1	実験環境	25
4.2	実験結果	26
第5章	関連研究	31
5.1	視界制御による指向性表示	31
5.2	時分割制御による指向性表示	33
第6章	結論	35
	謝辞	36
	参考文献	37

第1章 緒論

近年のマルチメディア技術の普及により，CGによる特殊効果を取り入れた映像コンテンツの作成が可能となった．例えば，テレビの気象情報番組では，CGで作成した天気図を説明対象に用いて，気象予報士が各地の気温や気圧配置の遷り変わりを説明しているような映像が作成されている．このような映像は，CGで作成した仮想物体のセット（以下，“仮想セット”と呼ぶ）と，カメラで獲得される実写映像の合成が可能なバーチャルスタジオ [1] という撮影環境で作成されている．バーチャルスタジオでは，演者をカメラで撮影することで獲得される実写映像から特定色の背景領域を抜き去ることで演者領域を抽出し，その演者領域を仮想セットに重畳することにより，仮想セットの中に演者が存在しているような映像が合成される．合成された映像は視聴者に配信される一方，スタジオ内の床上にあるフロアモニタにも映し出され，演者はフロアモニタを確認しながら自らが仮想セットの中に存在しているかのように演技を行う．

本研究では，このバーチャルスタジオを教育映像コンテンツの作成に利用することを考える．具体的には，バーチャルスタジオにおいて特殊効果が加わった三次元の仮想物体を教材に用いながら，教師である演者が主体的に説明を行うような教育映像を撮影し，その映像を教育用コンテンツとして利用する．バーチャルスタジオでは三次元の仮想物体を説明対象として利用できるため，スライドやディスプレイなどによる二次元の表現では説明が困難であったような説明対象を視覚的に分かりやすく提示できる．また，仮想物体に対して説明箇所のハイライト表示や，表面のテクスチャの時間変化などの特殊効果を加えられるため，映像としての視認性を高めることも可能である．しかし，演者が仮想物体の説明箇所を自ら判断して，その説明箇所を視聴者に見せるための並進・回転という操作を交えた主体的な説明は実現できない．このような演者による主体的な説明を実現するためには，演者が仮想物体の説明箇所を直接見ることと，演者が仮想物体を手を持ちながら操作すること（以下，“直接操作”と呼ぶ）が同時に要求される．

演者が仮想物体の説明箇所を直接見るためには，演者視点からの仮想物体の見えに関する情報（以下，“演技支援情報”と呼ぶ）を演者に提示する必要がある．この演技支援情報は，演者視点からの仮想物体の形状・位置・姿勢に関する幾何学的情報と，演者視点からの仮想物体のテクスチャに関する光学的情報

に分類され、これらを演者に対して同時に提示する必要がある。しかし、フロアモニタによる視覚提示では、フロアモニタに映し出される映像はカメラ視点の映像であり演者視点の映像とは異なるため、演者は仮想物体の説明箇所を直接見ることができない。一方、演者が仮想物体を直接操作するためには、操作の手掛かりとなる触覚を演者に提示した状態で、システムが演者の手の動きを基に仮想物体の動きを生成する必要がある。しかし、仮想物体はバーチャルスタジオには存在しない架空の物体であるため、演者は仮想物体を触ることができない。また、バーチャルスタジオには演者の手の動きを計測する機能がないため、演者の手の動きを基に仮想物体の動きを生成することはできない。

演者が三次元の仮想物体を直接見ながら直接操作できるようにするため、大島ら [2] はバーチャルスタジオに仮想物体と同じ形状の現実物体を導入し、その現実物体を仮想物体に置き換える手法を提案している。この手法では、演者は特定色の現実物体を直接操作し、その現実物体と同じ位置・姿勢の仮想物体を実写映像中の特定色領域に重畳する。さらに、演者による現実物体の指示を検出し、それに合わせて仮想物体に特殊効果を加える。このような処理により、演者が特殊効果の加わった三次元の仮想物体を直接見ながら直接操作するような説明映像を作成している。大島らの手法を本研究の目的に照らして考えると、演者が直接見る現実物体は単色であり、仮想物体のテクスチャに関する光学的情報を演者に提示できていないので、演者に対する演技支援情報の提示は実現されていない。これが原因となり、演者は仮想物体の説明箇所を直接見ることができないので、主体的な説明を行うことはできない。これに対し、仮想物体のテクスチャ（以下、従来手法との差分である仮想物体のテクスチャを“演技支援情報”と呼び直す）を現実物体上に表示することで大島らの手法を拡張できれば、演者は仮想物体を直接操作できるだけでなく、仮想物体の説明箇所を直接見られるので、演者は主体的に説明を行うことが可能となる。

本研究では、プロジェクタから現実物体に演技支援情報を投影することで、演技支援情報を現実物体上に表示する。但し、現実物体に投影した演技支援情報がカメラで撮影され実写映像に映り込むと、実写映像の現実物体領域が特定色ではなくなるため、現実物体領域を過不足なく検出することができない。これが原因となり、仮想物体を現実物体領域に過不足なく重畳することができない。また、演者の視点位置と異なる位置から現実物体に演技支援情報を投影すると、現実物体は三次元の立体構造をもつため、演者視点からは演技支援情報が投影

されない部分が見えてしまう．そこで本研究では，演技支援情報がカメラには撮影されない一方，演者には欠損なく視認できるように，現実物体に演技支援情報を投影することを考える．

複合現実感の分野では，現実世界の映像に仮想世界の映像を重畳して表示する際，現実物体と仮想物体の奥行き関係が矛盾した状態でユーザに視覚提示されるという遮蔽矛盾問題の解決を目的として，プロジェクタと再帰性反射材を組み合わせた視覚提示手法 [3] が提案されている．この手法では，光の入射方向にのみ光を反射するという再帰性反射材の性質を考慮し，再帰性反射材を貼付した現実物体に対して，ハーフミラーを介してユーザの視点と光学的に共役な位置から仮想物体の画像を投影することで遮蔽矛盾問題を解決している．上述のような再帰性反射材の性質は，換言すれば，光の入射方向以外の方向には光を反射しないという性質である．本研究ではこの性質と，スタジオ撮影での物体に対する演者とカメラの視線方向は異なるという一般的事実を考慮し，再帰性反射材を貼付した現実物体に対して演者の側から演技支援情報を投影する．このような投影方式により，現実物体に入射した光が演者の方向には反射する一方，カメラの方向には反射しないという投影光の反射方向に関する制御が可能となるため，演技支援情報の実写映像への映り込みを回避することができる．

上述のような投影方式において，演者の視点位置から投影すれば，演者視点からは演技支援情報が欠損なく見えるように表示できる．しかし，ハーフミラーやプロジェクタの機器本体が映像に映り込むと，視聴者に違和感を与えてしまうため，演者の視点位置から投影することはできない．そこで，プロジェクタが映像に映り込まないように演者の頭部の後方から演技支援情報を投影する．この場合，演者の頭部によって遮蔽が発生し，さらに演者の頭部や現実物体の移動に伴って遮蔽位置も移動するため，演技支援情報を現実物体上に表示できなくなると危惧される．この問題に対しては，スタジオ撮影におけるカメラ・演者・物体の位置関係，再帰性反射材の反射輝度分布，演者の手の動きを基に，遮蔽が発生しないように投影位置を工夫することで対処する．すなわち，カメラ・演者・物体の位置関係を利用して現実物体の位置を絞り込み，再帰性反射材の反射輝度分布を分析して演者が演技支援情報を視認できるような投影位置を絞り込み，さらに演者の手の動きを考慮して遮蔽が発生しないような投影位置を特定することで，上述の問題に対処する．

本論文ではまず第 2 章で，教育映像を撮影するためのバーチャルスタジオの

利用方法について述べる．第3章では本研究で提案するシステムの具体的な実現方式について述べる．第4章では，そのシステムの有効性を確認するために実施した実験について述べる．第5章では目標となるシステムの機能と関連する従来手法を整理し，提案手法との比較を行う．最後の第6章で本研究をまとめると共に，今後の課題について議論する．

第2章 バーチャルスタジオにおける教育映像撮影

2.1 バーチャルスタジオにおける合成映像作成

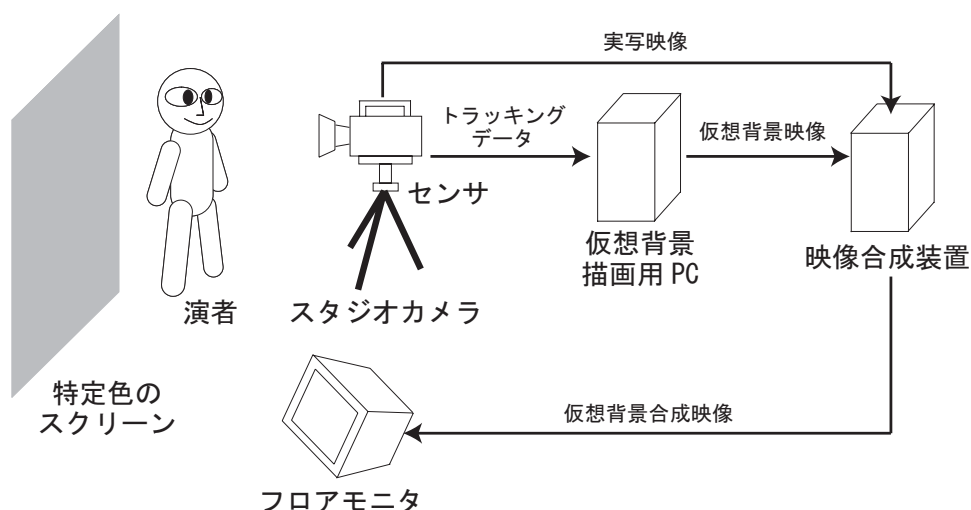


図1: バーチャルスタジオのシステム構成

バーチャルスタジオとは、仮想セットの背景映像（以下、“仮想背景映像”と呼ぶ）と実写映像の合成が可能な撮影環境である。バーチャルスタジオのシステム構成を以下に示す（図1）。

スタジオの床と壁は特定色のスクリーンで覆われており、センサを搭載したスタジオカメラでスタジオ内の演者を撮影することで実写映像が得られる。一方、センサによって獲得されるスタジオカメラの位置・方向・ズーム値などを表すトラッキングデータが仮想背景描画用PCに送られ、トラッキングデータを基に仮想背景映像が生成される。これらの実写映像と仮想背景映像を映像合成装置で合成することによって、視聴者に配信するための仮想セットを背景とした演者の合成映像（以下、“仮想背景合成映像”と呼ぶ）が生成される。

仮想背景映像と実写映像の合成過程は以下の通りである（図2）。まず、実写映像を入力として、映像中の特定色領域を表す白黒映像（以下、“キー映像”と呼ぶ）を生成する。このとき、演者領域を表すキー映像と背景領域を表すキー映像を生成する。次に、演者領域を表すキー映像を用いて実写映像にマスク処理を適用することで、演者領域の映像が得られる。また、背景領域を表すキー映像を用いて仮想背景映像にマスク処理を適用することで、背景領域の映像が

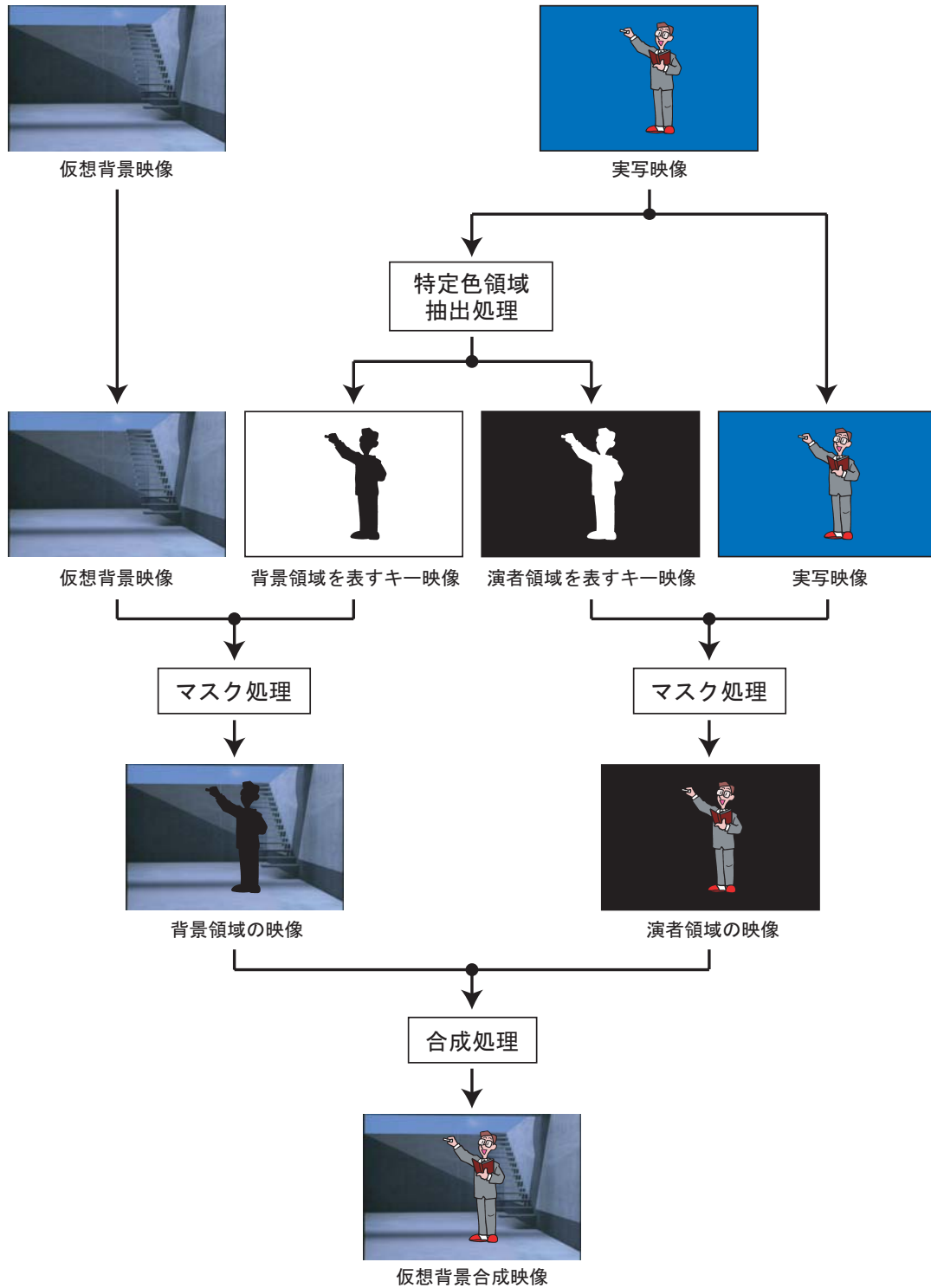


図2: 仮想セットと演者のクロマキー合成

得られる．最後に，これらの映像を合成することで仮想背景合成映像が生成される．

仮想背景合成映像は視聴者に配信される一方，スタジオ内の床上にあるフロアモニタにも表示され，演者は必要に応じてフロアモニタを確認しながら，演者自身が仮想世界の中に存在しているかのように演技を行う．以上のような処理により，バーチャルスタジオでは現実世界と仮想世界を融合し，現実物体と仮想物体の両者を区別なく視聴者に提示することができる．

2.2 バーチャルスタジオの問題点

2.1 節で述べた従来のバーチャルスタジオには以下のような問題がある．

まず，仮想物体はバーチャルスタジオには存在しない架空の物体であるため，演者は仮想物体を直接見ることができない．従来から用いられているフロアモニタによる視覚提示では，フロアモニタに映し出される映像はカメラ視点の映像であり演者視点の映像とは異なるため，演者は仮想物体の説明箇所を直接見ることができない．別の視覚提示方法として，拡張現実感の分野で用いられるヘッドマウントディスプレイ（HMD: Head Mounted Display）を演者に装着させる方法が考えられる．HMDとはユーザの頭部に装着する眼鏡のような視覚提示装置であり，ユーザの見る現実世界の映像に仮想世界の映像を重畳して表示することができる．バーチャルスタジオにおいて演者にHMDを装着させ，演者の頭部の位置・向きを計測し，その位置・向きに応じた仮想世界の映像を現実世界の映像に重畳して表示することで，演者視点からの仮想物体の見えを提示することができる．しかし，演者がHMDのような見慣れない装置を装着していると，映像を見る視聴者に対して違和感を与えることになるため，演者にHMDを装着させることはできない．

次に，上述の問題と同様，仮想物体はバーチャルスタジオには存在しない架空の物体であるため，演者は仮想物体に触ることができない．仮想物体の触覚を提示するため，仮想現実感の分野で用いられる触力覚提示型のデータグローブ [4] を演者に装着させる方法が考えられる．触力覚提示型のデータグローブとはユーザの手に装着する手袋のような触力覚提示装置であり，ユーザの手の姿勢の計測と，その姿勢に応じた仮想物体の触力覚を提示することができる．バーチャルスタジオにおいて演者に触力覚提示型のデータグローブを装着させ，演者の手の姿勢に応じた仮想物体の触力覚を提示することで，演者が仮想物体を

触ることができる。しかし、上でも述べたように、演者がそのような見慣れない装置を装着していると、視聴者に対して違和感を与えることになるため、演者に触力覚提示型のデータグローブを装着させることはできない。

さらに、バーチャルスタジオには演者の手の動きを計測する機能がないため、システムが演者の手の動きを基に仮想物体の動きを生成することはできない。したがって、もし仮想物体の動きを伴う映像を作成するならば、従来は以下の二つの方法の何れかをとる必要があった。一つは、振舞いが事前に決定されている仮想物体を用意し、その振舞いに合わせて演者が仮想物体を操作する演技を行うという方法であり、もう一つは、演者が仮想物体を操作する演技に合わせて、スタジオ技術者が仮想物体の振舞いを生成するという方法である。前者の方法では、演者が仮想物体を操作する演技を撮影の前に練習する必要がある。一方、後者の方法では、演者の演技に合わせて仮想物体の振舞いを生成するために、スタジオ技術者の協力を必要とする。しかし、何れの方法においても、演者の手の動きと仮想物体の動きを整合させることは困難である。

上述のようなバーチャルスタジオの問題点を解決できれば、演者は仮想物体の説明箇所を直接見て、仮想物体を直接操作できるので、演者による主体的な説明が可能となる。また、三次元の仮想物体を用いた説明を行うことで、スライドやディスプレイなどによる二次元表現では説明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。さらに、仮想物体に対して説明箇所のハイライト表示や、表面のテクスチャの時間変化など、CGによる様々な特殊効果を加えることにより、説明映像としての視認性を高めることもできる。

2.3 現実物体を用いた仮想物体の直接操作

演者が三次元の仮想物体を直接見ながら直接操作できるようにするため、大島ら [2] はバーチャルスタジオ (図1) に仮想物体と同じ形状の現実物体を新たに導入し、実写映像中の現実物体を仮想物体に置き換える手法を提案している。この手法では、演者が直接操作する現実物体に貼付したマーカの見えを基に、現実物体の動きを仮想物体の動きに反映させる。また、仮想背景描画用 PC で生成した仮想背景映像を映像合成装置で実写映像と合成する代わりに、仮想前景描画用 PC で仮想背景映像と実写映像と仮想物体の前景映像 (以下、“仮想前景映像” と呼ぶ) を合成する。大島らのシステムの構成を以下に示す (図3)。

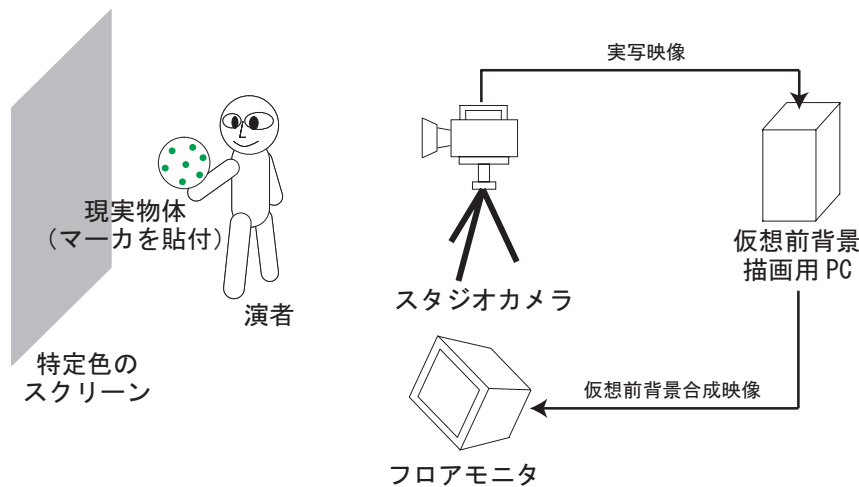


図 3: 仮想物体の直接操作が可能なバーチャルスタジオのシステム構成

演者が特定色の現実物体を直接操作しながら説明の様子をスタジオカメラで撮影し、それによって得られる実写映像が仮想前背景描画用 PC に送られる。さらに実写映像に対して、特定色の背景領域に固定の仮想セットを、別の特定色の現実物体領域に現実物体と同じ位置・姿勢の仮想物体をそれぞれ重畳することで、仮想セットを背景として演者が仮想物体を直接操作しているような合成映像（以下、“仮想前背景合成映像”と呼ぶ）が得られる。

仮想背景映像と実写映像と仮想前景映像の合成過程は以下の通りである（図 4）。まず、仮想背景映像と実写映像を図 2 の流れで合成し、仮想背景合成映像を獲得する。また、実写映像を入力として、現実物体の領域を表すキー映像とそれ以外の領域を表すキー映像を生成する。次に、現実物体領域を表すキー映像を用いて仮想前景映像にマスク処理を適用することで、前景領域の映像が得られる。また、現実物体以外の領域を表すキー映像を用いて仮想背景合成映像にマスク処理を適用することで、背景と演者の領域の映像が得られる。最後に、これらの映像を合成することで、仮想前背景合成映像が得られる。

大島らの手法では、演者は自らの手で現実物体を操作することで間接的に仮想物体を操作するので、演者に対する触覚の提示と、演者の手の動きを基にした仮想物体の動きの生成は達成されている。しかし、現実物体は単色であり、仮想物体のテクスチャとは異なるため、演者は仮想物体のテクスチャを把握できない。演者が仮想物体のテクスチャを把握できるように、現実物体に目印を付与することも考えられるが、テクスチャが時間変化するような仮想物体を説明

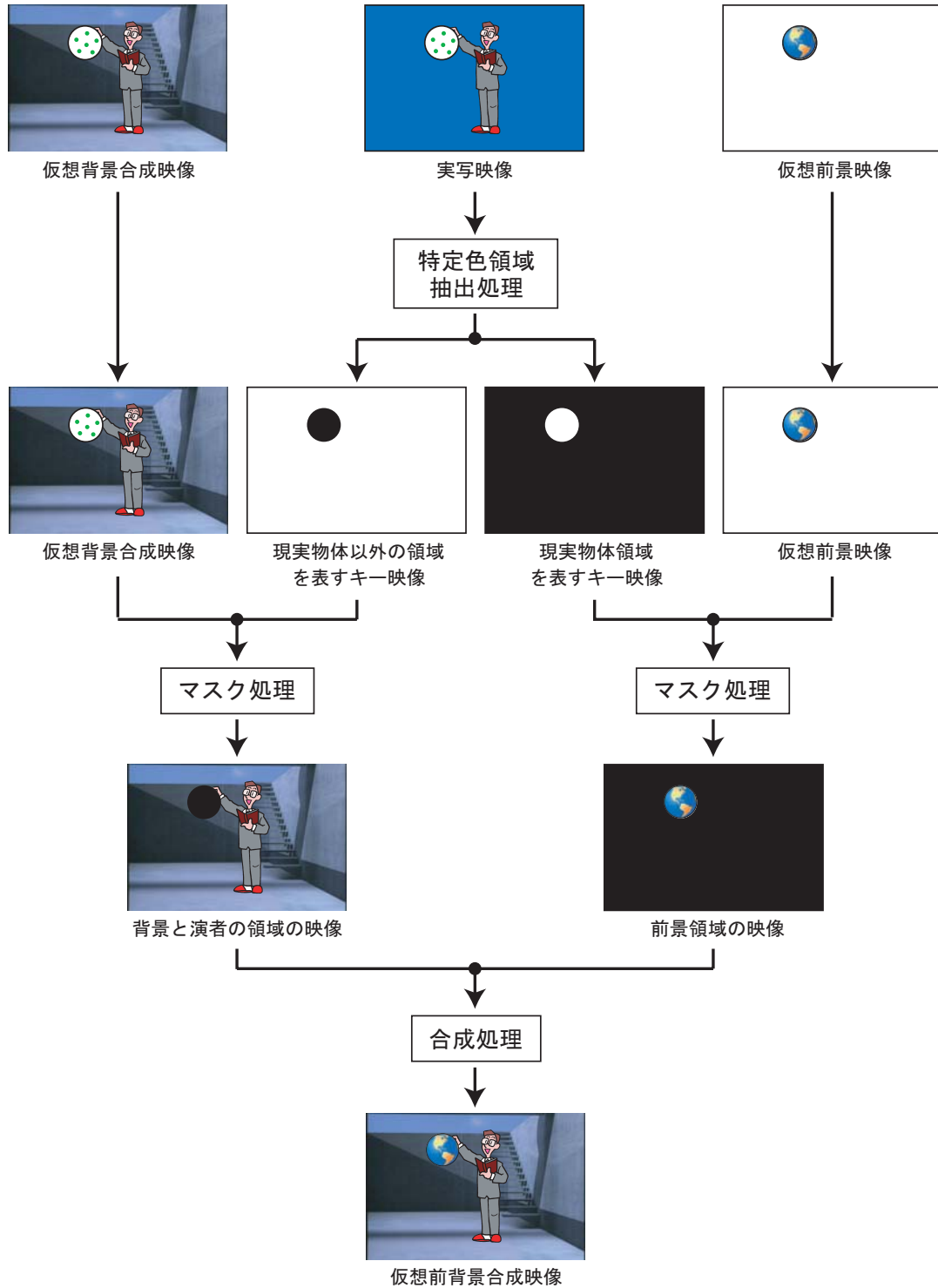


図 4: 仮想セットと演者と仮想物体のクロマキー合成

対象に用いる場合には、演者は目印からテクスチャを想起するのは困難である。したがって、大島らの手法では演者視点からの仮想物体の見えを演者に提示できないので、演者は主体的に説明の演技を行うことができない。

2.4 現実物体への演技支援情報の投影による視覚提示

2.3節で述べた問題を解決するための手法として、プロジェクタから現実物体に演技支援情報を投影することが考えられる。これにより、演者は仮想物体を直接操作できるだけでなく、仮想物体の説明箇所を直接見ることができるので、演者は主体的に説明を行うことが可能となる。但し、演者の視点位置と異なる位置から現実物体に演技支援情報を投影すると、現実物体は三次元の立体構造をもつため、演者視点からは演技支援情報が投影されない部分が見えてしまい、演技の支援としての役割を著しく損なう。また、現実物体に投影した演技支援情報が実写映像に映り込むと、実写映像の現実物体領域が現実物体を特定するための色だけでなく様々な色になるため、現実物体領域を過不足なく検出することができない。これが原因となり、本来は仮想物体で重畳されて隠蔽されるべき現実物体が仮想前背景合成映像に現れるので、視聴者に映像としての違和感を与えてしまう。

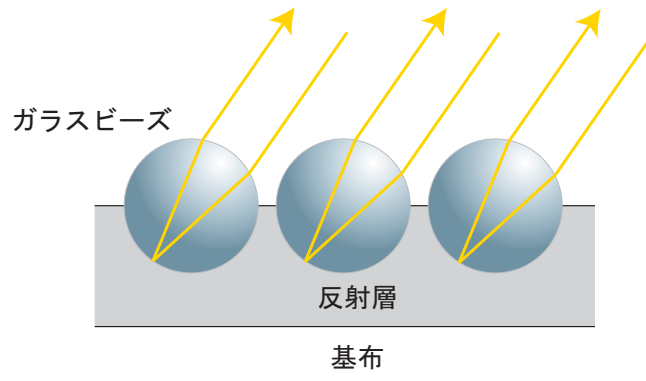


図 5: 再帰性反射の原理

複合現実感の分野では、現実世界の映像に仮想世界の映像を重畳して表示する際、仮想物体と現実物体の奥行き関係が矛盾した状態で視覚提示されるという遮蔽矛盾問題の解決を目的として、プロジェクタと再帰性反射材を組み合わせた視覚提示手法が提案されている [3]。再帰性反射材とは、表面に微細なガラ

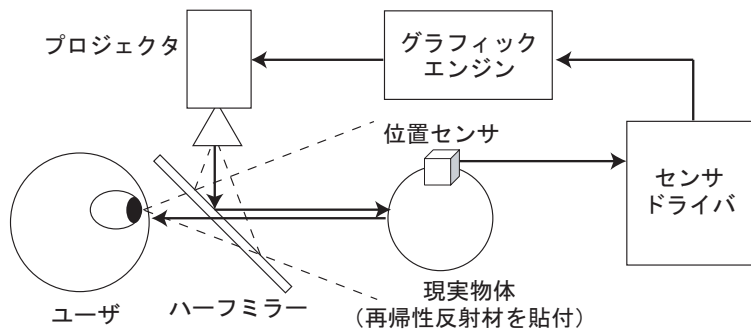


図6: オブジェクト指向型ディスプレイ [3]

スピーズが敷き詰められており、入射した光をガラススピーズの表面と内部で屈折・反射させることで、入射方向に強く光を反射する素材である（図5）。このような再帰性反射材の性質を考慮し、再帰性反射材を貼付した現実物体に対してユーザの視点位置から仮想物体の画像を投影すれば、再帰性反射材の領域では投影光がユーザの視点位置に強く反射する一方、その他の領域では投影光が拡散するため、ユーザには再帰性反射材の領域の方がその他の領域よりも仮想物体の像が鮮明に見える。しかし、当然プロジェクタには大きさがあるため、ユーザの視点位置にプロジェクタを設置することは物理的に不可能である。そこで、上述の手法では、ハーフミラーを介してユーザの視点位置と光学的に共役な位置にプロジェクタを設置することで視点位置と投影位置を分離し、その下で現実物体に仮想物体の画像を投影している（図6）。このような投影方式により、ユーザは再帰性反射材に投影された仮想物体の像をユーザの手などの現実物体で遮蔽できるので、遮蔽矛盾問題の解決が可能となる。

上述のような再帰性反射材の性質は、換言すれば、光の入射方向以外の方向には光を反射しないという性質である。また、スタジオ撮影において演者が説明を行う場面では、演者の視線方向とカメラの視線方向は異なるという性質がある。本研究ではこれらを考慮し、再帰性反射材を貼付した現実物体に対して演者の側から演技支援情報を投影する。このような投影方式により、光が演者の方向には反射する一方、カメラの方向には反射しないという制御が可能となるため、演技支援情報の映り込みを回避することができる。

上述のような投影方式において、ハーフミラーを用いてユーザの目と光学的に共役な位置から投影すれば、演者視点からは欠損なく見えるように演技支援情報を表示できる。しかし、ハーフミラーやプロジェクタの機器本体が映像に

映り込むと、視聴者に違和感を与えてしまうため、ハーフミラーを用いることはできない。そこで、プロジェクタが映像に映り込まないように演者の頭部の後方から演技支援情報を投影することになる。この場合、演者の頭部によって遮蔽が発生し、さらに演者の頭部や現実物体の移動に伴って遮蔽位置も移動するため、演技支援情報を現実物体上に表示できなくなると危惧される。続く第3章では、この問題に対処するための投影位置について議論する。

第3章 再帰性反射材への投影による演技支援情報の指向性表示

3.1 システムの設計方針

第2章でも述べたように，演者の後方から演技支援情報を投影する場合，現実物体とプロジェクタの間に演者の身体などの遮蔽物が存在すると，本来は現実物体上に表示されるべき演技支援情報が表示されなくなる．この問題を回避するためには，以下の要件を満たすようにプロジェクタを配置する必要がある．

まず，演者の身体による遮蔽が発生しないように，演技支援情報の投影方向を演者の視線方向から遠ざける必要がある．次に，演技支援情報が欠損して見えないように，演技支援情報の投影方向を演者の視線方向に近づける必要がある．最後に，演技支援情報が実写映像に映り込まないように，演技支援情報の投影方向をカメラの視線方向から遠ざける必要がある．

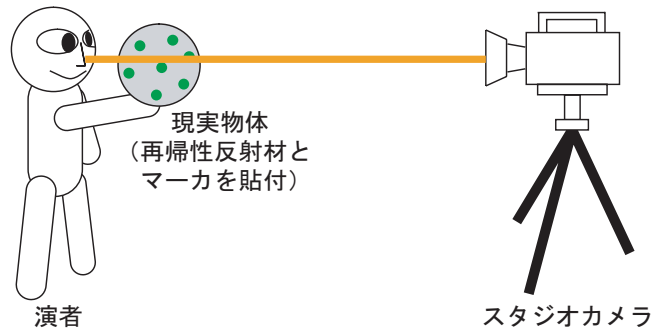
本研究では，3.1.1節で述べるスタジオ撮影でのカメラ・演者・物体の位置関係を利用し，3.1.2節で述べる再帰性反射材の反射輝度分布を分析した上で，上述の要件を満たすような投影位置を特定する．

3.1.1 カメラ・演者・物体の位置関係

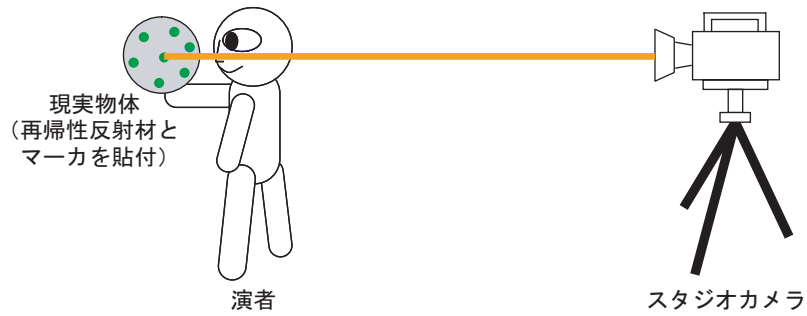
スタジオ撮影において演者が物体の説明を行うような場面では，無闇にカメラワークを行ったり，演者がスタジオ内を動き回ると，映像を見る視聴者はそれらの動きに気をとられ，演者による説明に集中することができない．そのため，説明映像を撮影する場合にはカメラワークを行わず，演者は動き回らずにその場で説明することが一般的である．これに対し，演者による直接操作によって現実物体の位置は変動する．このときのカメラ・演者・現実物体の位置関係を3つに分類し（図7），以下でそれぞれについて議論する．

まず，カメラと演者の間に現実物体があるような位置関係を考える（図7(a)）．このような位置関係の場合，演者は現実物体をカメラの方に向けているため，演者から見える物体の箇所とカメラから見える物体の箇所は重複しない．そのため，演者は直接見ることのできない箇所を説明することになるため，映像を見る視聴者に違和感を与えてしまう．したがって，図7(a)のような位置関係は妥当ではない．

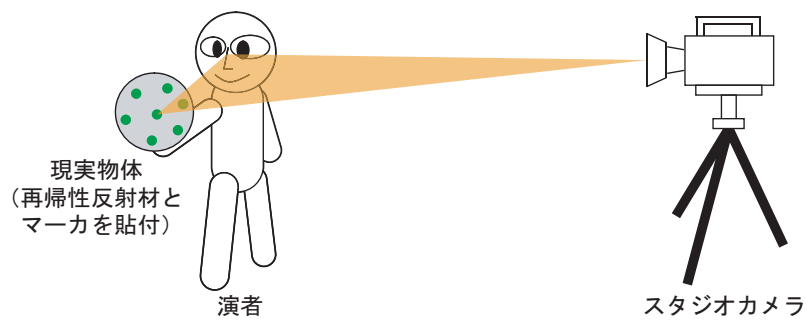
次に，演者を挟んでカメラの反対側に現実物体があるような位置関係を考え



(a) 演者・現実物体・カメラと直線状に並ぶ位置関係



(b) 現実物体・演者・カメラと直線状に並ぶ位置関係



(c) カメラ・演者・現実物体が直線状に並ばない位置関係

図 7: カメラ・演者・物体の位置関係

る(図7(b))。このような位置関係の場合、演者は現実物体をカメラの反対側に向けているため、カメラからは演者の身体によって現実物体が遮蔽されるように見える。そのため、視聴者は仮想物体を見ることができない。したがって、図7(b)のような位置関係も妥当ではない。

最後に、カメラと演者を結ぶ直線以外の位置に現実物体があるような位置関係を考える(図7(c))。このような位置関係の場合、演者から見える物体の箇所とカメラから見える物体の箇所は重複し、さらにカメラからは演者の身体によって現実物体が遮蔽されずに見える。したがって、図7(c)のような位置関係が妥当である。

以上の議論に基づいて、本研究ではカメラと演者の位置は固定、現実物体の位置は変動すると仮定し、さらにカメラと演者を結ぶ直線以外の位置に現実物体があると仮定する。これにより、プロジェクタは演者の後方に設置するため、演技支援情報の投影方向をカメラの視線方向から遠ざけるという要件は満足される。一方、それ以外の2つの要件は相矛盾する要件であるため、両者の要件をある程度満足するように演技支援情報の投影方向を調整する必要がある。すなわち、演者の身体による遮蔽が発生せず、演技支援情報が欠損して見えないように投影方向を調整する必要がある。このためには、現実物体に貼付する再帰性反射材の反射輝度を分析する必要があるので、続く3.1.2節でこの分析について述べる。

3.1.2 再帰性反射材の反射輝度分布

再帰性反射材は光の入射方向に強く光を反射するという性質をもつが、実際には入射方向だけでなくそれ以外の方向にもある程度光を反射する。そこで、再帰性反射材の反射特性を分析するための実験を行った。

暗室の壁面に固定した再帰性反射材(レフライト社製#9301)に対して白色光源から光を照射し、再帰性反射材の基準点の反射輝度を色彩輝度計(コニカミノルタ製CS-200)で計測する(図8)。このとき、白色光源と基準点を結ぶ直線の入射方向、色彩輝度計と基準点を結ぶ直線の入射方向を反射方向と定め、入射方向と反射方向のなす角度(以下、“見込み角”と呼ぶ)と入射角を変えながら基準点の反射輝度を計測する。なお、白色光源と基準点との距離、色彩輝度計と基準点との距離は共に一定である。

上述のような計測の結果、再帰性反射材の見込み角に対する反射輝度分布を

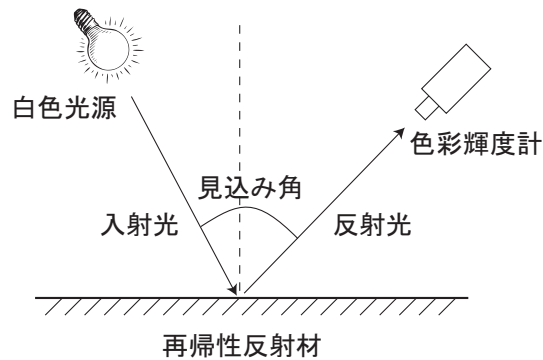


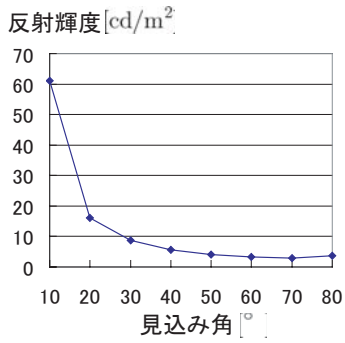
図 8: 再帰性反射材の反射輝度の計測

獲得した (図 9) . まず , 入射角が $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の範囲では , 見込み角の増大に伴って反射輝度が漸減していることが分かる (図 9(a) ~ (c)) . 次に , 入射角が $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の範囲では , 見込み角が入射角の 2 倍のとき , すなわち入射角と反射角が等しいとき , 反射輝度が極大となっていることが分かる (図 9(d) ~ (e)) . これは再帰性反射材の鏡面反射成分が大きいいため , 鏡面反射光が反射輝度の計測値に大きく寄与したものと考えられる . 最後に , 入射角が $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の範囲では , 見込み角に依存せず反射輝度はほぼ一定の値であることが分かる (図 9(f) ~ (i)) . いずれの入射角の場合においても , 見込み角が 20° 以内の範囲では反射輝度が高く , 見込み角が 50° 以上の範囲では反射輝度が低いと考えられるため , 前者の範囲を演者の見込み角 , 後者の範囲をカメラの見込み角として設定する .

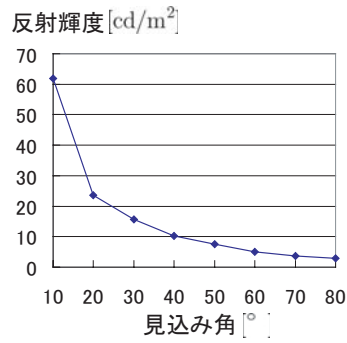
3.2 システム構成

3.1 節で述べたような設計方針に基づいて , 演者が仮想物体の説明箇所を直接見ることができるようなシステムを構築する . 提案システムでは , 大島らのシステム (図 3) に以下のような変更を加える .

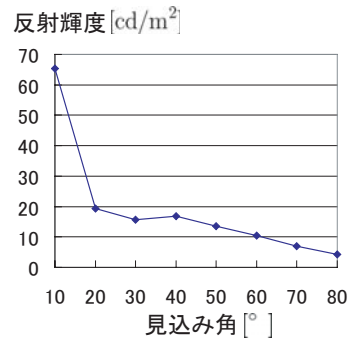
まず , 演者が直接操作する現実物体に再帰性反射材を新たに貼付する . 次に , 演者が仮想物体を確認するために用いていたフロアモニタを撤去し , その代わりに演者後方にプロジェクタを設置する . このとき , 図 7(c) のような位置関係に基づき , 演者の見込み角が 20° 以内 , カメラの見込み角が 50° 以上となるようにプロジェクタを設置する . また , 演者は片手で現実物体の把持や回転などを行い , もう片方の手で現実物体を指示することを考慮し , 現実物体を把持する手の側にプロジェクタを設置する . 最後に , スタジオカメラの近傍に白色光源を新たに設置し , 白色光源から現実物体に光を照射する . これにより , 現実



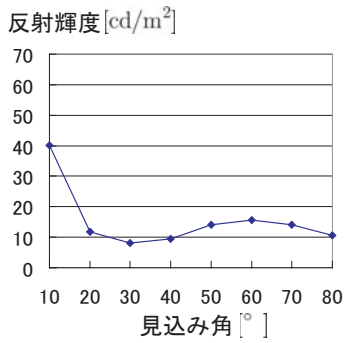
(a) 入射角 0°



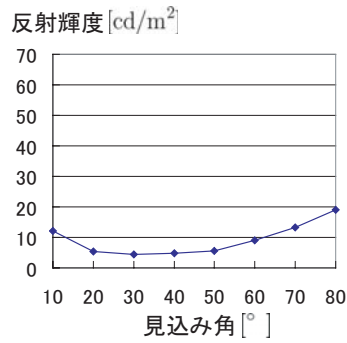
(b) 入射角 10°



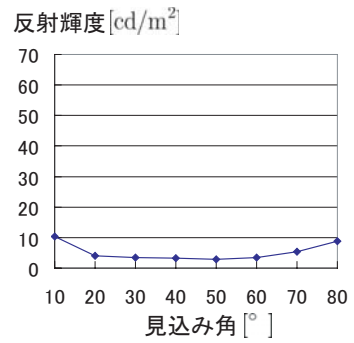
(c) 入射角 20°



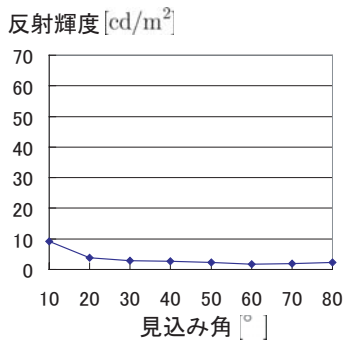
(d) 入射角 30°



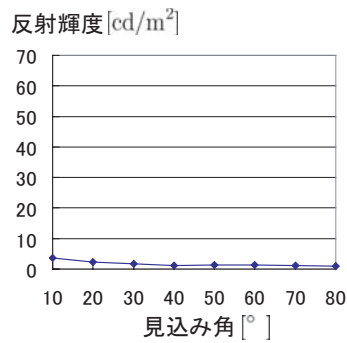
(e) 入射角 40°



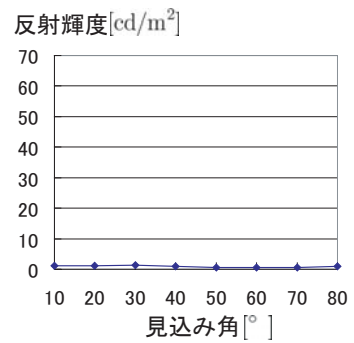
(f) 入射角 50°



(g) 入射角 60°



(h) 入射角 70°



(i) 入射角 80°

図 9: 再帰性反射材の見込み角に対する反射輝度分布

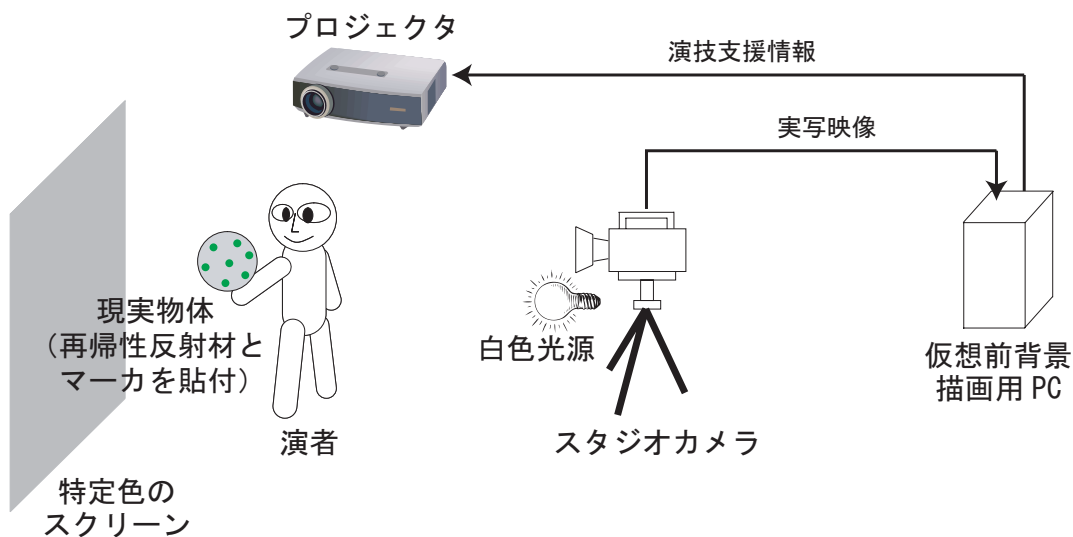


図 10: 提案システムの構成

物体上の再帰性反射材に入射した光はスタジオカメラの方向に強く反射するため、実写映像中の現実物体領域を高輝度領域として抽出することができる。本研究で提案するシステムの構成を以下に示す(図 10)。

演者が現実物体を直接操作しながら説明する様子をスタジオカメラで撮影し、それによって得られる実写映像が仮想前背景描画用 PC に送られる。仮想前背景描画用 PC では実写映像に対して、特定色の背景領域に固定の背景セットを、高輝度領域に現実物体と同じ位置・姿勢の仮想物体をそれぞれ重畳することで、仮想前背景合成映像が得られる。さらに、演者に提示するための演技支援情報が仮想前背景描画用 PC からプロジェクタに送られ、現実物体に対して演技支援情報が投影される。

続く 3.3 節では、仮想前背景描画用 PC の内部処理を実現するためのアルゴリズムについて述べる。

3.3 演技支援情報の指向性表示

3.1 節で特定した投影位置から再帰性反射材を貼付した現実物体に演技支援情報を投影することで、演技支援情報の指向性表示を実現する。本節では、そのための処理を準備段階と撮影段階に分けて述べる。

準備段階では、仮想物体の形状を獲得するため、3.3.1 節の流れで現実物体の形状を計測しておく。また、プロジェクタとカメラの間で座標を変換できるようにするため、3.3.2 の流れでそれらのキャリブレーションを行っておく。一方、

撮影段階ではまず，3.3.3 節の流れで現実物体上のマーカの見えを基に，カメラを基準とした現実物体の位置・姿勢を推定する．さらに，3.3.4 節の流れで，現実物体と同じ位置・姿勢の仮想物体をカメラ画像に重畳する一方，現実物体のカメラ中心座標をプロジェクタ中心座標に変換して演技支援情報を投影する．

- 準備段階

1. 現実物体の三次元形状計測 (3.3.1 節)
2. プロジェクタとカメラのキャリブレーション (3.3.2 節)

- 撮影段階

1. 現実物体の位置・姿勢推定 (3.3.3 節)
2. 仮想物体の描画と演技支援情報の投影 (3.3.4 節)

3.3.1 現実物体の三次元形状計測

撮影段階では現実物体と同形の仮想物体を説明対象に用いるため，現実物体の三次元形状が必要となる．また，3.3.3 節で述べる現実物体の位置・姿勢処理では，現実物体の特徴点の三次元座標が必要となる．そこで，以下のような処理によって，現実物体の三次元形状と特徴点の三次元座標を獲得する．

物体を複数カメラで観測し，観測画像から得られるシルエットを基に物体の三次元形状を復元する手法である視体積交差法 [5][6] によって，現実物体の大きな三次元形状を獲得する (図 11(a))．このとき獲得される三次元形状は実際の現実物体の三次元形状の凸包形状となるため，これを基にした手作業での修正を通じて，現実物体の正しい形状特徴を反映した三次元形状モデルを構築する (図 11(b))．また，現実物体にマーカを貼付することで特徴点を明示的に付与した上で，複数カメラによるステレオ視 [7] により，現実物体の特徴点の三次元座標を獲得する．



図 11: 現実物体の三次元形状モデル

3.3.2 プロジェクタとカメラのキャリブレーション

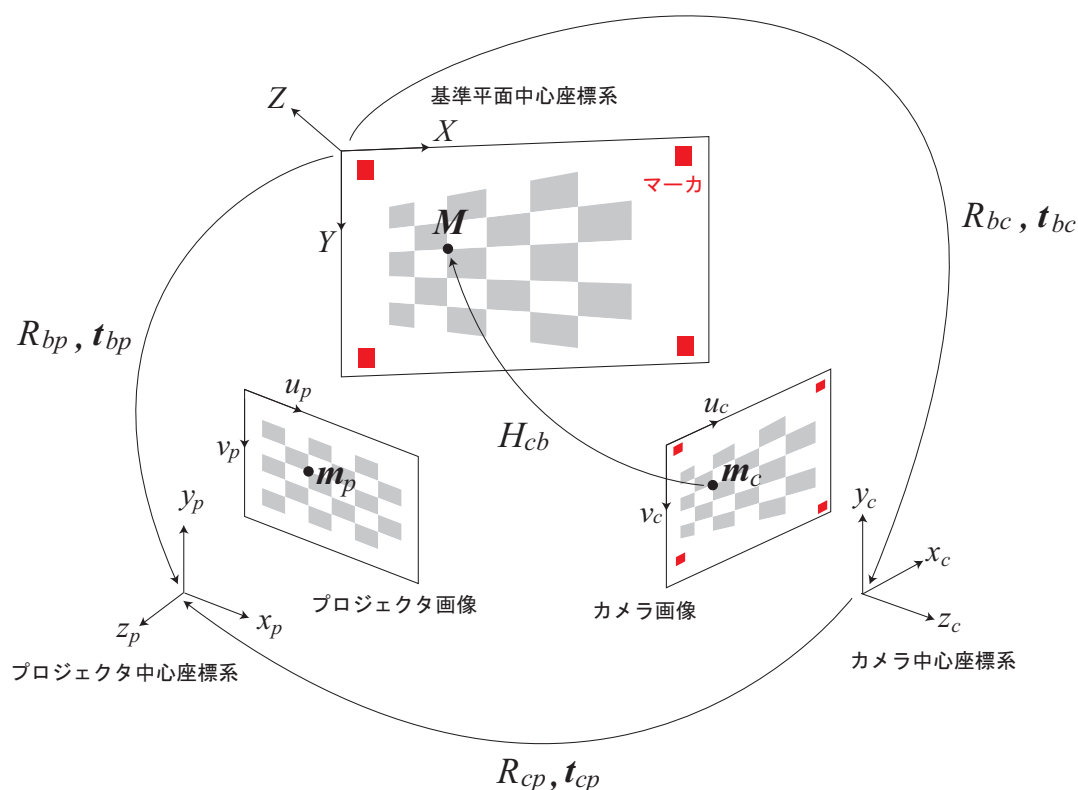


図 12: 基準平面へのチェックパターン画像の投影と観測

3.3.3 節で得られる現実物体の位置・姿勢を，カメラ中心座標からプロジェクタ中心座標に変換した上で演技支援情報を投影するため，プロジェクタとカメラのキャリブレーションを行う必要がある．そこで，三次元空間中の基準平面に対して，構造が既知のチェックパターン画像をプロジェクタから投影し，その投影像をカメラで観測する（図 12）．さらに，格子点の基準平面座標 $M = (X, Y, Z)^T$ ，カメラ画像座標 $m_c = (u_c, v_c)^T$ ，プロジェクタ画像座標 $m_p = (u_p, v_p)^T$ を対応付けることで，プロジェクタとカメラの内部パラメータと外部パラメータを推定する．

まず，基準平面上の座標が既知のマーカーをカメラ画像から手作業で検出し，基準平面とカメラ画像の間でマーカーの座標を対応付けることで，カメラ画像から基準平面への平面射影変換を表すホモグラフィ行列 H_{cb} を推定する．この H_{cb} に加えて，格子点のカメラ画像座標 (u_c, v_c) と定数 λ_b を用いて，(1) 式のように

基準平面座標 (X, Y) を求める．

$$\lambda_b \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = H_{cb} \begin{pmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

次に，基準平面上の格子点とカメラ画像中の格子点を対応付けることで，カメラの内部パラメータ A_c と外部パラメータ R_{bc}, t_{bc} を Zhang の手法 [8] によって推定する．この手法では，異なる位置・姿勢の基準平面を 3 回以上撮影すれば，カメラの内部行列 A_c と，基準平面中心座標系からカメラ中心座標系への変換を表す回転行列 R_{bc} ・並進ベクトル t_{bc} を推定できる．同様に，基準平面上の格子点とプロジェクタ画像中の格子点を対応付けることで，プロジェクタの内部行列 A_p と，基準平面中心座標系からプロジェクタ中心座標系への変換を表す回転行列 R_{bp} ・並進ベクトル t_{bp} を推定する．

最後に，カメラ中心座標系からプロジェクタ中心座標系への変換を可能とするため，プロジェクタとカメラの相対的な位置・姿勢を推定する．カメラ中心座標系からプロジェクタ中心座標系への変換を表す回転行列 R_{cp} ・並進ベクトル t_{cp} は，上で求めた $R_{bp}, t_{bp}, R_{bc}, t_{bc}$ を用いてそれぞれ (2) 式，(3) 式のように定まる．

$$R_{cp} = R_{bp} R_{bc}^{-1} \quad (2)$$

$$t_{cp} = t_{bp} - R_{bp} R_{bc}^{-1} t_{bc} \quad (3)$$

3.3.3 現実物体の位置・姿勢推定

現実物体の位置・姿勢変化に応じて仮想物体を追従させるため，3.3.1 節で獲得した現実物体の特徴点を用いて，現実物体の位置・姿勢を推定する．

まず，カメラ画像に対して閾値処理を適用することで，(4) 式を満たす領域をマーカ領域として検出し，それらの領域の重心を特徴点のカメラ画像座標として獲得する．ここで， $I_{low}^H, I_{low}^S, I_{low}^V$ はそれぞれ色相，彩度，明度の下限閾値， $I_{high}^H, I_{high}^S, I_{high}^V$ はそれぞれ色相，彩度，明度の上限閾値を表す．

$$\begin{aligned} I_{low}^H &\leq I^H(x, y) \leq I_{high}^H \\ I_{low}^S &\leq I^S(x, y) \leq I_{high}^S \\ I_{low}^V &\leq I^V(x, y) \leq I_{high}^V \end{aligned} \quad (4)$$

次に，現実物体に貼付したマーカを特徴点として，カメラから見た現実物体の位置・姿勢を推定する（図 13）．すなわち，現実物体中心座標系からカメラ中心座標系への変換を表す回転行列 R_{oc} ・並進ベクトル t_{oc} を推定する．

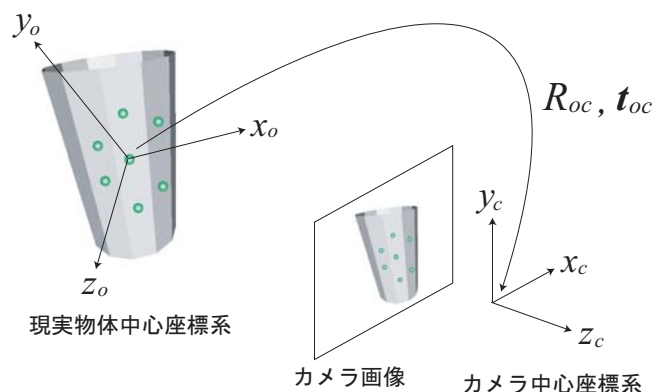


図 13: 現実物体の位置・姿勢推定

初期時刻では，カメラ画像から検出したマーカを特徴点として，特徴点ベースの位置・姿勢推定アルゴリズムである POSIT アルゴリズム [9] によって R_{oc}, t_{oc} を推定する．POSIT アルゴリズムは，特徴点の物体上での三次元的な相対配置，特徴点のカメラ画像平面での二次元的な相対配置，カメラの焦点距離を入力として，特徴点のモデルフィッティングにより R_{oc}, t_{oc} を出力する．但し，この推定処理のためには物体上の特徴点とカメラ画像中の特徴点をそれぞれ対応付ける必要がある．この対応付けについては，初期時刻では予め手動で与える．

一方，時刻 t では，演者が自らの思い通りに現実物体を直接操作するため，現実物体上のマーカとカメラ画像中のマーカを手動で対応付けることは困難である．そこで，それらのマーカの対応関係を確率的に推論する特徴点ベースの位置・姿勢アルゴリズムである SoftPOSIT アルゴリズム [10] によって，時刻 t における R_{oc}, t_{oc} を推定する．SoftPOSIT アルゴリズムは，POSIT アルゴリズムへの入力に加えて，現実物体の位置・姿勢を探索する際の初期位置・初期姿勢を入力として，特徴点のモデルフィッティングにより R_{oc}, t_{oc} を出力する．時刻 t では直前時刻 $t - \Delta t$ で推定した現実物体の位置・姿勢を探索の初期位置・初期姿勢として利用し，SoftPOSIT アルゴリズムによって R_{oc}, t_{oc} を推定する．以降の時刻においても同様にして，再帰的に R_{oc}, t_{oc} を推定する．

3.3.4 仮想物体の描画と演技支援情報の投影

現実物体と同じ位置・姿勢の仮想物体をカメラ画像に描画するため, 3.3.1 節で得られた現実物体上の点の現実物体中心座標 M_o と, 3.3.3 節で得られた R_{oc}, t_{oc} を用いて, 現実物体中心座標 M_o を (5) 式のようにカメラ中心座標 M_c へ変換する.

$$M_c = R_{oc}M_o + t_{oc} \quad (5)$$

さらに, M_c と 3.3.2 節で得られた A_c を用いて (6) 式で定まるカメラ画像中の位置 m_c に仮想物体を描画する. 但し, λ_c は定数, $\tilde{\cdot}$ は同次座標を表す.

$$\lambda_c \tilde{m}_c = A_c \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tilde{M}_c \quad (6)$$

一方, 演技支援情報をプロジェクタから投影するため, M_c と 3.3.2 節で得られた R_{cp}, t_{cp} を用いて, M_c を (7) 式のようにプロジェクタ中心座標 M_p へ変換する.

$$M_p = R_{cp}M_c + t_{cp} \quad (7)$$

さらに, M_p と 3.3.2 節で得られた A_p を用いて (8) 式で定まるプロジェクタ画像中の位置 m_p に仮想物体を描画し, 演技支援情報をプロジェクタから投影する. 但し, λ_p は定数, $\tilde{\cdot}$ は同次座標を表す.

$$\lambda_p \tilde{m}_p = A_p \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tilde{M}_p \quad (8)$$

第4章 実験

4.1 実験環境

バーチャルスタジオにおいて演者が仮想物体を教材に用いながら説明しているような映像を撮影し、提案手法によって演者には視認可能でカメラには撮影不可能となるように、演技支援情報が現実物体上に表示されているかを確認するための実験を行った。

バーチャルスタジオの床と壁は青色のスクリーンで覆われており、スタジオ内の演者をスタジオカメラ（SONY 製 DXC-D35L）で撮影する（図 14(a)(b) 赤線部）。このバーチャルスタジオに銀色の再帰性反射材（レフライト社製 #9301）と緑色のマーカを貼付した現実物体（図 15）およびプロジェクタ（NEC 製 ViewLight LT140）を導入し、3.2 節で述べたようにそれぞれを配置する（図 14(a) 緑線部）。現実物体の位置・姿勢に応じた演技支援情報がプロジェクタから現実物体に投影され、演者は演技支援情報を直接見ながら説明の演技を行う。以上のような環境の下で、実写映像を基にスタジオカメラ視点からの見えを目視で定性的に評価する。また、演者視点からの現実物体の見えを観測するため、演者視点の近傍にカメラを設置し（図 14(a) 白線部）、それによって得られる映像を基に演者視点からの見えを目視で定性的に評価する。

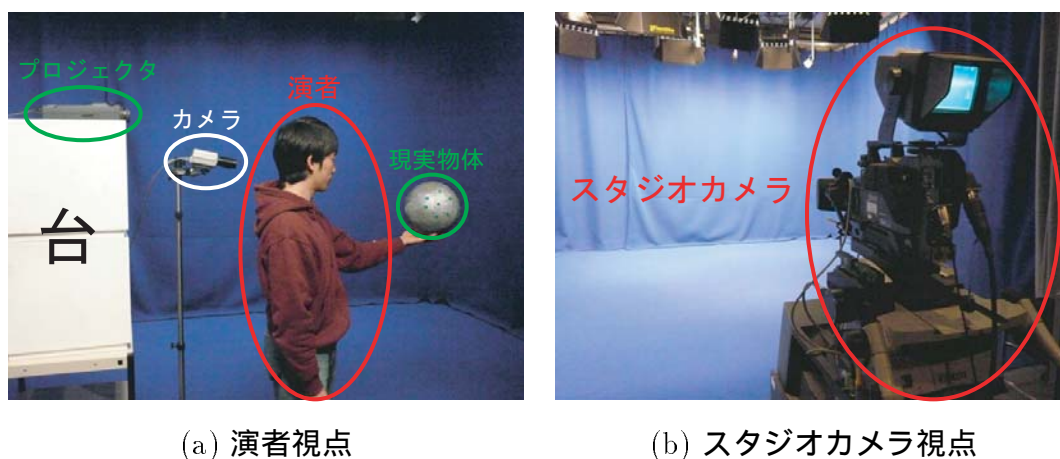


図 14: 演技支援情報の観測

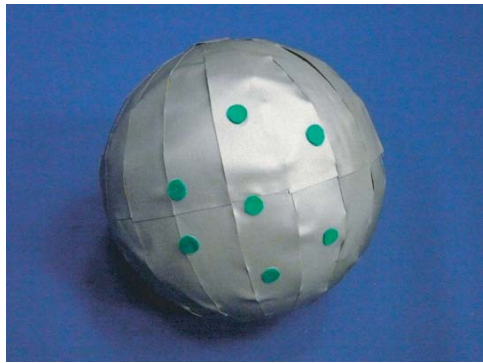


図 15: 再帰性反射材とマーカを貼付した現実物体

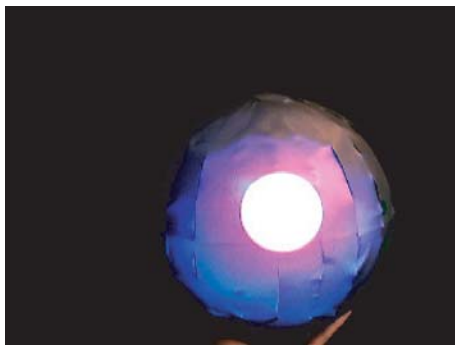
4.2 実験結果

4.1 節で述べたような環境において、教材の例としてヒトの胚の成長過程に関する説明映像を撮影した。そのときの演者視点からの映像の一部を図 16 に示す。また、撮影によって得られた実写映像の一部を図 17 に、実写映像に仮想セットと仮想物体を重畳した仮想前背景合成映像の一部を図 18 に示す。なお、図 16、図 17、図 18 の (a) ~ (h) はフレームの順で並んでおり、それぞれを同期して載せてある。

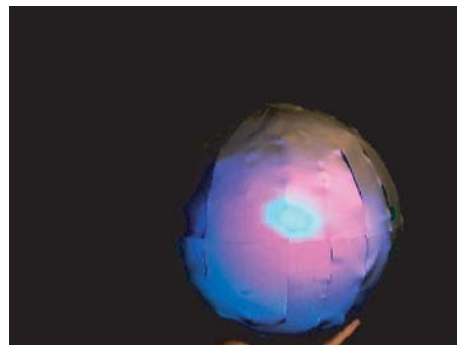
図 16(a) ~ (h) では、現実物体に演技支援情報が投影されているため、演者視点から仮想物体が見えていることが分かる。また、演者の視線方向と投影方向のずれによる演技支援情報の欠損がないことも分かる。但し、図 16(e) では、現実物体の位置・姿勢推定に関する誤差の影響によって、投影された演技支援情報の位置がずれていることも確認できる。また、図 16(a) ~ (h) では、プロジェクタからの投影光の強度が大きすぎるため、演技支援情報の一部に白飛びが発生していることも確認できる。

一方、図 17(a) ~ (h) では、現実物体領域の紙面左端の部分に投影されているはずの演技支援情報が実写映像には映り込んでいないことが分かる。その結果、図 18(a) ~ (h) のように、実写映像中の現実物体領域にスタジオカメラ視点からの仮想物体を重畳できている。但し、図 18(e),(h) のように、現実物体の端の領域ではスタジオカメラ方向への反射光の強度が小さいため、そのような領域を実写映像中で現実物体として検出できず、仮想物体を重畳できないという問題も見られた。また、図 18(a) ~ (h) のように、現実物体に貼付したマーカが実写映像から完全に抜き去ることができず、仮想前背景合成映像にもマーカの輪郭が残ってしまうという問題点も見られた。

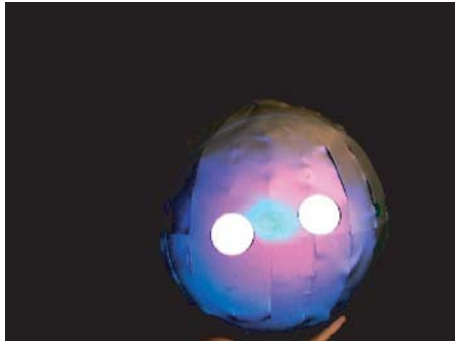
以上の実験結果から，提案手法によって演者には視認可能でカメラには撮影不可能となるように，演技支援情報を現実物体上に表示できることを確認した．



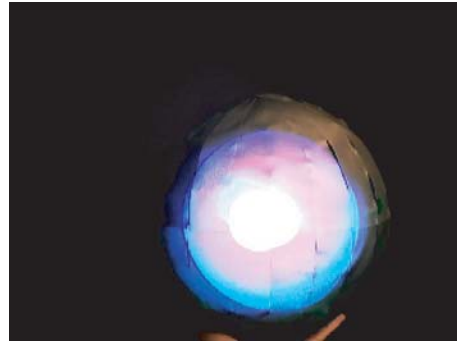
(a)



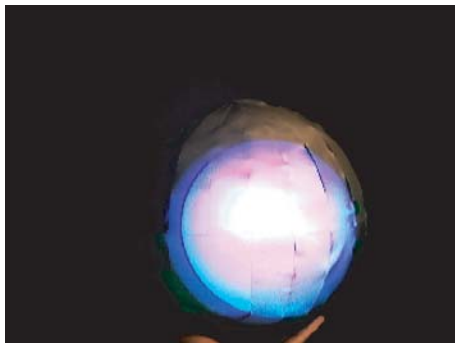
(b)



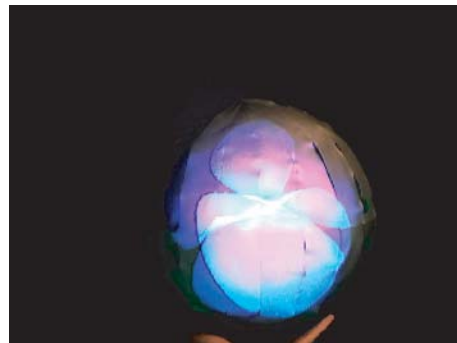
(c)



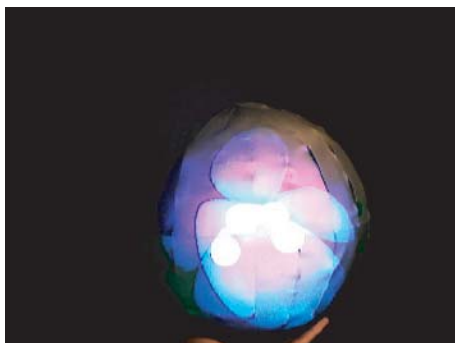
(d)



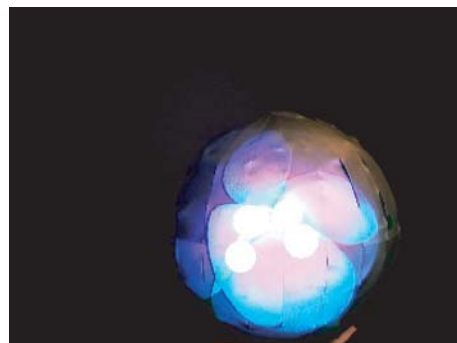
(e)



(f)



(g)



(h)

図 16: 演者視点からの映像



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

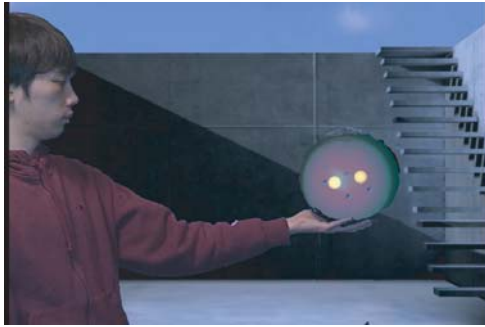
图 17: 实写映像



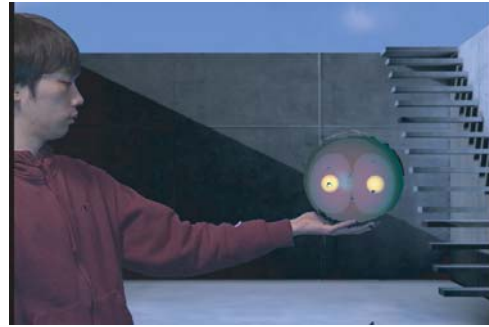
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

図 18: 仮想前背景合成映像

第5章 関連研究

第1章でも述べたように、本研究では演者による視認は可能でカメラによる撮影は不可能となるように、演技支援情報を現実物体上に表示する機能の実現を目指している。本章ではこの機能と関連する従来手法について議論する。

5.1 視界制御による指向性表示

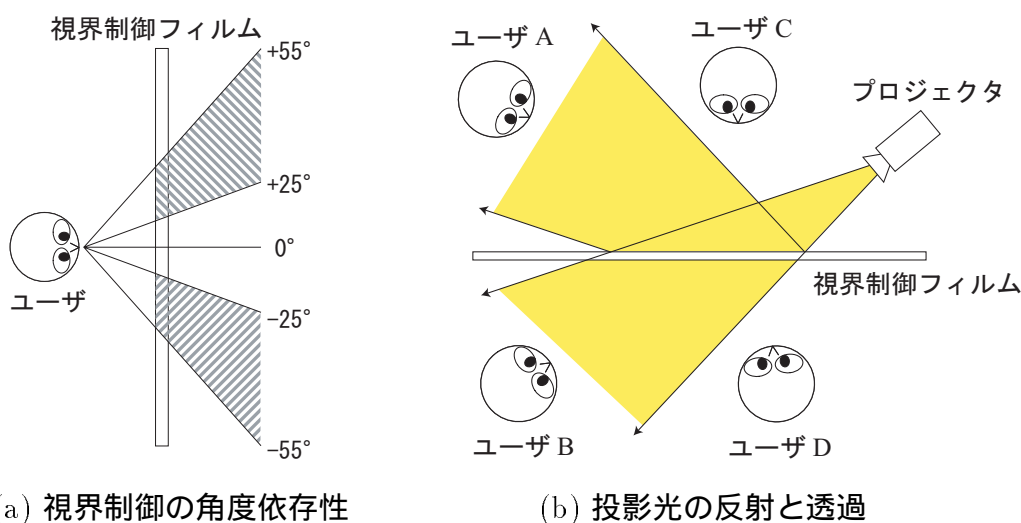


図 19: 視界制御フィルムの特性

ユーザの視線方向に応じた視覚提示が可能なディスプレイとして、視界制御フィルムを透明なガラス板に貼付した Lumisight ディスプレイ [11] が提案されている。

視界制御フィルムは、特定の角度範囲から入射した光だけを拡散させ、それ以外の角度範囲から入射した光を透過させるという特性をもつ。この特性により、ユーザが視界制御フィルムを通して反対側のシーンを観測する場合（図 19(a)）、光が $\pm 25^\circ \sim \pm 55^\circ$ の範囲で入射するような角度範囲（図 19(a) の斜線部）では、視界制御フィルムを挟んでユーザの反対側から入射した光がフィルム表面で拡散するが、それ以外の角度範囲では光がフィルムを透過する。すなわち、前者の角度範囲から光が入射すると視界制御フィルムはスクリーンとして機能し、後者の角度範囲から光が入射すると視界制御フィルムは透明なガラス板として機能する。したがって、プロジェクタを用いて前者の角度範囲から視界制御フィ

フィルムに映像を投影すれば、視界制御フィルムがスクリーンとして機能するため、フィルム上に映し出された映像を前方もしくは後方から観測することができる。ただし、フィルム上の映像を投影側から観測できる範囲は、投影された角度に対して正反射方向の範囲に限定され、その反対側から観測できる範囲は、投影された角度の範囲に限定される。一方、プロジェクタを用いて後者の角度範囲から視界制御フィルムに映像を投影すれば、視界制御フィルムが透明なガラス板として機能するため、投影光をフィルムの後方からそのまま観測できる。

Lumisight ディスプレイでは上述のような特性を利用し、 $\pm 25^\circ \sim \pm 55^\circ$ の入射範囲から映像を視界制御フィルムに投影した上で、ユーザ A は正反射方向の範囲にある位置から、ユーザ B は透過方向にある範囲から、ユーザ C とユーザ D はそれ以外の位置からそれぞれ視界制御フィルムを観測する（図 19(b)）。これにより、ユーザ A とユーザ B にとって視界制御フィルムはスクリーンとして機能するため映像を観測できる一方、ユーザ C とユーザ D にとって視界制御フィルムは透明なガラス板として機能するため反対側のシーンを観測できる。

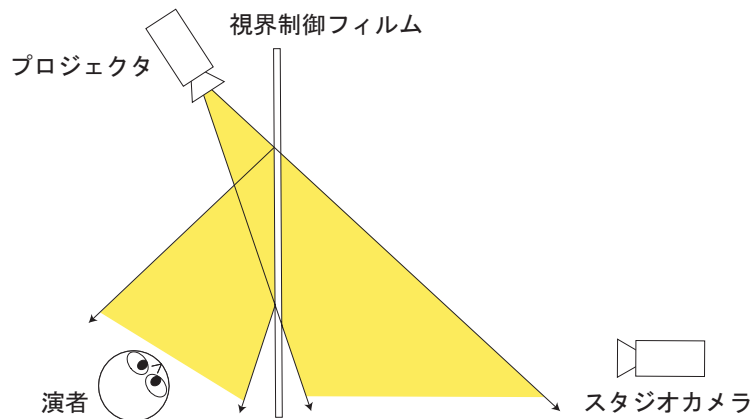


図 20: バーチャルスタジオにおける視界制御フィルムの使用例

本研究において、図 19(b) に示すユーザ A の位置に演者、ユーザ D の位置にスタジオカメラを配置して演技支援情報を投影すれば（図 20）、演者には反射による拡散光が観測される一方、スタジオカメラには拡散光が観測されない。したがって、演者による視認は可能でカメラによる撮影は不可能となるように演技支援情報を投影できる。

視界制御フィルムは、建築物の窓ガラスに貼付することでプライバシー保護が可能な建築用素材として廉価で市販されており、導入コストが低いという利点

がある．一方，本研究のように三次元の現実物体を扱う場合には，視界制御フィルムを三次元の現実物体に貼付する必要があるが，図 20 のように視界制御フィルムを使用する場合，そのフィルムを透かして演者を撮影する必要から貼付する対象物は面状のものに限られるため，本研究には適用できない．

5.2 時分割制御による指向性表示

スタジオ撮影において，スタジオに投影した仮想背景映像が演者に視認可能でカメラには撮影不可能となるように，カメラによる撮像とプロジェクタによる投影を時分割制御するインビジブルライトシステムが提案されている [12]．このシステムでは，カメラの電子シャッター機能を利用し，カメラが未露光となる電子シャッター閉口期間にのみ仮想背景映像を間欠的に投影する．例えば，NTSC 映像信号の 1 フィールドは 16.7ms であり，シャッタースピード 10ms のカメラを使用する場合には，残りの 6.7ms が電子シャッター閉口期間となる（図 21）．したがって，この電子シャッター閉口期間にのみ仮想背景映像を投影すれば，仮想背景映像がカメラに映ることはない．

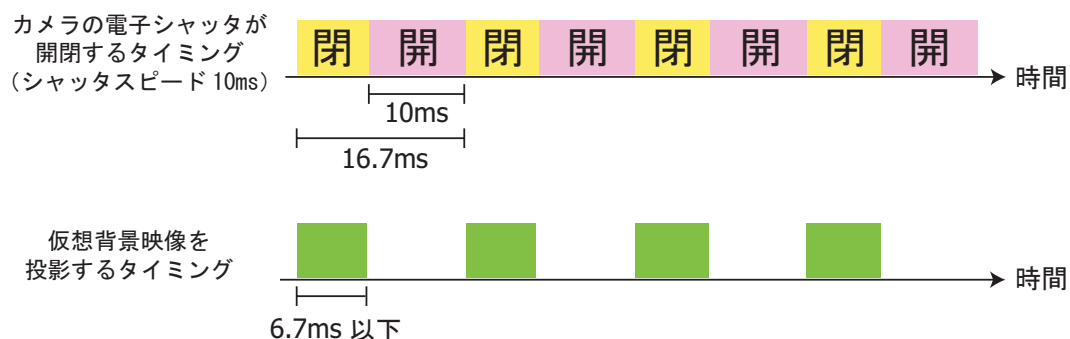


図 21: 撮像と投影のタイミングフロー

インビジブルライトシステムでは，バーチャルスタジオ（図 1）に以下のような変更を加える．まず，スタジオに仮想背景映像を投影するためのプロジェクタを導入する．次に，カメラによる撮像とプロジェクタによる投影を時分割制御するため，カメラの電子シャッター機能を使用し，プロジェクタのレンズ前面に液晶シャッター [13] を設置する．さらに，カメラの電子シャッターとプロジェクタ前面の液晶シャッターを制御するための同期制御装置を導入する．

インビジブルライトシステムの構成は以下の通りである（図 22）．まず，ス

タジオカメラでスタジオ内の演者を撮影することで実写映像が得られる．また，仮想背景描画用 PC ではスタジオに投影するための仮想背景映像が生成される．仮想背景映像は実写映像との合成のために映像合成装置に送られる一方，スタジオに投影するためのプロジェクタに送られる．以上のような映像の流れを，同期制御装置から液晶シャッタとスタジオカメラに送られる同期信号によって制御する．

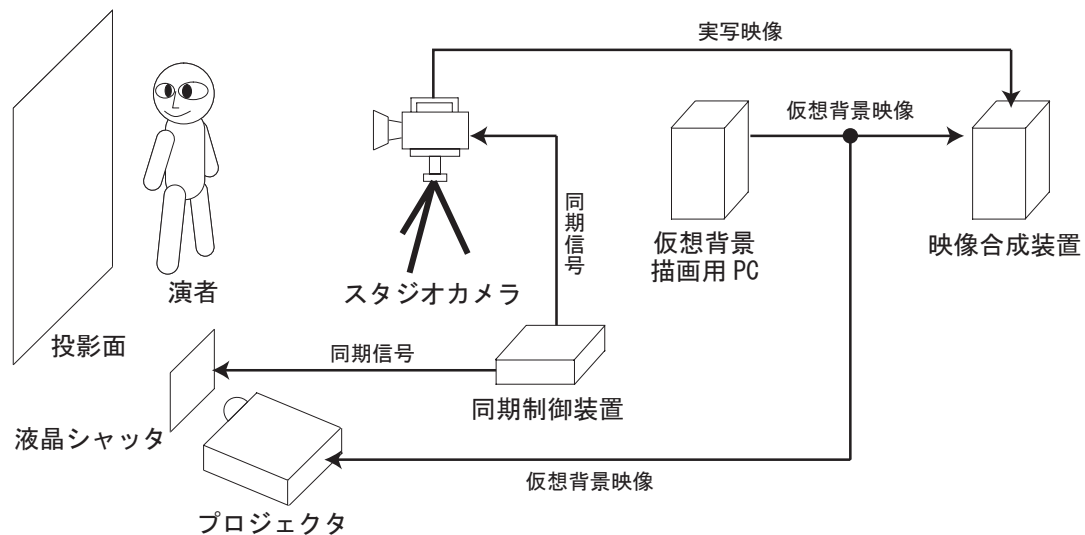


図 22: インビジブルライトシステム [12] の構成

インビジブルライトシステムはプロジェクタの位置や投影方向に依らず，目標の機能を実現できるという長所がある．一方，プロジェクタからの投影を制御するためには液晶シャッタや同期制御装置が必要となるため，システムの構成が煩雑になるという短所がある．

第6章 結論

本研究では、バーチャルスタジオでの演者による主体的な説明を実現するため、演者による視認は可能でカメラによる撮影は不可能となるように、演技支援情報を現実物体に欠損なく投影するシステムを提案した。提案システムでは、スタジオ撮影において演者が物体を説明対象として説明を行う場面では、物体に対する演者とカメラの視線方向は異なるという事実に基づき、再帰性反射材を貼付した現実物体に対して演者の側から演技支援情報を投影する。このような投影方式により、演者の側から現実物体に入射した光は演者の方向に反射する一方、カメラの方向には反射しないといった光の反射方向に関する制御が可能となるため、演技支援情報の実写映像への映り込みを回避することができる。また、カメラ・演者・物体の位置関係、再帰性反射材の反射輝度分布、演者の手の動きを基に、演者の身体による遮蔽が発生しないような位置から演技支援情報を投影する。これにより、現実物体上の演技支援情報の欠損を回避できる。

提案システムの有効性を検証するために、演者後方のプロジェクタから現実物体に演技支援情報を投影し、演者の視点位置の近傍に設置したカメラとスタジオカメラの2台のカメラで現実物体を観測した。その結果、スタジオカメラから得られる実写映像に演技支援情報は映り込んでおらず、映像中の現実物体領域に仮想物体を重畳することができた。一方、演者視点の近傍のカメラから得られる演者視点の映像からは、演技支援情報を欠損なく演者に提示できることを確認した。しかし、現実物体の位置・姿勢推定に関する誤差の影響を受け、演技支援情報の投影される位置がずれる場合も見られた。また、プロジェクタからの投影光の強度が大きいため、演技支援情報が現実物体上で白飛びする場合も見られた。これらの問題に対して、演者視点からの見えを考慮して演技支援情報の位置や明るさを調整する必要がある。

このことを考慮すると今後の課題としては、まず演者視点からの演技支援情報の見えを改善することが挙げられる。そのためには、演者視点の近傍にカメラを新たに設置し、演者視点からの見えを基に演技支援情報の位置や明るさを調整する処理や、プロジェクタとカメラのキャリブレーション誤差を補正する処理が必要となる。その他には、仮想前背景映像を改善することが挙げられる。そのためには、実写映像の現実物体領域の端の領域を現実物体として頑健に検出する処理や、実写映像のマーカー領域を頑健に抜き取る処理が必要となる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くのご教授を賜りました美濃導彦教授に深謝致します．予備審査委員として貴重な助言を賜りました角康之准教授に深く御礼を申し上げます．日頃より熱心なご指導と有益な助言を賜りました角所考准教授に深く感謝致します．親身に研究の相談をお聞き下さった船富卓哉助教，藪内智浩氏に感謝の意を表します．バーチャルスタジオでの実験の際に快くご協力下さったコンテンツ作成室の元木環助教，岩倉正司氏に感謝致します．最後に，研究等で支えて頂きましたモデルグループ並びに美濃研究室の皆様に厚く御礼を申し上げます．

参考文献

- [1] Gibbs, S., Breiteneder, C., Lalioti, V., Mostafawy, S. and Speier, J.: “Virtual Studios: An Overview”, *IEEE Multimedia*, Vol. 5, No. 1, pp. 18–35 (1998).
- [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, p. 286 (2006).
- [3] 川上直樹, 稲見昌彦, 柳田康幸, 前田太郎, 館暲: “オブジェクト指向型ディスプレイの研究”, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 6, pp. 2725–2733 (1999).
- [4] 松田晃一, 細部博史, 由谷哲夫: “3D ユーザインタフェース”, 丸善 (2005).
- [5] Martin, W. N. and Aggarwal, J. K.: “Volumetric Description of Objects from Multiple Views”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 5, No. 2, pp. 150–158 (1983).
- [6] Laurentini, A.: “How far 3D shapes can be understood from 2D silhouettes”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 2, pp. 188–195 (1995).
- [7] Okutomi, M. and Kanade, T.: “A Multiple-Baseline Stereo”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363 (1993).
- [8] Zhang, Z.: “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334 (2000).
- [9] DeMenthon, D. and Davis, L. S.: “Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 15, pp. 123–141 (1995).
- [10] David, P., DeMenthon, D., Duraiswami, R. and Sapiro, G.: “SoftPOSIT: Simultaneous Pose and Correspondence Determination”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 59, No. 3, pp. 259–284 (2004).
- [11] 川上玲, 筧康明, 苗村健, 原島博: “Lumisight: Lumisty フィルムを用いた方向依存映像ディスプレイ”, 情報処理学会インタラクシオン, pp. 53–54 (2003).

- [12] Fukaya, T., Fujikake, H., Yamanouchi, Y., Mitsumine, H., Yagi, N., Inoue, S. and Kikuchi, H.: “An Effective Interaction Tool for Performance in the Virtual Studio - Invisible Light Projection System”, *Institution of Electrical Engineers (IEE), IBC*, pp. 389–396 (2002).
- [13] 藤掛英夫, 深谷崇史: “バーチャルスタジオで用いる間欠光プロジェクタ用高速液晶シャッタの開発”, *映像情報メディア学会誌*, Vol. 57, No. 5, pp. 627–630 (2003).