

2010年度 卒業論文

多視点観察可能なフォグディスプレイ

2011年2月15日

大阪大学 基礎工学部
システム科学科 生物工学コース
八木 明日華

主査: _____ 日付: _____

副査: _____ 日付: _____

概要

映像表示技術のひとつに空間映像技術がある。空間映像とはスクリーンの存在が認識されない、または希薄に感じられ、空間に映像そのものが存在しているように見える映像システム全般を指す。空間映像技術においては、画枠がないなど、空間映像特有の性質によって2D映像を表示しても立体的に見える。

空間映像技術のひとつにフォグディスプレイがある。本研究では、観察者の位置に応じた映像が観察できる円筒型フォグディスプレイを製作する。本システムでは、超音波式の霧生成装置で発生させた霧を、円環状のノズルから噴出させることで円筒形に形成したフォグスクリーンに、複数の位置からプロジェクタで映像を投影する。霧による散乱はミー散乱によって記述でき、光は前方に強く散乱されるため、観察者の真正面以外から投影された映像は観察出来ない。従って、複数の角度から映像を投影することで、観察者の位置に応じた映像が観察でき、観察者が視点を移動させると運動視差が生じ、立体感が得られる。

投影映像はプロジェクタの位置や姿勢に応じて補正した。映像の補正を行わない場合に比べてずれのない映像を観察可能であることを確認した。

Abstract

Spatial image display is one of the image display technologies. Spatial image display means a image system that users perceive no screen or subtle screen and the image in real space. Spatial image display can present stereoscopic effect although it displays 2D image because, for example, real image display has no frame.

The study proposes the system where a cylindrical fog screen enables users to observe the image corresponding to the view point. The system projects different images from three positions on the cylindrical fog screen that is generated by ultrasonic humidifier and circular nozzle. Since light is scattered mainly forward by fog the projected image can be observed only by users on the opposite side of the fog. Therefore users observe one image although multiple images are projected on the fog display. Author confirms that by moving observing points, users can observe stereoscopic image because of motion parallax. The experimental results show that Projected images are corrected depending on projector's position and axis direction.

目次

第1章	はじめに	1
第2章	立体視映像技術と空間映像技術	3
2.1	立体視映像技術	3
2.2	空間映像技術	8
第3章	フォグによる光の散乱特性	14
3.1	光の散乱	14
3.2	関与媒質と位相関数	16
第4章	スクリーンの形成と投影映像生成	19
4.1	多視点観察可能なフォグディスプレイ	19
4.2	フォグスクリーンの形成	20
4.3	映像投影	21
第5章	実装と結果	31
5.1	システムの構成	31
5.2	映像の投影	33
第6章	おわりに	36
	謝辞	37
	参考文献	38

目 次

2.1	両眼視差	4
2.2	運動視差	4
2.3	実シーンにおける両眼立体視	5
2.4	両眼視差を用いた立体視技術	5
2.5	アナグリフ式の原理	6
2.6	アナグリフ式で用いるメガネ	6
2.7	パララックスバリア方式の原理	7
2.8	”SeeLinder”	8
2.9	”RayModeler”	8
2.10	幽霊舞台の仕掛け	9
2.11	虚像系空間映像システム	9
2.12	実像系空間映像システム	10
2.13	空間プロジェクタ	10
2.14	像移動空間プロジェクタ”来るくる”	10
2.15	話すマネキン”Chatty”	11
2.16	”Transpost”	12
2.17	Cosmos-手のひらに宇宙を-	13
3.1	電磁波の波長と粒子の大きさに応じた散乱の種類	14
3.2	微粒子による光の散乱	15
3.3	等方散乱	15
3.4	前方散乱傾向の強い散乱	15
3.5	Henyey-Greenstein 位相関数	18
4.1	提案システムにおける観察	19

4.2	フォグディスプレイの多視点観察	20
4.3	フォグスクリーンの形成	21
4.4	座標の回転	22
4.5	ピンホールカメラの中心射影	25
4.6	フォグスクリーンとプロジェクタの位置関係	27
4.7	三次元空間上の物体の配置	28
4.8	取得したテクスチャ(画像 I_V)	28
4.9	プロジェクタとテクスチャの位置関係	29
4.10	実際のプロジェクタが投影する画像	30
5.1	試作システム	31
5.2	プロジェクタの配置	31
5.3	フォグ噴出部	32
5.4	オブジェクト座標系の指標	33
5.5	較正用投影映像	33
5.6	プロジェクタから投影する画像	34
5.7	観察風景	34
5.8	観察結果 (較正前)	35
5.9	観察結果 (較正後)	35

表 目 次

5.1	使用機材	32
5.2	散乱の角度依存性	32

第1章 はじめに

はるか昔から、人は五感のなかでも視覚を用いた情報を多く用いてきた。情報を「ありのままに」記録するため、また現実に近い情報を提示するため、19世紀に写真技術が開発されて以来、テレビなど様々な映像表示技術が開発されてきた [1]。近年ではより臨場感を得られる技術の発達が目覚ましい。高臨場感映像システムの発展の流れとしては、広視野効果を狙った二次元高精細映像へ向かう流れと、奥行き方向の情報も加えた三次元 (3D) 映像へ向かう流れがある [2][3]。近年では3D映画の公開、家庭用の3Dテレビの発売などにより立体視映像技術が用いられたサービスや製品が急速に普及し、2009年・2010年は“3D元年”・“3Dテレビ元年”と称されるほどであった。

しかし、多くの立体視技術に見られる、両眼視差を用いて立体視を実現するシステムでは、輻輳による視軸の交点 (注視点) とピント調節点の不一致などのため、使用者は現実世界の観察では発生しない不自然な眼の制御を強いられ、長時間の鑑賞は心身の負担になるなどの問題がある [4]。

観察者の視点に応じて違う映像が見えることによって、視点を変えると運動視差が生じ、立体感が得られる多視点型ディスプレイも開発されている。特に円筒型のディスプレイは、表示物体を周囲360度から観察できるため、平面型ディスプレイと比べ、より立体感が得られる。

巨大なディスプレイで立体視映像を観察した場合、画枠の存在が認識されないなどの理由で高い立体感が得られるが、家庭用テレビ程度の大きさのディスプレイでは、二眼式立体視技術においても、多視点型の立体視技術においても、使用者はディスプレイの存在を認識しているため、立体視により奥行きは感じる事が出来るが、ディスプレイの存在が映像と現実世界を切り離し、実際に映像が現実世界に存在しているようには感じられない [5]。

使用者にディスプレイの存在を意識させない技術として、空間映像技術がある。

空間映像技術とは、ディスプレイの存在が認識されないように構成され、空間に映像そのものが見えるような映像システム全般を指す。

空間映像の特徴として、2D映像を表示しても立体感を得ることが出来るという利点がある [5]。理由は明確には解明されていないが、空間に映像が浮かんで見えるため、像の位置の正確な把握が困難になり奥行き知覚の混乱が生じることや、画枠が無い場合、画枠の中は平面であるという心理的枠組みから解放されることによると考えられる。

空間映像技術の例としては、ハーフミラーを用いて、虚像と現実空間を融合するディスプレイや、凹レンズを用いて空間に実像を表示するディスプレイ、水や霧に映像を表示するディスプレイなどがある [5][6]。中でもフォグディスプレイにはディスプレイの中を手などの物体が通り抜けられるという利点がある。

フォグディスプレイは空間映像技術のひとつであるため、2D映像を表示することで立体感が得られるが、既存のフォグディスプレイは、平面に一方向から映像を投影するものが大半であるため、見る位置を変えるとスクリーンが平面であることが認識されてしまうが、見る位置に応じて観察できる映像が異なれば、より立体感を得ることが出来ると考えられる。

本研究では、光を前方に多く散乱させる霧の性質を利用し、円筒状のフォグスクリーンに映像を多方向から投影することによって、多人数、多方向から観察可能なディスプレイの構築を目指す。超音波式の霧発生装置で発生させた霧を円環状のノズルから噴出させることで円筒の形状を維持し、複数のプロジェクタから視点に応じた映像を投影することで、違う角度から観察してもずれのない映像を表示する。

第2章 立体視映像技術と空間映像技術

本章では従来の立体視映像技術と空間映像技術、本研究で提案するフォグディスプレイについて述べる。

2.1 立体視映像技術

本節ではヒトが立体視を行う際に用いている奥行き手がかりと奥行き手がかりを用いた立体視映像技術について延べる。

2.1.1 奥行き手がかり

立体視映像表示の目的の一つは三次元空間での物体の配置の認識を容易にすることである。ヒトが眼で物体を見て、三次元配置を認識するためには非常に多くの手がかりを無意識に用いている。ヒトが用いている奥行き手がかりには、両眼視差、運動視差、複数の物体の重なり合い、テクスチャの細かさなど、様々なものがある[4][7]。本節では奥行き手がかりのうち、立体視像技術において主に用いられる両眼視差と運動視差について述べる。

両眼視差

ヒトの両眼の位置が異なるために生じる、両眼で観察される像の違いを両眼視差という。ヒトは両眼視差に基づいて奥行きを感じることができる。ヒトの両眼の位置と両眼視差の関係を図 2.1 に示す。

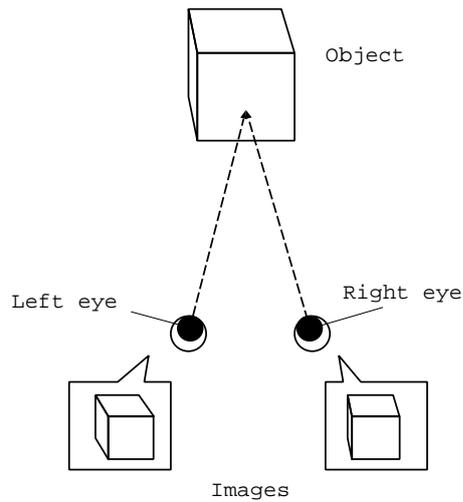


図 2.1: 両眼視差

運動視差

時間的に見ている対象が移動する、または観察者が移動することによって観察される像が時間的に変化することを運動視差といい、ヒトは奥行き手がかりとして用いている。観察者が注視する物体に対して移動した場合の、観察者の位置と運動視差を図 2.2 に示す。運動視差は単眼でも感じるすることができる。

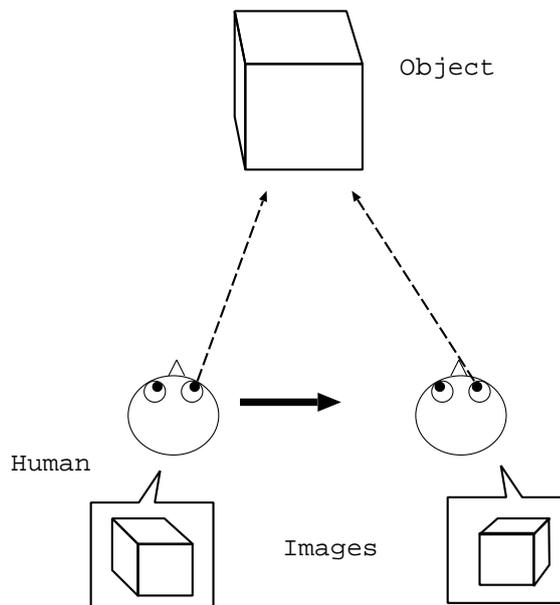


図 2.2: 運動視差

2.1.2 二眼立体視映像技術

二眼立体視映像技術の仕組みと問題点

二眼立体視映像技術は、右目用映像と左目用映像をディスプレイに表示し、右目用映像は右目のみで、左目用映像は左目のみで観察することを可能にする技術である。この二眼立体視技術による観察が実現されると、両眼視差が生じ脳内の視覚情報処理によって、観察される左右の像が一つの物体として認識される。図 2.3 に実シーンにおける両眼立体視の様子を、図 2.4 に両眼視差を用いた立体視ディスプレイにおける立体視の様子を示す。

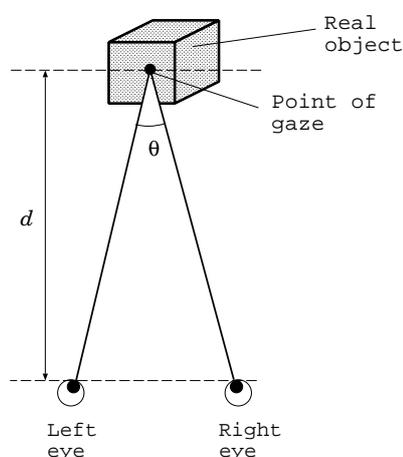


図 2.3: 実シーンにおける両眼立体視

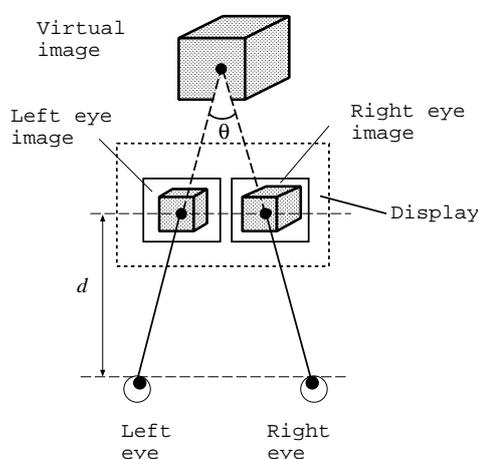


図 2.4: 両眼視差を用いた立体視技術

図 2.3 の実シーンにおける観察では、1 点を注視した場合、各眼の焦点は注視点までの距離 d に合うように調節されており、また両眼の視軸が注視点で交差するように、距離 d に応じて両眼が内側に向く。内側を向いた両眼の視軸が構成する角 θ を輻輳角といい、視軸の交点を輻輳点という。実シーンにおける観察では、距離 d が決まれば θ は一意に決まる。これを輻輳と調節が一致しているという。

図 2.4 の立体視ディスプレイにおいては、各眼の焦点はディスプレイ面 (眼からの距離 d) に合うように調節される。一方、輻輳点は注視点と一致し、注視対象であるバーチャルな物体上に置かれる (輻輳角は図 2.4 の θ)。一般に注視点までの距離は、ディスプレイ面までの距離 d と異なる。すなわち、輻輳と調節は一致していない。

輻輳と調節の不一致は観察者に、現実世界では起こらない不自然な観察を強いる。輻輳と調節が一致していないまま長時間立体視を続けると、観察者は頭痛を伴う、

気分が悪くなるなどの心身の不調を感じる。輻輳と調節の不一致による観察者の心身の不調は個人差があるが、両眼視差を用いた立体視技術の問題点である。

各種二眼識立体視表示技術

二眼立体視映像技術は大別してメガネ式と裸眼式がある。

メガネ式では右目用映像と左目用映像をディスプレイに表示し、観察者は特殊なフィルタ機能を持つメガネを装着することによって、右目用映像は右目で、左目用映像は左目で観察することができる。メガネ式にはアナグリフ式、偏光式、液晶シャッター式、濃度差メガネ式、分光式などがある。図 2.5 にアナグリフ式の原理を示す。アナグリフ式では図 2.6 示すようなメガネによって右目用画像は右目でのみ、左目用画像は左目でのみ観察することができる。

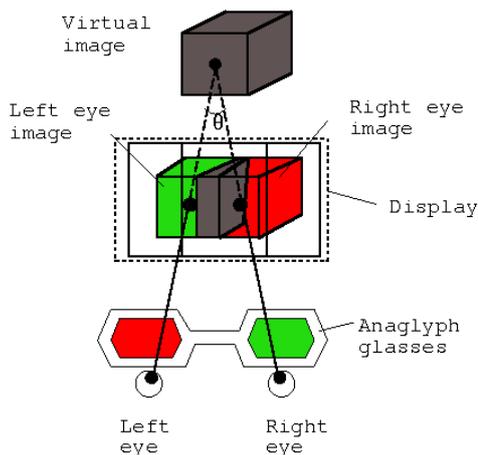


図 2.5: アナグリフ式の原理

図 2.6: アナグリフ式で用いるメガネ

裸眼式は、ディスプレイに左目用映像と右目用映像それぞれから出る光線の方向を制限する機構があるため、両眼立体視が実現出来る。裸眼式にはパララックスバリア方式、レンチキュラーレンズ方式などがある [8]。パララックスバリア方式の原理を図 2.7 に示す。パララックスバリア方式ではディスプレイに右目用映像と左目用映像が交互に表示されており、前方にあるパララックスバリアが右目用映像と左目用映像を分けているため、右目用画像は右目でのみ、左目用画像は左目でのみ観察することができる。

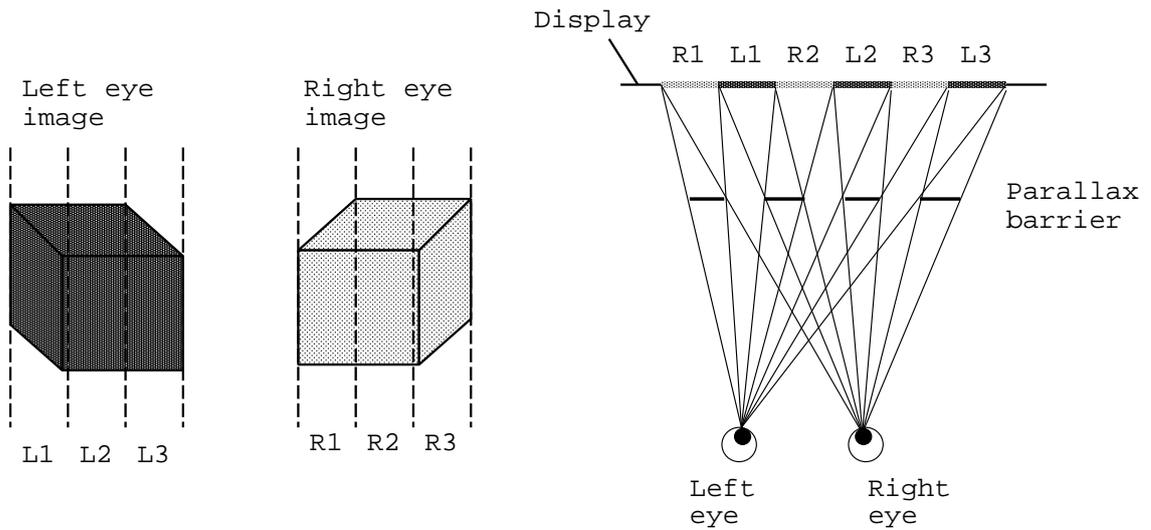


図 2.7: パララックスバリア方式の原理

2.1.3 多視点立体視映像技術

多視点型の立体視映像技術は、両眼視差に加えて、観察者の視点の移動による運動視差も得られる。多視点型は2.1.2節で述べた裸眼式二眼立体視技術を応用することや光線再生方式、インテグラルフォトグラフィ方式などで実現できる。

多視点立体視映像技術は平面型ディスプレイで実現されているものと、立体型ディスプレイで実現されているものがあるが、今回は本研究の概念と類似する立体型ディスプレイについて例をあげる。

立体型ディスプレイはディスプレイの形状が立体であるため、観察者がディスプレイの周囲を移動しながら観察可能であり、平面型ディスプレイよりも高い立体感を得ることが出来る。立体型ディスプレイにおける多視点情報提示は遠藤らのSeeLinder[9](図 2.8) やソニーのRayModeler[10](図 2.9) がある。



図 2.8: "SeeLinder"[9]



図 2.9: "RayModeler"[11]

2.2 空間映像技術

空間映像技術とは、スクリーンの存在が認識されないように構成され、空間に映像自体が見えるような映像技術全般を指す [5]。従来のテレビ・映画のように、ディスプレイまたはスクリーン上の映像を鑑賞する場合、どんなに高精細な映像が表示されていても、鑑賞者はディスプレイまたはスクリーンの存在を認識しているため、ディスプレイやスクリーンは現実世界と映像世界を隔てる壁となってしまっている。空間映像の特徴として、画枠がないことや奥行き知覚の混乱などにより、二次元映像を表示しても立体感を得られることが出来るという利点がある [5]。空間映像技術は視差を用いてはいないが、立体感を得られるという意味では立体視技術に含めることも可能である [8]。空間映像を実現するシステムは虚像系、実像系、特殊スクリーン系の3種類に分けられる。

2.2.1 虚像系

虚像系空間映像技術は、空間映像技術の中でも最も歴史が古く、原型は19世紀のヨーロッパで盛んだった幽霊舞台と考えられる。幽霊舞台の仕組みを図2.10に示す。舞台下に斜めに横たわる役者1が舞台にあるハーフミラーに映ることによって観客には役者1の虚像が役者2と同じ空間にあるように見える。また、同じ原理を用いている空間映像技術に図2.11のような模型とディスプレイ像の合成がある。観察者

の眼にはハーフミラー越しの模型からの光とハーフミラーで反射した画像表示装置からの光が入り、観察者はハーフミラー越しに画像表示装置の映像の虚像を観察できる。その結果、模型と画像表示装置の映像が同じ方向に存在するように見える。



図 2.10: 幽霊舞台の仕掛け [12]

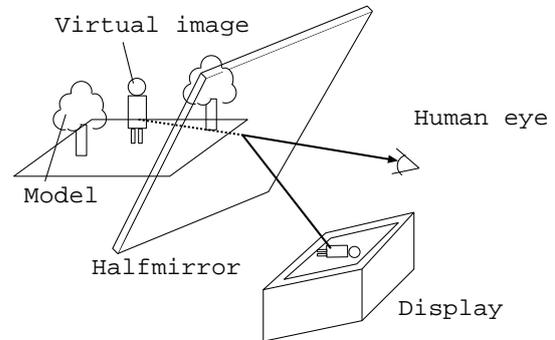


図 2.11: 虚像系空間映像システム

2.2.2 実像系

実像系の空間映像技術では凹面鏡やレンズを使って画像表示装置に写った映像を実像として空間に結像させ、観察者が光軸方向から観察すると、空間に浮かんだ像を観察することが出来る。実像系の一例を図 2.12 に示す。凹面鏡 1 の焦点に置かれた物体から出た光は凹面鏡 1 によって反射され凹面鏡の対称軸に平行な光となる。平行光は凹面鏡 2 によって再び反射され、凹面鏡 2 の焦点に集まり、実像となる。この結果、観察者は凹面鏡 1 の焦点に置かれた物体は凹面鏡 2 の焦点へと浮かび上がって見える。

製品化されている実像系の空間映像技術としては、石川光学造形研究所の空間プロジェクタ (図 2.13) がある。凹面鏡を用いて映像表示装置に写った映像を実像として空間に結像させている。また、石川光学造形研究所の "来るくる" (図 2.14) が開発されている。空間プロジェクタの結像光学系にズームレンズ系を用いて、空間に浮かぶ像の位置を前後に自由に換えられる。

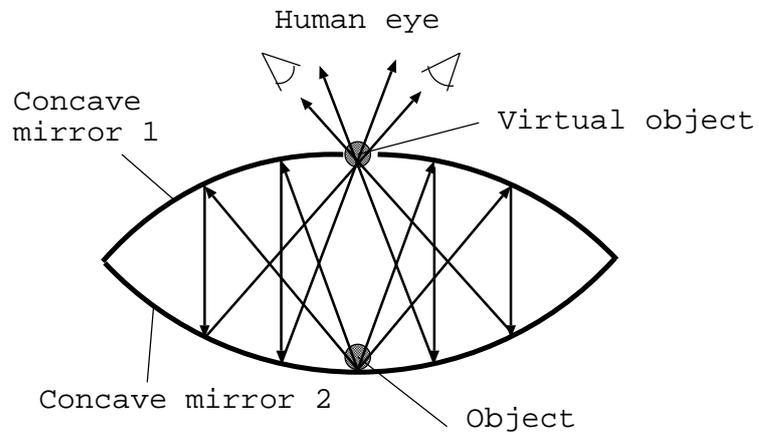


図 2.12: 実像系空間映像システム

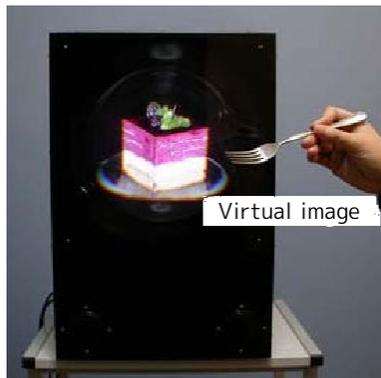


図 2.13: 空間プロジェクタ [13]



図 2.14: 像移動空間プロジェクタ”来るくる” [5]

2.2.3 特殊スクリーン系

虚像系、実像系の空間映像技術では、スクリーンは観察者に見えないが、特殊スクリーン系では、スクリーンは観察者の目の前にある。しかしスクリーンがスクリーンとして認識されないので、スクリーンが見えないことと等価になる。

特殊スクリーン系には三種類のスクリーンがある。一つ目は、スクリーンが、投影する映像対象の立体形状と同じ形状をしている種類である。代表的なものは、話すマネキン "Chatty" (図 2.15) である [14]。"Chatty" では顔の部分のスクリーンに顔の映像を投影する。スクリーンの形状が立体になっていて、それに合った映像が投影されるため、高い立体感が得られる。二つ目はスクリーンを高速回転させて、スクリーンを観察者に不可視とする空間映像技術である。実際の例としては日立製作所の Transpost [15] (図 2.16) などがある。中心にある高速回転するスクリーンに、スクリーンの下方に存在する複数の鏡を用いて多方向から映像を投影する。三つ目は霧や水などの流体をスクリーンに用いるタイプで、霧や水を一定の場所に定位させ、プロジェクタから映像を投影するものである。



図 2.15: 話すマネキン"Chatty" [14]

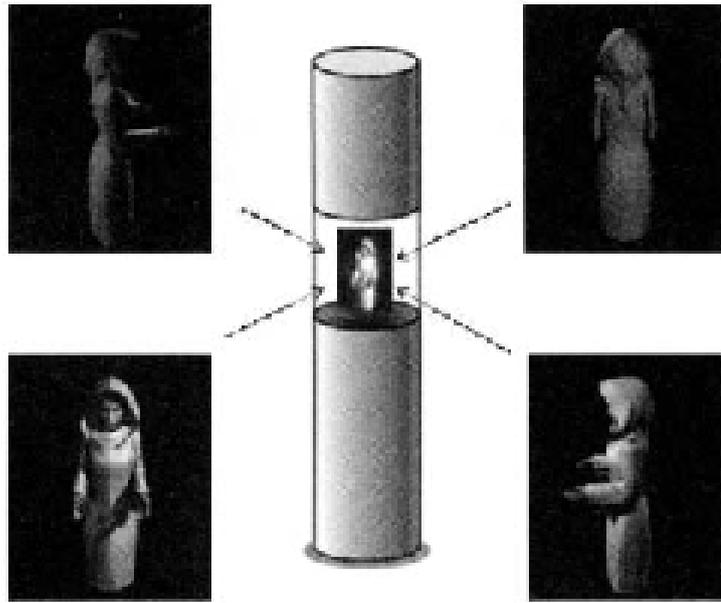


図 2.16: "Transpost"[15]

フォグディスプレイ

フォグディスプレイは観測者がディスプレイの存在を希薄に感じられる特殊スクリーン系空間映像技術である。フォグに映像を投影する技術は、Rakkolainenらによる研究によって実用化された [16]。近年ではフォグスクリーンの安定した形状維持に関する研究や [17][18]、フォグの持つ光の半透過性を利用して、複数のフォグディスプレイの配置やフォグディスプレイの形状を工夫して立体感を提示する研究も行われている [19][20][21]。一例が文らの"Cosmos-手のひらに宇宙を-" [19](図 2.17) である。ユーザーは霧スクリーンを生成する部分を把持し、自由に霧スクリーンの場所を移動することができる。霧化ユニットには加速度センサーが取り付けられており、ユーザーの把持している霧スクリーンの場所に映像を投影することが出来る。

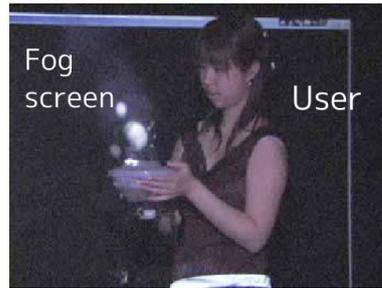


図 2.17: Cosmos-手のひらに宇宙を-[19]

本研究では、画枠がなくディスプレイの存在を希薄に感じられるというフォグディスプレイの特徴と、第3章で述べるフォグによる光の散乱の前方指向性を利用し、多視点観察可能なフォグディスプレイを提案する。多視点観察が可能になると、2.1.3節で述べた立体ディスプレイのように運動視差を用いて立体感を得ることができると期待される。

第3章でフォグによる光の散乱特性について、第4章で提案システムである多視点観察可能なフォグディスプレイについて述べる。

第3章 フォグによる光の散乱特性

本章では、霧による光の散乱理論とコンピュータグラフィクスにおける散乱現象の記述法について述べる。

3.1 光の散乱

大気には様々な化学成分と大きさを持つ微粒子が浮遊している。電磁波がこの微粒子に衝突すると、微粒子を中心として二次的な電磁波が生じ周囲に広がる。これを散乱という。散乱の様式と度合は電磁波の波長と散乱させる粒子の大きさに依存して異なる。散乱の種類と電磁波の波長、粒子の半径の関係を図 3.1 に示す。

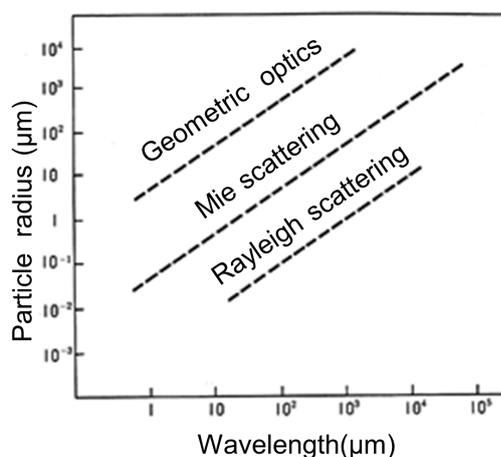


図 3.1: 電磁波の波長と粒子の大きさに応じた散乱の種類 [22]

散乱には、散乱の前後で振動数、運動エネルギー、内部エネルギーなどが変わらない弾性散乱と、散乱の前後で振動数、運動エネルギー、内部エネルギーなどが変わる非弾性散乱がある。

図 3.2 に光の散乱の様子を示す。原点に位置する微粒子に光が入射し散乱している。散乱方向を θ とする。 $-\pi/2 < \theta < \pi$ の場合を前方散乱と呼び、 $-\pi/2 < \theta <$

$\pi/2, \pi/2 < \theta < 3/2\pi$ の場合を後方散乱と呼ぶ。また、全ての方向に等しく等確率で散乱する場合を等方散乱と呼ぶ。図 3.3、3.4 に等方散乱と前方散乱が強い散乱の散乱の様子を示す。

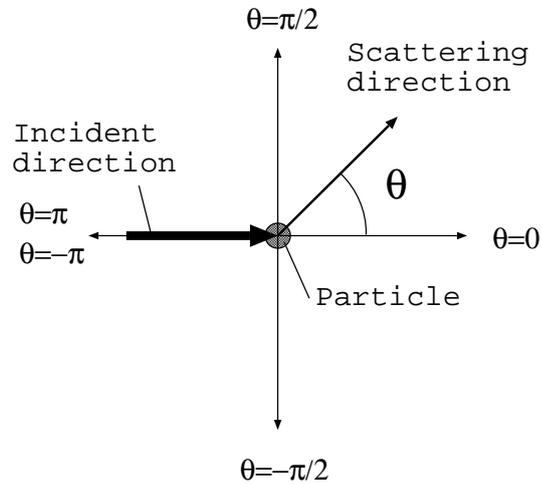


図 3.2: 微粒子による光の散乱

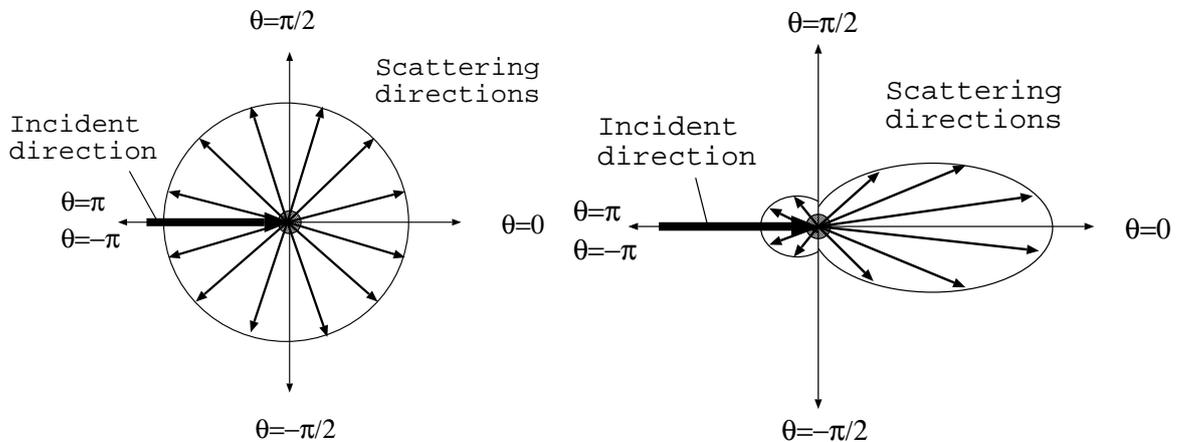


図 3.3: 等方散乱

図 3.4: 前方散乱傾向の強い散乱

弾性散乱にはレイリー散乱とミー散乱がある。粒子が光の波長に対して十分小さい(波長の $1/10$ 以下) ときレイリー散乱が起き、粒子の大きさが波長の $1/10$ から波長より大きいときミー散乱が起きる。粒子がさらに大きくなると散乱は幾何光学的に考えることができる [22][23]。霧による光の散乱は霧の粒子の大きさが数 μm から十数 μm であり、可視光の波長(約 $0.4\text{-}0.7\mu\text{m}$) よりも大きいいためミー散乱に分類さ

れる。

レイリー散乱は波長の短いものほど散乱が強く、ミー散乱は散乱の波長依存性は少ないが、強い前方散乱特性を示す [24][25]。散乱後の進行方向の分布は位相関数によって表される。位相関数に関しては 3.2 節で詳しく述べる。

3.2 関与媒質と位相関数

コンピュータグラフィックスの分野では、様々な光学現象をより簡潔に表現するために様々な手法が編み出されてきた。そのひとつがフォトンマッピングである [26]。フォトンマッピングでは次のような段階を踏んで目標を達成している。まず、光源からフォトンをばらまき、フォトンの分布を表すフォトンマップを作成する。次にフォトンマップで記述された世界に対して光線追跡法を用いて、眼に入射するフォトン进行計算する。

埃、煙、雲、霧などフォトン进行散乱させる物質を関与物質と呼ぶ。表面下散乱が起こる大理石、人肌なども関与物質の一種である。フォトンマッピングは関与媒質を扱うことに長けている。

本研究では、光源 (プロジェクタ) から出たフォトンがフォグディスプレイの霧の層の中をどのように散乱して観測者の目に入るかということを考える上で、関与媒質の考え方を適用する。

フォトンが関与媒質に入射すると、影響を受けずにそのまま通過することもあれば、媒質と相互作用することもある。フォトンと媒質の相互作用では、吸収か散乱のどちらかが起こる。フォトンが媒質との相互作用で散乱もしくは吸収が起こる確率は、散乱係数と吸収係数によって与えられる。

関与媒質内の散乱光の方向依存性は位相関数で記述できる。位相関数は球面上で積分した結果が 1 にならなければいけない。光の散乱する位置を x 、光の散乱方向を $\vec{\omega}$ 、光の入射方向を $\vec{\omega}'$ 、位相関数を $p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})$ とすると、式 (3.1) のように示される。

$$\int_{\Omega_{4\pi}} p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) d\vec{\omega}' = 1 \quad (3.1)$$

位相関数は入射光と散乱光の構成する角度にのみ依存する。位相関数の優位な散

乱方向 (前方散乱か後方散乱か) を明らかにするために、入射光と散乱光の構成する角度を θ とすると、散乱方向の余弦の平均値は式 (3.2) のように計算することができる。

$$g(x) = \int_{\Omega_{4\pi}} p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) \cos \theta d\vec{\omega}' \quad (3.2)$$

$g \in [-1, 1]$ の値は前方散乱であれば正、後方散乱であれば負になる。 g は後に述べる Henyey-Greenstein の位相関数でも使用される変数である。

3.2.1 等方散乱

$\vec{\omega}'$ と $\vec{\omega}$ の構成する角度を θ とすると、 $p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})$ は、 $\theta = 0$ を入射方向に対して前方、 $\theta = \pi$ を入射方向に対して後方として $p(\theta)$ と書き直される。どの方向にも等しい確率で散乱する散乱を等方散乱という。等方散乱の位相関数は定数である。すなわち $p(\theta)$ を位相関数とすると、式 (3.3) のように示される。

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \quad (3.3)$$

式 (3.3) は光子は飛来してきた方向に依存せず、任意の方向に無作為に散乱していくことを意味している。

3.2.2 Henyey-Greenstein の位相関数

Henyey-Greenstein 位相関数 [27] は銀河系の星間物質による散乱を実測値から説明した位相関数であり、海洋・雲・霧・皮膚などにおける散乱の記述に用いられている。Henyey-Greenstein 位相関数は、散乱方向の余弦の平均値を $g \in [-1, 1]$ (ひずみ係数) とすると、式 (3.4) で示される。

$$p(\theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{1.5}} \quad (3.4)$$

散乱は、 g が正の値の時は前方散乱、負の値の時は後方散乱になる。 $g = 0$ の時式 (3.4) は式 (3.3) に等しくなる、すなわち等方散乱となる。 g の値が 1 に近づくほど前

方散乱が強くなる。様々な g の値における Henyey-Greenstein 位相関数を図 3.5 に示す。図 3.5 は極座標表示であり、 $0 < \theta < 2\pi$ の範囲で原点と $p(\theta)$ だけ離れた点の軌跡である。よって横軸は $p(\theta) \cos(\theta)$ 、縦軸は $p(\theta) \sin(\theta)$ である。

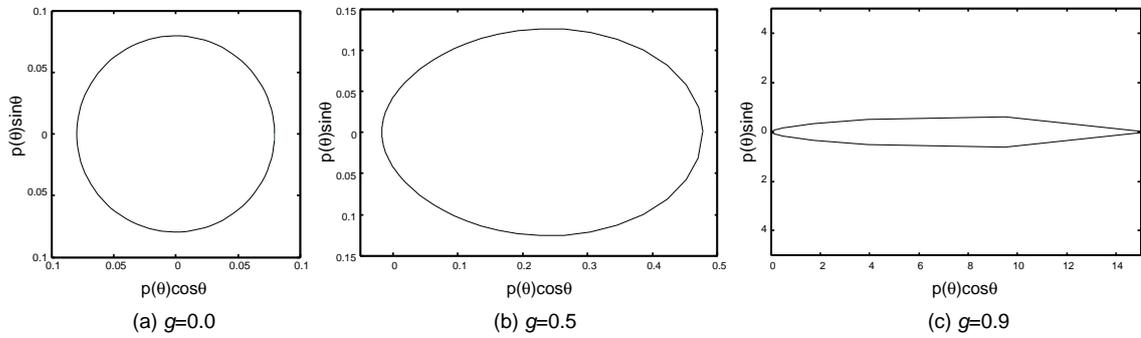


図 3.5: Henyey-Greenstein 位相関数

第4章 スクリーンの形成と映像生成

本章では本研究の提案システムである多視点観察可能なフォグディスプレイのコンセプト、フォグスクリーンの形成方法、投影画像の生成について述べる。

4.1 多視点観察可能なフォグディスプレイ

本研究では、2.1.3節で述べた運動視差を用いた立体ディスプレイと、2.2節で述べたフォグディスプレイを融合した多視点観察可能なフォグディスプレイを提案する。提案する円筒型フォグディスプレイは、複数のプロジェクタで映像を投影し、観察者は視点を変えることによって異なる映像を観察することが出来る。提案システムにおける、複数の使用者による観察の様子を図4.1に示す。

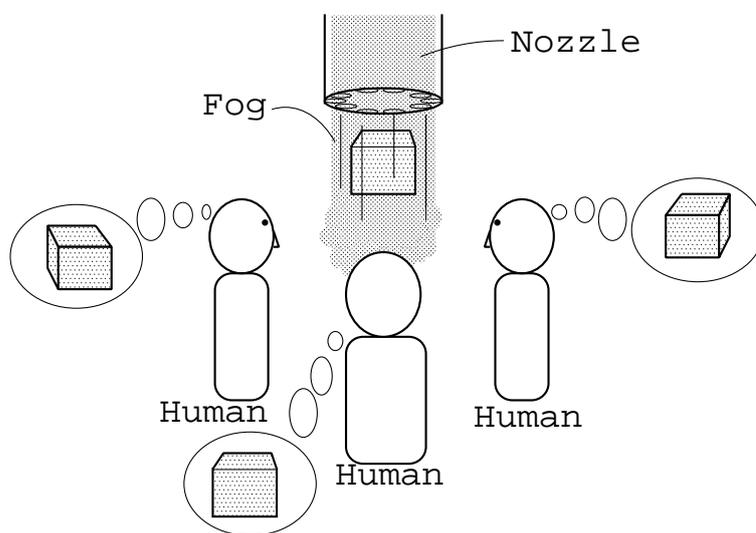


図 4.1: 提案システムにおける観察

霧による散乱は第3章で述べたミー散乱である。ミー散乱は前方散乱が強いので、フォグディスプレイにおいては、観察者はプロジェクタの真正面で最も鮮明な映像

が観察できる。観察者が単一のプロジェクタから投影される映像のみが観察できるように、隣り合うプロジェクタの光軸が構成する最適な角度を決定する必要がある。プロジェクタの配置はフォグディスプレイの光の散乱の角度依存性を調べることによって決定する。プロジェクタと観察者の位置関係、またプロジェクタと観察者の位置関係、また各位置での観察者が観察可能な映像を図 4.2 に示す。

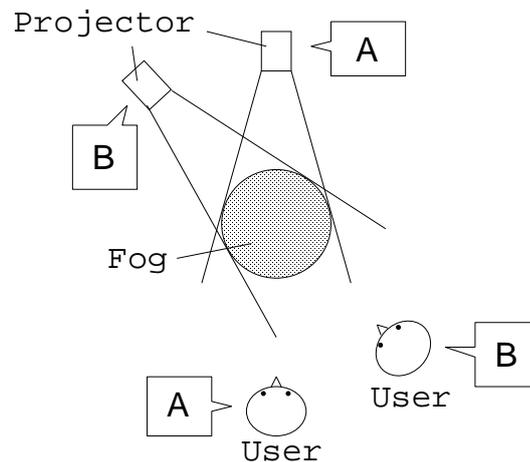


図 4.2: フォグディスプレイの多視点観察

また、霧による映像のぼけを軽減するため、フォグディスプレイの点広がり関数を考える。点広がり関数とは、点光源が広がる程度を表す関数である。求めた点広がり関数によって、ぼけを軽減するフィルタを求める。このフィルタ処理を施した映像を投影すると、ぼけの軽減された映像が観察出来る。

観察者は視点の位置を変えることによって、異なる映像を観察することが出来るが、異なるプロジェクタから投影される映像の位置が一致していない場合、視点を変えた際に自然な観察が出来ない。従って、プロジェクタを校正し、複数のプロジェクタからずれのない映像を投影する必要がある。

4.2 フォグスクリーンの形成

フォグは超音波式加湿器を用いて生成し、生成したフォグを円筒型のパイプによって導き、下方に噴出させる。フォグスクリーンは、フォグを上方に噴出する場合に比べて、重力を考慮して下方に噴出した場合に、より安定することが甲谷らによって確認されている [17]。また、噴出部分でパイプの中央部分を塞ぎ、細いパイプを

円環状に並べることで、フォグの形状を円筒状に保つ。フォグが加湿器で生成され、ノズルから出て行くまでの流れを図 4.3 に示す。

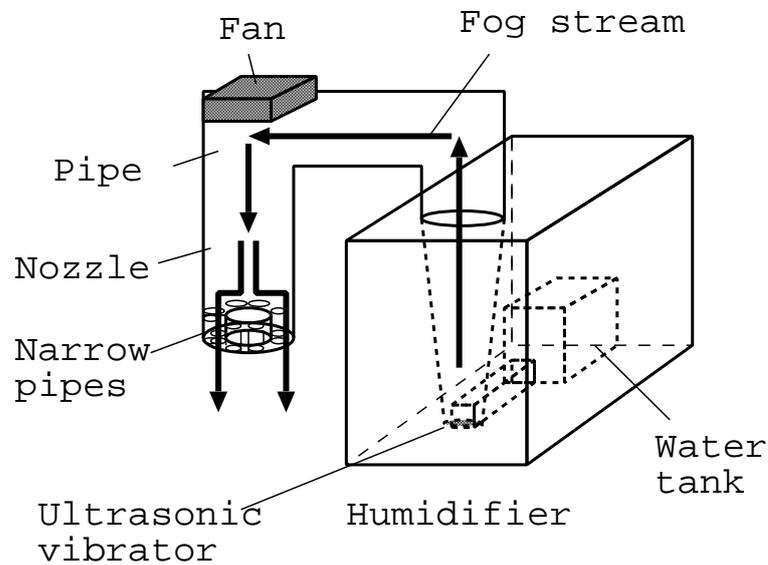


図 4.3: フォグスクリーンの形成

4.3 映像投影

異なった視点から複数のプロジェクタで投影した画像を観察した際の、画像のずれを解消するためには、プロジェクタの位置と姿勢を求める必要がある。本節ではプロジェクタの位置と姿勢を表すプロジェクタパラメータの決定方法と表示する映像の生成について述べる。

4.3.1 プロジェクタパラメータの決定

プロジェクタから投影される画像と、実空間で像を結ぶ画像を結びつける際、プロジェクタパラメータが必要である [28]。三次元空間上の物体を基準とした三次元座標系であるオブジェクト座標系からプロジェクタを基準とする三次元座標系であるプロジェクタ座標系へ変換する行列のパラメータをプロジェクタの外部パラメータといい、プロジェクタ座標系から画像座標系へ変換する行列のパラメータをプロジェクタの内部パラメータという。外部パラメータと内部パラメータを合わせてプ

ロジクタパラメータという。

外部パラメータ

本節では三次元座標間の剛体変換を考える。三次元座標間の剛体変換には回転変換と並進変換がある。回転変換は原点は変えずに、座標軸の向きを変える変換であり、並進変換は座標軸の向きを変えずに、原点の位置を変える変換である。座標の回転変換と並進変換を合わせて剛体変換という。プロジェクトにおいては、オブジェクト座標系からプロジェクト座標系への剛体変換行列の成分がプロジェクトの外部パラメータである。

ある点 P が座標系 1 では $P(x_1, y_1, z_1)$ 、座標系 2 では $P(x_2, y_2, z_2)$ と表されるとし、座標系 2 は座標系 1 を回転させた座標とする。

図 4.4 に座標系 1 と 2 を示す。 $e_{x1}, e_{y1}, e_{z1}, e_{x2}, e_{y2}, e_{z2}$ は、座標系 1、2 の x, y, z 軸における基底ベクトルである。

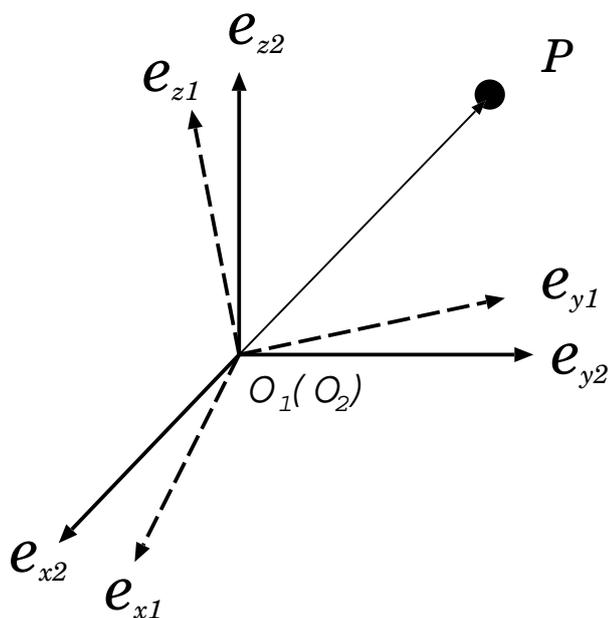


図 4.4: 座標の回転

P の位置を、座標系 1 と 2 の基底ベクトルで表すと式 (4.1) が成り立つ。

$$\overrightarrow{O_1P} = \overrightarrow{O_2P} \Leftrightarrow x_1e_{x1} + y_1e_{y1} + z_1e_{z1} = x_2e_{x2} + y_2e_{y2} + z_2e_{z2} \quad (4.1)$$

式(4.1)の両辺と e_{x2}, e_{y2}, e_{z2} との内積をそれぞれ計算すると、式(4.2)が得られる。

$$\begin{aligned} x_1 e_{x1} \cdot e_{x2} + y_1 e_{y1} \cdot e_{x2} + z_1 e_{z1} \cdot e_{x2} &= x_2 \\ x_1 e_{x1} \cdot e_{y2} + y_1 e_{y1} \cdot e_{y2} + z_1 e_{z1} \cdot e_{y2} &= y_2 \\ x_1 e_{x1} \cdot e_{z2} + y_1 e_{y1} \cdot e_{z2} + z_1 e_{z1} \cdot e_{z2} &= z_2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

式(4.2)を行列で表記すると式(4.3)となる。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{x1} \cdot e_{x2} & e_{y1} \cdot e_{x2} & e_{z1} \cdot e_{x2} \\ e_{x1} \cdot e_{y2} & e_{y1} \cdot e_{y2} & e_{z1} \cdot e_{y2} \\ e_{x1} \cdot e_{z2} & e_{y1} \cdot e_{z2} & e_{z1} \cdot e_{z2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

座標系1と座標系2の変換は逆変換が成り立つので、式(4.4)が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{x2} \cdot e_{x1} & e_{y2} \cdot e_{x1} & e_{z2} \cdot e_{x1} \\ e_{x2} \cdot e_{y1} & e_{y2} \cdot e_{y1} & e_{z2} \cdot e_{y1} \\ e_{x2} \cdot e_{z1} & e_{y2} \cdot e_{z1} & e_{z2} \cdot e_{z1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

次に原点が異なる座標系1、2において座標が $P(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P(x_2, y_2, z_2)$ と表される点Pを考える。座標系2の原点 O_2 は座標系1の座標では (X_2, Y_2, Z_2) と表されるとすると、式(4.5)が成り立つ。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O_1 P} &= \overrightarrow{O_1 O_2} + \overrightarrow{O_2 P} \\ \Leftrightarrow x_1 e_{x1} + y_1 e_{y1} + z_1 e_{z1} &= X_2 e_{x2} + Y_2 e_{y2} + Z_2 e_{z2} + x_2 e_{x2} + y_2 e_{y2} + z_2 e_{z2} \end{aligned} \quad (4.5)$$

両辺で e_{x2}, e_{y2}, e_{z2} との内積を計算すると、式(4.6)のように示される。

$$\begin{aligned} x_1 e_{x1} \cdot e_{x2} + y_1 e_{y1} \cdot e_{x2} + z_1 e_{z1} \cdot e_{x2} &= X_2 + x_2 \\ x_1 e_{x1} \cdot e_{y2} + y_1 e_{y1} \cdot e_{y2} + z_1 e_{z1} \cdot e_{y2} &= Y_2 + y_2 \\ x_1 e_{x1} \cdot e_{z2} + y_1 e_{y1} \cdot e_{z2} + z_1 e_{z1} \cdot e_{z2} &= Z_2 + z_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

式(4.6)を行列で表記すると式(4.7)となる。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{x1} \cdot e_{x2} & e_{y1} \cdot e_{x2} & e_{z1} \cdot e_{x2} \\ e_{x1} \cdot e_{y2} & e_{y1} \cdot e_{y2} & e_{z1} \cdot e_{y2} \\ e_{x1} \cdot e_{z2} & e_{y1} \cdot e_{z2} & e_{z1} \cdot e_{z2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

式 (4.7) を同次座標系で表すと式 (4.8) のように表される。

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{x1} \cdot \mathbf{e}_{x2} & \mathbf{e}_{y1} \cdot \mathbf{e}_{x2} & \mathbf{e}_{z1} \cdot \mathbf{e}_{x2} & -X_2 \\ \mathbf{e}_{x1} \cdot \mathbf{e}_{y2} & \mathbf{e}_{y1} \cdot \mathbf{e}_{y2} & \mathbf{e}_{z1} \cdot \mathbf{e}_{y2} & -Y_2 \\ \mathbf{e}_{x1} \cdot \mathbf{e}_{z2} & \mathbf{e}_{y1} \cdot \mathbf{e}_{z2} & \mathbf{e}_{z1} \cdot \mathbf{e}_{z2} & -Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= D \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

D を剛体変換行列という。

内部パラメータ

プロジェクタにおける内部パラメータはプロジェクタ座標系から画像座標系への変換行列の成分である。理想的なプロジェクタでは、プロジェクタ座標系から画像座標系への変換行列はピンホールカメラモデルで考えられる。ピンホールカメラとは、レンズを使わず針穴 (ピンホール) を利用したカメラである。ピンホールカメラモデルを図 4.5 に示す。 X, Y は、 C は焦点面の座標で Z は焦点面からの距離を表す座標、 x, y は画像平面の座標、 c は画像中心である。焦点面と画像平面は f 離れている。 $M(X, Y, Z)$ は空間中の物体の位置で、 $m(x, y, f)$ は画像平面の像の位置である。ピンホールカメラのように、物体の点とピンホールと画像平面上の点が一直線になっている射影を中心射影と言う。

M と m の関係は、式 (4.9)(4.10) に示される。

$$x = f \frac{X}{Z} \tag{4.9}$$

$$y = f \frac{Y}{Z} \tag{4.10}$$

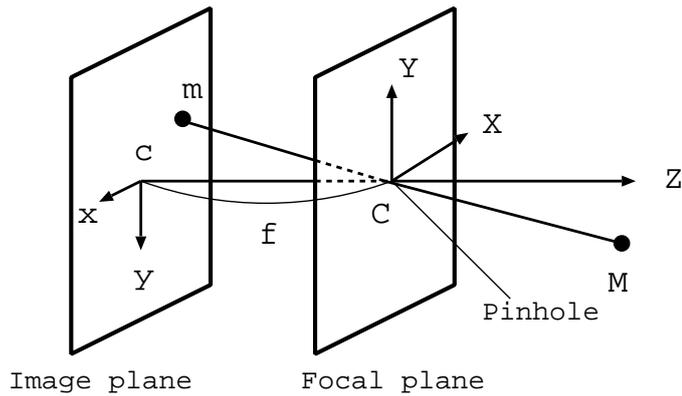


図 4.5: ピンホールカメラの中心射影

中心射影を同次座標で記述すると式 (4.11) のように書ける。

$$\begin{pmatrix} hx \\ hy \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$= P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

P は中心射影行列である。

プロジェクタパラメータ

上述した剛体変換行列 D とプロジェクタ座標系から実際のプロジェクタ画像平面への中心射影行列 P を合わせると式 (4.12) のように書ける。

$$\begin{pmatrix} hx \\ hy \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$C_{11} - C_{34}$ がプロジェクタパラメータである。

画像平面上の座標が既知の画像を、三次元位置が既知の物体に投影することで、プロジェクタパラメータを計算することが出来る。画像上の点 (x_{ci}, y_{ci}) がオブジェクト座標系 (X_i, Y_i, Z_i) に投影されているとする。一組の対応点の情報が与えられる

と三つの方程式が得られるが、未知数 h が一つ増えるため、実質的には二つの方程式が得られる。プロジェクトパラメータは 12 個あるため、6 組以上の対応点の情報が必要になる。一般的には、多くの対応点を用いて最小二乗法を用いて求める。また、プロジェクトパラメータの値を一意に決めるため、 C_{34} は 1 とする。

外部パラメータ D の成分 \mathbf{R} と \mathbf{t} が式 (4.13)、式 (4.14) のように表されるとすると、プロジェクトパラメータは内部パラメータ行列 P と外部パラメータ行列 D の積であるので、式 (4.15) のように示される。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{r}_2^T \\ \mathbf{r}_3^T \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} = PD \quad (4.15)$$

$$= \begin{pmatrix} f\mathbf{r}_1^T & ft_x \\ f\mathbf{r}_2^T & ft_y \\ f\mathbf{r}_3^T & ft_z \end{pmatrix}$$

式 (4.15) の両辺の成分を比較していくと、プロジェクトパラメータが内部パラメータと外部パラメータに分解出来る。

4.3.2 プロジェクタパラメータに基づいた画像の描画

3.2節で述べた Henyey-Greenstein の位相関数のパラメータ g を求めることで、ミー散乱の角度依存性が決まり、プロジェクタの配置は決定するが、実際は求めた位置に、手作業で正確にプロジェクタを設置するのは困難である。従って実際に配置されたプロジェクタからは、仮想的な位置にあるプロジェクタからあたかも投影されたかのように、画像を補正してフォグスクリーンに投影することが必要である。図 4.6 に仮想プロジェクタ VP、実プロジェクタ AP、仮想カメラ VC1・VC2、フォグスクリーンの位置関係を示す仮想カメラ VC1、VC2 はプロジェクタから投影する画像を得るために必要であり、それぞれの位置は仮想プロジェクタ VP、AP と一致している。

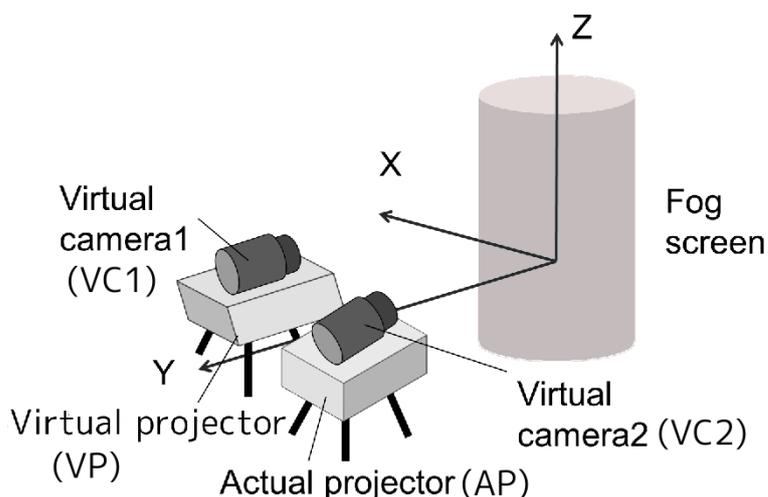


図 4.6: フォグスクリーンとプロジェクタの位置関係

実プロジェクタ AP から投影する画像 I_A は、仮想プロジェクタ VP から投影された画像 I_V を、実プロジェクタ AP の位置に置かれた仮想カメラ VC2 から見ることによって得られる。この処理は実空間内で行えないため、実空間と一致した仮想空間において、コンピュータグラフィクスを用いて仮想カメラ VC2 から見える画像をレンダリングすることによって実現する。画像生成に必要な仮想カメラ VC2 の位置・姿勢・画角などの情報は、実プロジェクタ AP と同じであるため、4.3.1 節で述べた手法により求まっているプロジェクタパラメータを利用することができる。

仮想プロジェクタ VP から投影されるべき画像 I_V の取得方法は、フォグディスプレイ

レイに提示したい対象の性質に依存する。実物体を全周囲から撮像した映像を提示する場合には、撮像されている画像が投影されるべき画像 I_V そのものである。一方、3DCG で生成される画像を提示したい場合には、仮想プロジェクタ VP と同じ位置に置かれた仮想カメラ VC1 から CG 空間をレンダリングすることによって投影すべき画像 I_V を得ることができる。

以下では、3DCG を実プロジェクタから投影する際の手順に従って各処理の詳細を説明する。

仮想的なプロジェクタから投影されるべき画像 I_V の生成

1. 仮想的プロジェクタ VP から、フォグディスプレイに映像を投影すると考える。オブジェクト座標系と一致した CG 空間上で、フォグディスプレイに提示する物体を原点 (フォグディスプレイの仮想的な中心位置) に配置する。
2. 仮想プロジェクタ VP の位置に仮想カメラ VC1 を配置し、仮想カメラ VC1 から CG 空間をレンダリングし、テクスチャとして取得する。これが画像 I_V である。三次元空間上の物体と仮想プロジェクタ VP と仮想カメラ VC1 の配置を図 4.7 に、画像 I_V を図 4.8 に示す。

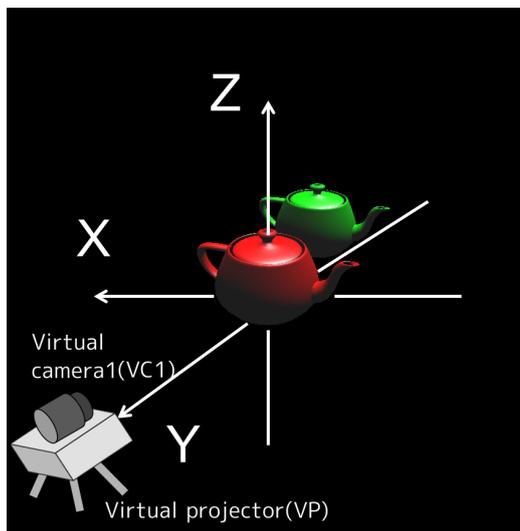


図 4.7: 三次元空間上の物体の配置



図 4.8: 取得したテクスチャ(画像 I_V)

実際のプロジェクタから投影する画像 I_A の生成

次に、実プロジェクタ AP から投影する画像 I_A を画像 I_V から生成する。

1. テクスチャを取得した CG 空間とは別の CG 空間上で、テクスチャを仮想的な平面上にマッピングする。平面の中心は原点とし、平面の法線方向は仮想プロジェクタ VP の光軸方向である。すなわち、仮想プロジェクタ VP によって投影される位置にテクスチャ画像を提示する。
2. 仮想プロジェクタ VP とは位置が異なる実プロジェクタ AP から投影すべき映像は、実プロジェクタ AP の位置に置かれた仮想カメラ VC2 から見られる映像に等しい。CG 上の仮想カメラ VC2 の視点の位置・姿勢を、プロジェクタの外部パラメータによって決まる値に設定し、仮想カメラ VC2 からテクスチャを見た映像をレンダリングする。すなわち、1. でマッピングしたテクスチャを実プロジェクタ AP の位置から観察した結果を描画する。仮想プロジェクタ VP、実プロジェクタ AP、仮想カメラ VC1・VC2、テクスチャの位置関係を図 4.9 に、実プロジェクタ AP が投影する画像 I_A を図 4.10 に示す。

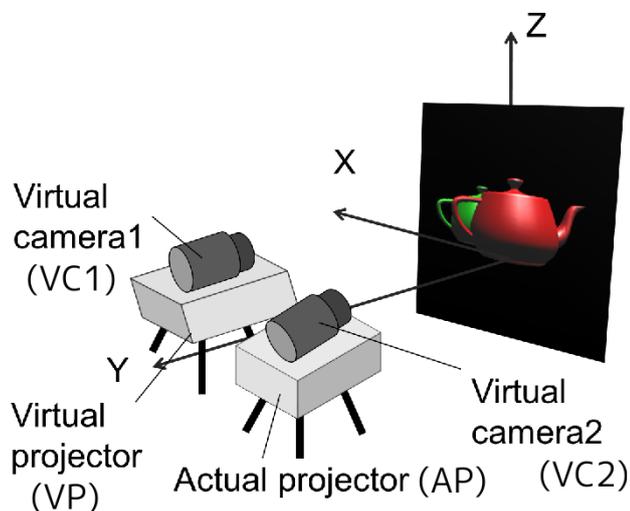


図 4.9: プロジェクタとテクスチャの位置関係



図 4.10: 実際のプロジェクタが投影する画像 I_A

3. 画像 I_A を実プロジェクタ AP から投影すると仮想プロジェクタ VP から投影した映像と実質的に同じになる。

第5章 実装と結果

本章では製作したシステムと散乱パターンの計測、計測した散乱パターンに基づいた映像投影結果を示す。

5.1 システムの構成

試作したシステムの外観図を図 5.1 に示す。システムは霧発生装置である加湿器と3台のプロジェクタから構成される。プロジェクタの配置を図 5.2 に示す。フォグは加湿器からパイプによって導かれ、下方に噴出させる。フォグの噴出部(図 5.3)では多数の細いパイプを円筒状に並べ、円筒の中心は塞ぐ。細いパイプによってフォグの流れを整えることにより、フォグの形状を円筒状に保つことが可能となる。

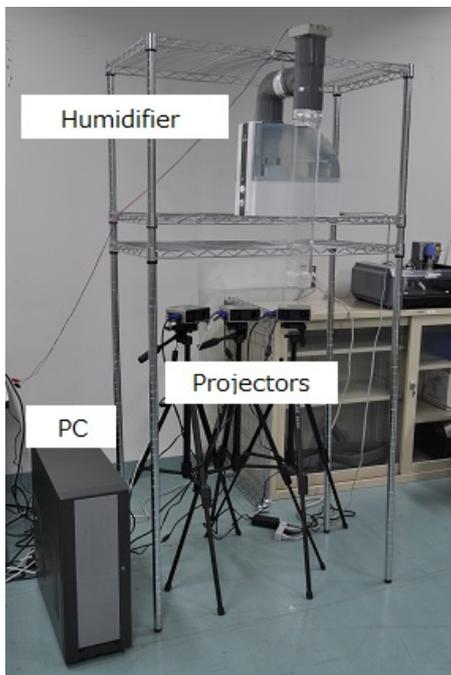


図 5.1: 試作システム

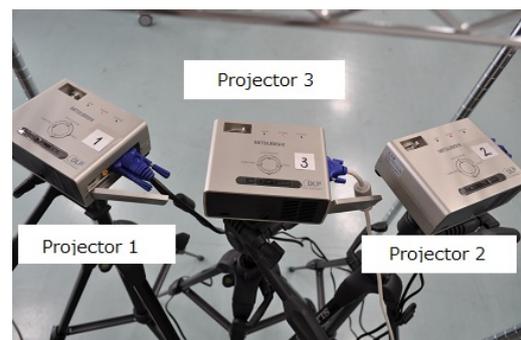


図 5.2: プロジェクタの配置

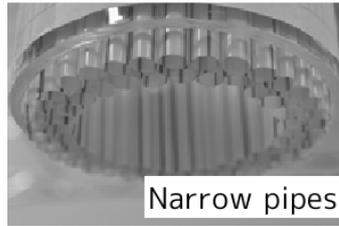


図 5.3: フォグ噴出部

表 5.1: 使用機材

超音波式加湿器 2300A(Boneco 製)	気化能力	410ml/h
プロジェクタ LVP-PK20(三菱電機製)	表示方式	DLP
	画素数	800×600
	光源	LED
	明るさ	25lm
PC	OS	Ubuntu 10.10
	CPU	Intel(R)Core i5 2.80GHz
	メモリ	3.9GB

5.1.1 散乱パターンの計測

製作したフォグディスプレイに直径4ピクセルの点を表示し、プロジェクタの光軸と観察者の視線の構成する角を変化させながら散乱光の強度を計測した結果を図5.2に示す。

表 5.2: 散乱の角度依存性

角度 [deg]	0	5	10	15	20
強度 [a.u.]	225.7	41.7	3.92	1.22	0.477
	40	60	80	90	
	0.126	0.0218	0.0077	0.0063	

位相関数パラメータ決定

計測結果から最小二乗法によりHG位相関数のパラメータ g を推定した結果、 $g=0.94$ となった。よって本システムのフォグディスプレイは強い前方散乱性を示

すことが確認された。

プロジェクタの配置

表 5.2 からプロジェクタ間の角度を 20 度とすると散乱強度は約 $1/1000$ となるため隣接するプロジェクタの映像の影響が極めて小さくなることが分かった。

5.2 映像の投影

ずれのない映像を表示するために 4.3 節で述べたようにプロジェクタの較正を行った。

5.2.1 プロジェクタパラメータの決定

フォグディスプレイの中心に目盛を 10mm に設定した一辺 50mm の立方体 (図 5.4) を置く。この立方体に沿って座標軸を設定し、オブジェクト座標系とする。等間隔の目盛を描画した映像 (図 5.5) をプロジェクタで投影する。映像の格子点とオブジェクト座標系との対応点を 24 点取得し、4.3.1 節で述べた式 (4.12) に代入し、最小二乗法でプロジェクタパラメータを求める。フォグディスプレイの存在する 3 次元座標とプロジェクタから投影する画像上の座標が関係付けられる。求めたプロジェクタパラメータを内部パラメータと外部パラメータに分解し、内部パラメータと外部パラメータを使って投影画像を描画する。

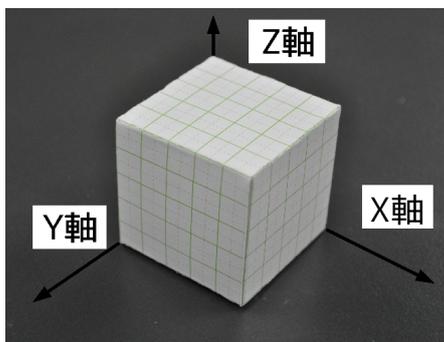


図 5.4: オブジェクト座標系の指標

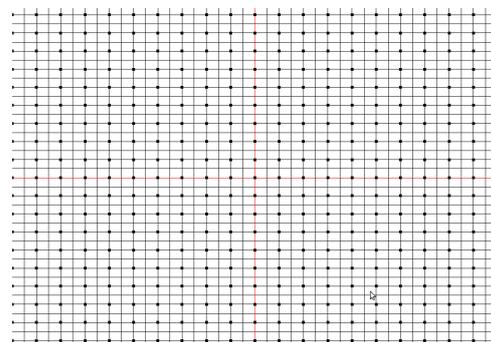


図 5.5: 較正用投影映像

5.2.2 投影結果と考察

3台のプロジェクトから投影する映像を図5.6に示す。



図 5.6: プロジェクタから投影する画像

本システムでの観察風景を図5.7に示す。

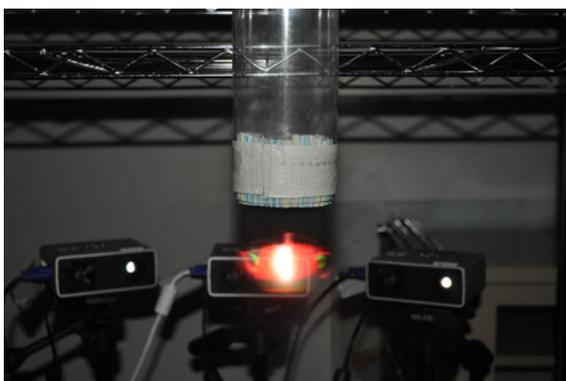


図 5.7: 観察風景

図5.6をフォグに投影し、プロジェクトの較正を行わずに各プロジェクトの正面から観察した結果を図5.8に示す。

プロジェクトの較正を行い、図5.6をフォグに投影し、各プロジェクトの正面から観察した結果を図5.9に示す。



(a) プロジェクタ 1 の正面 (b) プロジェクタ 3 の正面 (c) プロジェクタ 2 の正面

図 5.8: 観察結果 (較正前)



(a) プロジェクタ 1 の正面 (b) プロジェクタ 3 の正面 (c) プロジェクタ 2 の正面

図 5.9: 観察結果 (較正後)

プロジェクタの較正を行った場合には、較正を行っていない場合に比べて、映像の高さ、大きさが補正されており、プロジェクタ間で視点を移動させた際に映像のずれが少ないことが確認された。また、各プロジェクタの正面から観察した場合、隣り合うプロジェクタから投影された映像が混ざらず、視点に応じた映像のみが観察できることが確認された。視点を移動させることで運動視差が生じ、立体感が得られることが確認された。

較正をより正確に行うためには、オブジェクト座標と画像座標系の対応点を取得する際、より多くの対応点を画像座標系においても、オブジェクト座標系においても分布が均一になるよう取得することなどが考えられる。また、円筒状のフォグスクリーンをより安定させるためには、単位時間あたりの霧化量を増やし、ファンの回転数をあげることや、霧噴出部であるノズルを多数の細いパイプからスリットに変えることや、フォグスクリーンの内側と外側に円筒状に空気の層を噴出させ整流することなどが考えられる。

第6章 おわりに

本研究では霧による光の散乱の前方指向性を利用し、観察者が視点を変えると、視点に応じた映像が観察できる多視点観察が可能なフォグディスプレイを構築した。円筒型に噴出させたフォグスクリーンに複数のプロジェクタから異なる映像を投影することで、霧の散乱指向性により、各々のプロジェクタからの映像は主にプロジェクタの正面のみで観察可能となる。本システムでは視点に応じて観察可能な映像が変わるため、観察者が視点を移動させた際に運動視差が生じ、立体感が得られることが確認された。

霧によるミー散乱の影響を考慮し、ミー散乱の角度依存性、を求め、角度依存性に基づいたプロジェクタの配置の決定を行った。その結果、プロジェクタの正面では、複数のプロジェクタからの映像が混ざることなく、正面のプロジェクタからの映像のみが観察できることが確認できた。また、各プロジェクタの較正を行い、プロジェクタパラメータに応じた映像の生成・表示を行った。その結果、較正を行わなかった場合に比べて、視点の移動によって観察できる映像が変わった際、映像のずれが軽減されることが確認された。

謝 辞

本研究は大阪大学基礎工学部で行ったものである。

研究環境を提供していただき、研究テーマを決める際の相談や、テーマ決定後も進捗報告等で、的確かつ丁寧な指導をして下さいました、大阪大学基礎工学研究科大城理 教授に篤くお礼申し上げます。本研究の副査教員として、ご指導賜りました大阪大学基礎工学研究科 三宅淳 教授に感謝致します。担当教員として研究の方向性を示して下さり、また知識不足・勉強不足のために研究に行き詰まった際、お忙しい中何度も快く相談に乗って下さいました大阪大学基礎工学研究科 井村誠孝 准教授に心よりお礼申し上げます。折に触れ、学生と談話の機会を設けて下さり、なかなか卒業研究のテーマが決まらず悩んでいた際も親身になって相談に乗って下さいました、大阪大学基礎工学研究科 黒田嘉宏 助教に深く感謝いたします。また、進捗報告などの際、発表資料の書き方などから丁寧に指導して下さいました、山梨大学大学院医学工学総合研究部 鍵山善之 助教に深く感謝いたします。また、大城研究室の吉元俊輔氏、奥村陽介氏、重枝慧氏、末竹哲也氏、田中翔太氏、徳井隆博氏、濱田友貴氏、加藤雄樹氏、繁田悠氏、増田拓氏、森口裕樹氏に心からお礼申し上げます。初めての研究室生活で分からないことも多々ありましたが、先輩方には研究室生活の些細なことから、研究内容に至るまで様々な事をご指導いただき、深く感謝しております。最後に、毎日共に夜遅くまで残り、助け合い励ましあってきた、大城研究室の同期の若松孝圭氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 長屋龍人. 映像文化はどう変わってきたか. 映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 1, p. 23, 2001.
- [2] 桑山哲郎. 立体映像とホログラフィ. テレビジョン会報告, Vol. 12, No. 29, pp. 1-6, 1988.
- [3] 榎並和雅. 総論-高臨場感システムの研究推進に向けて-. 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 5, pp. 578-582, 2007.
- [4] 本田捷夫. 立体映像表示技術の概論. 立体視テクノロジー, pp. 79-86. NTS, 東京, 2008.
- [5] 石川洵. 空間映像による映像と現実世界の融合. 立体視テクノロジー, pp. 391-398. NTS, 東京, 2008.
- [6] 石川洵. 空間映像としてのミニライブシアター. 電気情報通信学会研究報告, Vol. 103, No. 413, pp. 7-9, 2003.
- [7] 佐藤隆夫. 立体視の視覚心理. 立体視テクノロジー, pp. 39-47. NTS, 東京, 2008.
- [8] 谷口実. 3D ディスプレイの現状と展望-3D 市場の創出と拡大に向けた取り組み-. 立体視テクノロジー, pp. 88-94. NTS, 東京, 2008.
- [9] T.Yendo, N.Kawakami, T.Susumu. Seelinder:the cylindrical lightfield display. *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies*, 2005.
- [10] K.Ito, H.Kikuchi, H.Sakurai, I.Kobayashi, H.Yasunaga, H.Mori, K.Tokuyama, H.Ishikawa, K.hayasaka, H.Yanagisawa. 360-Degree Autostereoscopic Display. *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, 2010.

- [11] RayModeler. <http://www.sonyexplorascience.jp/contents/event.html>(参照 2011-01-06).
- [12] 桑山哲郎, 辻内順平 (編). ホログラフィックディスプレイ. 産業図書, 東京, 2006.
- [13] 空間プロジェクタ. <http://www.holoart.co.jp/tobi01.html>(参照 2011-01-05).
- [14] Catty 話すマネキン. <http://www.holoart.co.jp/cho01.html>(参照 2011-01-05).
- [15] R.Otsuka, T.Hoshino, Y.Horry. Transpost:A Novel Approach of 360 Degrees-Viewable 3d Solid Images. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, No. 2, pp. 178–185, 2006.
- [16] I.Rakkolainen, S.Diverdi, A.Olwal, N.Candussi, T.Hullerer, M.laitinen, M.Piirto, K.Palovuori. The Interactive FogScreen. *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*, 2005.
- [17] 甲谷佑太, 室地戸俊介, 野口幹容, 高野邦彦. ホログラフィ立体テレビシステムの開発. 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p. 197, 2007.
- [18] 山越幸太, 川田源太, 砂原一茂, 高野邦彦. 視域拡大型ホログラフィック 3DTV の検討. 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p. 182, 2008.
- [19] 文奈美, 曾根順治, 夏井伸隆, 長谷部智宏, 吉田庸一. Pocket cosmos-手のひらに宇宙を-. 芸術科学会論文誌, Vol. 3, No. 4, pp. 244–249, 2004.
- [20] C.Lee, S.DiVerdi, T.Hollerer. Depth Fused 3D Imagery on an Immaterial Display. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 15, No. 1, pp. 20–33, 2009.
- [21] 東佑圭, 橋本直己. 立体感を定時可能な霧ディスプレイの開発. 映像情報メディア学会冬季大会, 2010.
- [22] 小倉義光. 一般気象学. 東京大学出版会, 1999.
- [23] 早川宗八郎. 物質と光. 朝倉書店, 東京, 1976.

- [24] 西田友是. リアリスティックな自然景観 CG 画像の追求. 第 16 回 NICOGRAPH/MULTIMEDIA 論文コンテスト, pp. 199–203, 2000.
- [25] Z.Hajjarian, M.kavehrad, J.Fadlullah. Analysis of Wireless Optical Communications Feasibility in Presence of Clouds Using Markov Chains. *IEEE journal on selected areas in communications*, Vol. 27, No. 9, pp. 1526–1534, 2009.
- [26] H.W.Jensen. フォトンマッピング-実写に迫るコンピュータグラフィックス. オーム社, 東京, 2002.
- [27] L.G.Henyey, J.L.Greenstein. Diffuse radiation in the galaxy. *Astrophysics Journal*, Vol. 93, pp. 70–83, 1941.
- [28] 徐剛, 辻三郎. 三次元ビジョン. 共立出版, 東京, 1998.