



修士論文

両眼視差の原理を用いた空中浮遊型3次元  
映像ディスプレイ  
DLFI(Display-Less-Floating Image)の  
提案)

2007年2月2日

指導教員 安田 浩 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科  
電子情報学専攻 56435

細見 武郎

# 内容梗概

---

近年、情報技術の発達に伴い、実世界の情報を完全に再現しようと立体映像表示技術の開発が様々な形で行われるようになった。理想的な映像表現を求めて、人々が共有したいと思った光景をそっくりそのまま相手に伝えられる様に、電子映像の高精細化や伝送効率の改善、平面映像の限界を打破する立体映像化の試みなどが、様々な手法を用いて行われてきた。特に立体映像化では、1922年に米国で、左右レンズの色が赤青と異なるアナグリフ眼鏡を用いて、左右眼で異なる2つの映像を看視するステレオ立体映画の試みが開始され、古くから研究が行われている。

しかし、3次元映像表示技術では、眼の機能である輻輳と調節機能が正常に働かないため視覚疲労が起きる問題や、ユーザーが利用する情報量が莫大となり、動画再生などができないため、操作に不便が生じてしまう問題など多くの障害が存在し、未だに理想的な映像表現がなされていない様に思われる。

そこで本論文では、理想的な映像表示技術を目指し、3次元立体映像表示技術の研究を行い、立体映像表示技術として両眼視差の原理を用いた空中浮遊型映像技術である DLFI(Display-Less Floating Image) の提案を行う。両眼視差の原理を用いる場合、2眼式映像ディスプレイを用いれば情報量が少ないため、動画などのコンテンツ製作に有利でありユーザーにとって利用しやすい環境となる。また、2眼式映像技術で問題となる眼精疲労なども映像を空中に浮遊させることで解決することができる。

評価実験では、従来の立体映像表示技術との比較を主観評価してもらい、提案手法の有効性を検証する。そして提案手法での利用方法および検討などについて述べる。

# 目次

---

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	2
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	関連研究	3
2.1	立体視の要因	4
2.1.1	立体視要因のまとめ	4
2.2	立体映像表示方式の種類	4
2.2.1	眼鏡あり方式	6
2.2.2	眼鏡なし方式	7
2.2.3	光線再生方式	10
2.3	特殊なスクリーンを用いた方式	11
2.3.1	回転スクリーン方式	11
2.3.2	DFD(Depth-Fused 3D) 方式	11
2.3.3	Cheoptics360	12
2.4	空中浮遊型映像方式	14
2.4.1	立体映像提示システムのまとめ	14
2.5	まとめ	16
第 3 章	立体映像表示システムの提案	17
3.1	はじめに	18
3.2	提案符号化手法の概要と目的	18
3.3	フレネルレンズの利用	19
3.4	DLFI の提案	19
3.5	提案手法の評価方法	19
3.6	関連研究との比較	20
第 4 章	DLFI の評価	21
4.1	はじめに	22
4.2	実験条件	22
4.3	実験結果	22
4.4	提案手法の評価	23
4.5	凹面ミラーの利用	23
第 5 章	結論	25
5.1	本研究の成果	26
5.2	今後の展望	26

目次	iii
謝辞	27
参考文献	28
発表文献	30

# 目次

---

2.1	立体視要因	5
2.2	輻輳調節矛盾	5
2.3	看視者と対象物との距離に応じた奥行き知覚要因	5
2.4	立体映像表示技術の種類	6
2.5	アナグリフ方式	6
2.6	偏光方式	7
2.7	液晶シャッター方式	8
2.8	レンチキュラ方式	9
2.9	視差バリア方式	9
2.10	超多眼方式	10
2.11	多重テレセントリック 3D ディスプレイ	11
2.12	Holovizio	12
2.13	DFD(Depth-Fused 3D)	12
2.14	DFD(Depth-Fused 3D) の立体要因	13
2.15	cheoptics360	13
2.16	一般的な空中浮遊映像表示技術	14
2.17	3D フローティングビジョン	14
2.18	heliodydisplay	15
3.1		18
3.2	DLFI(Display-Less Floating Image)	19
3.3	DLFI の仕組み	20
4.1	DLFI の評価実験	22
4.2	評価実験アンケート	22
4.3	DLFI 手法の主観評価	23
4.4	凹面ミラーによる映像結像方法	24
4.5	視域を広げる DLFI 方式	24

# 表目次

---

2.1 立体映像表示技術まとめ . . . . .	15
---------------------------	----

# 第1章

---

## 序論



## 1.1 本研究の背景と目的

近年、情報技術の進歩により映像表示技術が格段に進歩し、実世界の情報をより正確に提示するシステムが多く研究されるようになってきている。情報伝達手段としての理想映像を求めて、人々が共有したいと思った光景をそっくりそのまま相手に伝えられる様に、電子映像の高精細化や伝送効率の改善、平面映像の限界を打破する立体映像化の試みなどが精力的に行われて来たが、未だ実物と同レベルの映像品質までには至っていない様に思われる。そこで本論文では、理想的な映像表示技術を求めて、3次元映像表示技術の提案を行い、表示された映像技術の検討を行う。

### 3次元映像

立体映像表示技術の問題の一つとして、通常の2次元映像ディスプレイに比べて視覚疲労が非常に起きやすいという問題がある。これは我々が現在利用している2次元映像ディスプレイにおいても、解像度を高くし、利用するユーザの眼に負担がかからないように、適当な輝度を選んで映像を製作していることからわかるように、重大な課題の一つとなっている。このため、視覚疲労を起こす要因を調査し、提案する手法の中で、視覚疲労現象を低減させる方法について述べる。

また、立体映像技術として望まれる臨場感、立体感などについては、人の立体視の要因である両眼視差、輻輳、調節、運動視差に着眼し、その中で最も重要度の高い両眼視差の原理を重視した手法を用いる。その手法における視覚疲労現象について検討する。

そこで本研究では、空中浮遊型映像技術の利点を生かすことにより、視覚疲労の少ない、高い立体感の得られる両眼視差の原理を用いた立体空中浮遊型映像 DLFI(Display-Less Floating Image) を提案する。提案手法では、まず両眼視差の原理を用いたディスプレイを用意する。そして、そのディスプレイから出される映像情報を、フレネルレンズを用いることにより空中に映像を浮遊させる。空中に浮遊させた映像は、調節、輻輳の機能が正常に働きやすくて視覚疲労現象を低減させる効果を持つ。すなわち、高い立体感を持った立体映像技術とを実現する。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、関連研究を紹介する。まず、なぜ人がモノを「立体」として認識するのかの要因を挙げる。次に紹介する様々な立体映像表示技術で、どの要因を満たしているかの説明を行う。最後に様々な立体映像技術がある中、どの点を重視するのかをまとめる。

第3章では、自由視点画像合成に基づく光線空間データの視点依存型符号化手法を提案する。これは、ある視点位置およびその周辺の情報を重点的に符号化し、それ以外の情報をビットレートに応じて付加していく、階層的な符号化方式である。ここでは、提案手法が想定するアプリケーション例について説明し、提案手法における符号化手順の概要について述べる。また、このような手法に適した評価方法について検討するとともに、関連研究と比較した場合の提案手法の位置づけを述べる。

第4章では、提案手法の評価実験を行う。まず、提案手法を実際に多くの方々に利用してもらい、従来の立体映像表示技術と比較した主観評価について述べる。提案手法では、立体感と臨場感に優れていることが示され、視覚疲労現象が起きにくいことを示す。最後に、提示される問題について検討し、

第5章では、本研究の成果をまとめるとともに、今後の展望について述べる。

## 第2章

---

## 関連研究

## 2.1 立体視の要因

近年, 多くの立体映像表示技術が存在する中, 人間の立体視の要因について考え, 評価を正しく行う必要がある。立体視の原理は, 主に5つ要因が原因であり, 詳しく述べることにする。

**両眼視差** 左右の目の位置が異なる事により, 両網膜に写る被写体映像の位置の僅かなずれから生じる。この原理を両眼視差といい, 最も活用される原理である。この原理を用いて1922年に米国で, 左右レンズの色が赤青と異なるアナグリフ眼鏡を用いて, 左右眼で異なる2つの映像を看視するステレオ立体映画の試みが開始されている。

**輻輳** 両眼で対象物を見るとき, 視距離によって両目が見込む角度(輻輳角)が異なる。この機能により奥行きを知覚することができるので, 立体感を生む。

**調節** 対象物の視距離に応じて目の焦点を合わせるために, 目のレンズである水晶体の変形を毛様体筋の調節で行う。この調節量の大小が立体感を生む。輻輳・調節は概ね1m以内の距離で役割を果たす。立体映像表示技術では, 輻輳と調節の機能を完全に利用するのが難しく, 輻輳調節矛盾という現象を起こし, 視覚疲労が起きる要因に繋がる(図2.2)。

**運動視差** 視点が運動することによって立体対象物の網膜上の形状等が変化する。その運動の方向と形状などの変化が, 立体感を生む。看視者の動作が必要な上, 立体対象物が看視者との距離に応じて, 立体感要因の強さが変化し, 遠方の被写体の場合は効果が低いため, 近辺の被写体の場合は効果が高い特徴を持つため要因として不安定な要素を持つ。通常のディスプレイでは視点を動かすという状況が少なく, またこの原理を完全に再現する場合, 光線空間情報を再現する必要となる場合が多いので, 立体映像表示技術では, この要因を満たす技術が少ないというのが現状である。

**画像要因** 立体視の心理的要因で, 平面映像であっても, 透視図法的な構図であったり, 像の大きさ, 明るさ, コントラストの変化等で立体感が生じる。図のように陰影をつけた画像を知覚する場合, 明るい部分を手前, 上側にあると認識し, 陰の部分をお, 下側にあると心理的に知覚する。例えば, 図2.1右では, 右側のボールが手前に見える。

### 2.1.1 立体視要因のまとめ

以上示した要因は, 長田らの行った心理実験により看視者と対象物との距離によって, 奥行き知覚感度が変わるといわれる。図2.3では, 主に両眼視差が最も立体視の要因に関わりがあることを示し, 立体映像技術の最重要要因として扱われる。

## 2.2 立体映像表示方式の種類

図2.4に立体映像表示技術の分類を示す[1]。

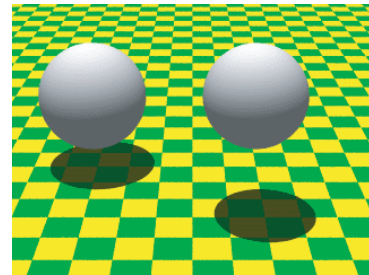


図 2.1: 立体視要因

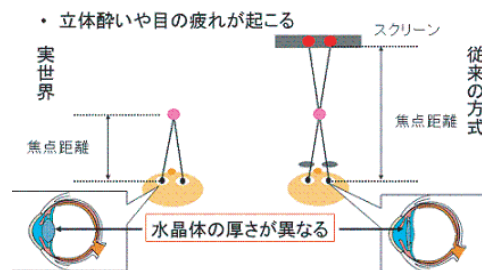


図 2.2: 輻輳調節矛盾

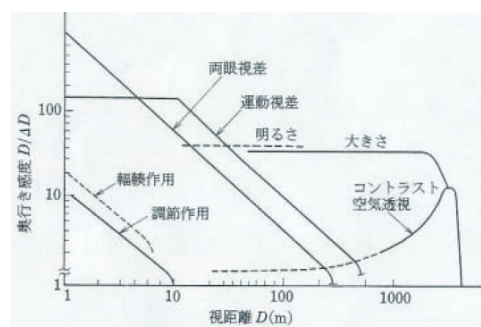


図 2.3: 看視者と対象物との距離に応じた奥行き知覚要因

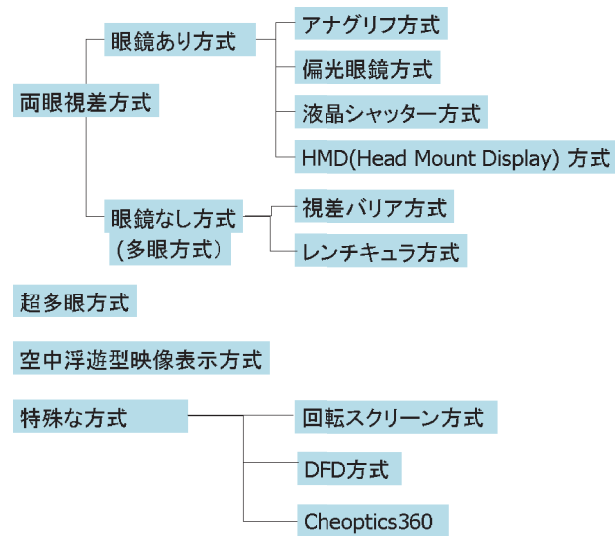


図 2.4: 立体映像表示技術の種類

### 2.2.1 眼鏡あり方式

特殊な眼鏡を利用した代表的な立体映像表示技術について述べる。ユーザーが立体視するために、両眼視差の原理を主に用いている。

#### アナグリフ (色眼鏡) 方式

図 2.5 に示すように、補色関係にある 2 色を用いて、左右の眼にそれぞれ視差のついた映像を映すことにより両眼視差の原理を用いた方式。コストが低く、簡単な製作で済むことが長所とされる。欠点は、色彩の再現性が難しく白黒画像になることが多い点である。

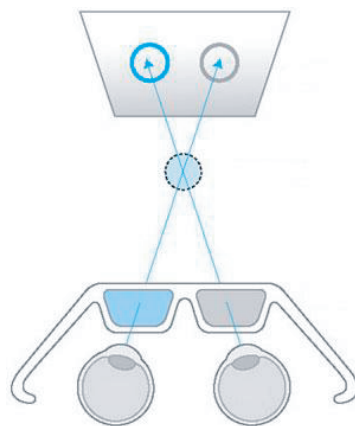


図 2.5: アナグリフ方式

#### 偏光眼鏡方式

図 2.6 に示すように、偏光フィルタの遮光効果を利用して、左右の眼にそれぞれ視差のついた映像を構成する方式。画像のカラーが正確にされるのが長所とされる。欠点は、首を傾けただけで像にずれが生じてしまうため、ユーザーに過度の負担をかけてしまう点である。

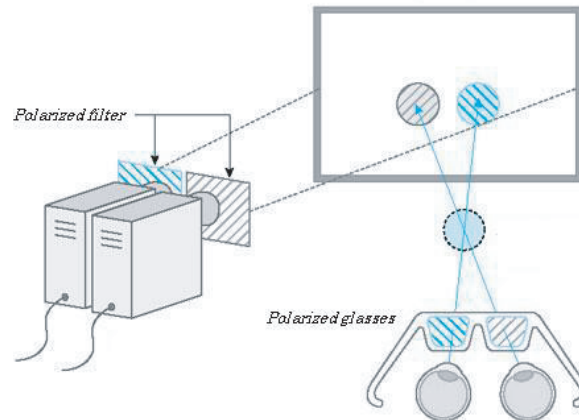


図 2.6: 偏光方式

### シャッター眼鏡方式

図 2.7 に示すように、左右の映像を時間で分割する方式であり、液晶シャッタグラスが用いられる。左右の眼前のシャッタが、映像の周期に同期して開閉することで、両眼視差のついた映像を構成する。アナグリフ方式と同様コストが低く、簡単な製作で済み、色彩も表示できる点で優れている。この方式を用いた技術として IllusionHole が挙げられる。IllusionHole では、ユーザーの視点位置に応じて映像を変える技術を用いることにより 360 度どの方向からでも、方向に適した映像を表示させることができる。

### HMD(Head-Mount-Display) 方式

この方式は、左右の画像を表示する小型ディスプレイを内蔵したゴーグルを頭部に装着するものである。通常は、視野全体を覆い仮想世界を実現するバーチャルリアリティに用いられる。最新のものは小型化が進み、ユーザーの眼鏡装着負担が軽くなったといえる。

## 2.2.2 眼鏡なし方式

次に特殊な眼鏡を用いない代表的な立体映像表示技術について述べる。この手法も両眼視差の原理を用いている。この場合、左右の眼の直前に画像分離手段を置けないので、左右の眼を置く鑑賞位置を空間的に分離する必要がある。

### レンチキュラー方式

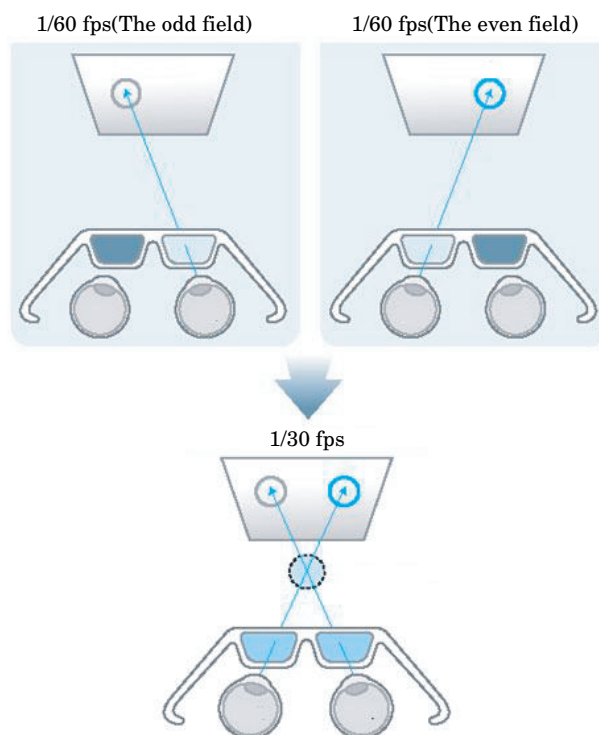


図 2.7: 液晶シャッター方式

レンチキュラーレンズにより左右の映像が特殊な眼鏡なしに分離できる手法を述べる．図 2.8 に示すように、スクリーンに左眼用、右眼用の映像を交互に配置すると、レンチキュラーの特性により、左眼に左眼用のみの画像、右眼に右眼用のみの画像を提示させる．眼鏡がいらないのが最大の長所となるが、特定の位置にいないと、左眼に右眼用の画像、右眼に左眼用の画像を提示させるために、ユーザーの鑑賞位置が制限されてしまう問題が生じてしまう．

#### パララックスバリア方式

パララックスバリア方式では、スリット状の光学的なバリアにより左右映像を分離する方法である (図 2.9)．レンチキュラー方式と同じように、ユーザー特定の位置にいないと、左眼に右眼用の画像、右眼に左眼用の画像を提示させるために、ユーザーの鑑賞位置が制限されてしまう問題が生じてしまう．

上記の眼鏡なし方式ではユーザーの鑑賞位置の制約という欠点があった．立体視域を拡大する為に、ディスプレイ上面にステレオカメラを付け、看視者の両眼位置を検出して常に両眼に正しい映像が届く様に視差バリア位置を調整するディスプレイも検討されている [2]．このシステムでは更に、看視者の位置に合わせて映像の視点を変える事により運動視差も実現している．又、このカメラを利用して表示映像を看視者のゼスチャで操作する試みもある [?] が、システムが大掛かりになる事と、個人用途に限定される．

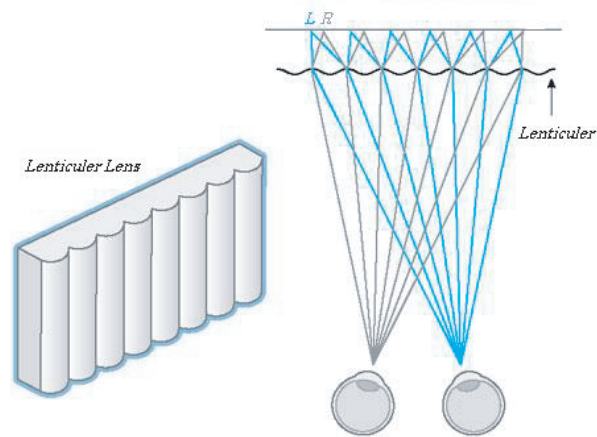


図 2.8: レンチキュラ方式

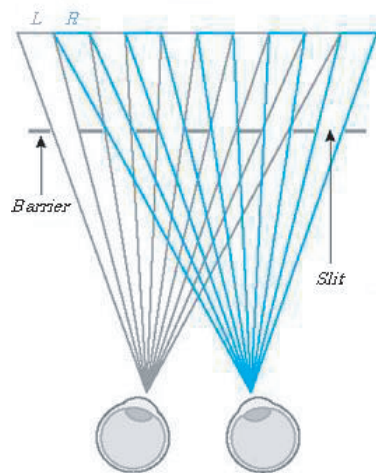


図 2.9: 視差バリア方式



### 2.2.3 光線再生方式

以上挙げた手法は一般的に2眼式、多眼式と呼ばれ、主に両眼視差の原理から立体映像表示技術を可能にさせている。しかし、この場合は、輻輳調節矛盾が起きてしまう脳がディスプレイのスクリーンと異なる位置に立体を知覚しているのに対して、眼はスクリーン上にピントを合わせている。らの心理実験において、2眼式の立体映像表示方式に対し、ユーザとのスクリーンとの距離を $D$ 、観察される立体映像とスクリーンとの距離を $d$ とする場合、図の範囲内ならば視覚疲労が起きにくいといわれている。立体映像観察時の視覚疲労の原因で、ユーザーは20～30分程度で疲労感が出ると言われている。

ここで、視覚疲労が生じないようにする手法である光線再生方式が挙げられる。これは完全にあらゆる方向に放出される光線情報を完全に取得し、表現する手法である。この方式の代表的な手法であるホログラフィ方式 [4] [5] は、対象物から出た光線の強さと方向を干渉縞として記録し、これに光を当てて元の光の方向と強さを再生するので、空間に実像を見る事が出来る。看視位置を変える事により見える光の方向が変化するので、運動視差があり、自然な立体映像を表示可能であるが、干渉縞のデータ量が膨大である為、現在のハードウェア処理能力では、再生を実時間で行う試み [7] はあるが、実写動画の撮影は困難である。撮影を簡略化する為、ステレオカメラ映像から被写体の奥行き量をステレオマッチングで求めてホログラムパターンを計算し、これを元にレーザー光の位相を空間光変調器で変調してホログラフィーを再生する試み [8] 等があるが、入力が2視点である為、運動視差はない。ホログラフィーの原理を応用し、もっと少ないデータ量で光線再生を行うものに、インテグラルフォトグラフィーや超多眼映像がある。

多数の微小映像を多眼レンズで再生するインテグラルフォトグラフィー方式は、多視点立体映像方式の延長であるが、水平視差の他に垂直視差も持つのでより自然に近い立体映像が得られる。最近では、多数の視差映像を確保しながら解像度を上げる為に複数のプロジェクタを用いた報告 [15] や、実写映像を作成する為にカメラアレーを球面状に配置するや、小型LCDを用いたディスプレイで生じるモアレを軽減するカラーフィルタ配置の提案 [16] などが報告されている。垂直視差を捨て、その分、水平視点数を多くして映像間隔を狭め、複数の視差画素が同時に同じ網膜に写る様にする超多眼映像 [17] では、それらの画素を重ね合わせて1つの像が網膜上に形成される様に、焦点調節が働く。この合焦点位置は、画像の視差によって構成される両眼の輻輳角のクロス点と一致するので、自然な焦点調節のまま立体視が可能になる。又、看視位置を変えると、常に複数の視差映像が同時に網膜に写りながら変化して行くので、滑らかな運動視差が得られる。各視差画像は、複数の画像が瞳径を介して網膜に写る様、非常に接近して配置（約0.6度間隔）する必要がある。又両眼から同じ被写体映像が見える様に、数10から100枚のオーダーの視差画像が必要である。

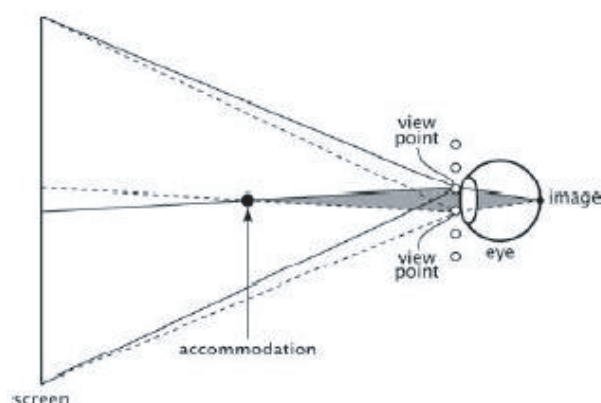


図 2.10: 超多眼方式

このような方式を用いれば、自然な立体映像を提示することが可能となる。しかし、このシステムの実現には、視点への視差画像数倍、通常のディスプレイに比べて情報量が膨大になってしまう問題が生じてしまう。超多眼方式を用いた技術として高木らの開発した“多重テレセントリック 3D ディスプレイ”、Holografika の開発した “Holovizio” [11] が挙げられ、立体映像としては立体視の要因をすべて満たしているものの、情報量が莫大で提示される映像がほぼ静止画に限られてしまっている。

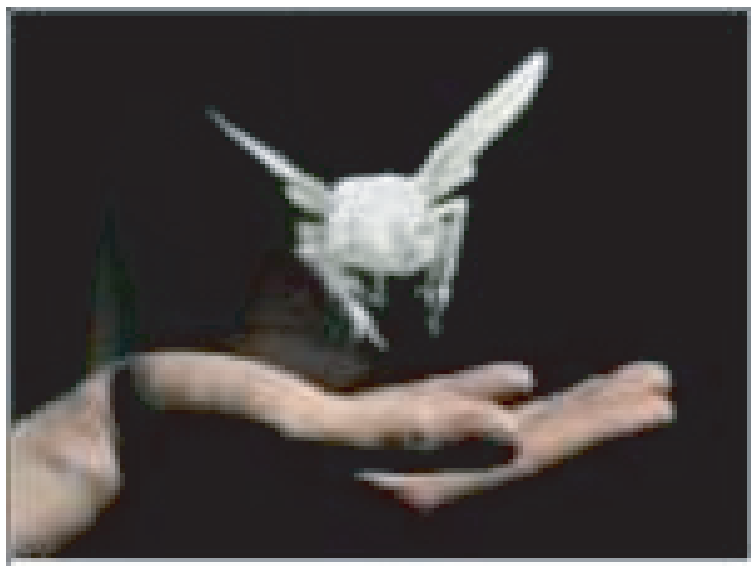


図 2.11: 多重テレセントリック 3D ディスプレイ

## 2.3 特殊なスクリーンを用いた方式

これらの方式以外にも多くの立体映像表示技術が存在する。

### 2.3.1 回転スクリーン方式

回転スクリーン方式とは、多数のプロジェクターを利用して、複数方向から映した被写体の映像を、回転ミラーに同時に投影して、立体的な映像を表示する方式である。回転スクリーン方式では、日立の開発した “Transpost” [12] が挙げられる。これは、24 方向から映した被写体の映像を、まず台座に組み込んだ液晶プロジェクタによって天板の鏡に投影している。

### 2.3.2 DFD(Depth-Fused 3D) 方式

DFD 方式は NTT アイティーが開発した方式で、立体錯視現象によって立体を感知できる方式と言われる。文献 [13] [14] によれば、同じ映像を 2 枚、距離を変えて重ねて提示し、両者の輝度比を変えると、前後像の間で融像が生じ、見掛けの像位置が、2 枚の映像間の距離を輝度比で内分する位置に定位する事が報告されている。このような融像が生じるメカニズムは、同じ像をその距離を変えて見た場合、両眼間に距離がある事により、像のエッジが 2 段階に色の濃さが変わる階段状に見えるが、そのズレ量は僅かであるので、デジタル文字を滑らかに見せる為に良く知られている、色の濃さ分布によるアンチエイリアス効果により、像のエッジ



図 2.12: Hologvizio

位置が見かけ上, 2つの色の濃さで内分される位置までずれる. そして主観評価実験により図 2.14 のような心理的効果が得られることも証明している



(a)

(b)

図 2.13: DFD(Depth-Fused 3D)

### 2.3.3 Cheoptics360

Cheoptics360 [18] はどの視点からでも映像を認知することの出来るように透けて見えるプリズムを生地として用いた4面のピラミッド型映像提示システムである. . イメージに4つのビデオ映像からの光を組み立てる一種のプリズムとして使用されることで立体として認知することの出来るシステムである. 動画提示が可能であり, 映像を回転した動画を見せることで, より立体として映像を知覚することを可能にしている様に思われる.

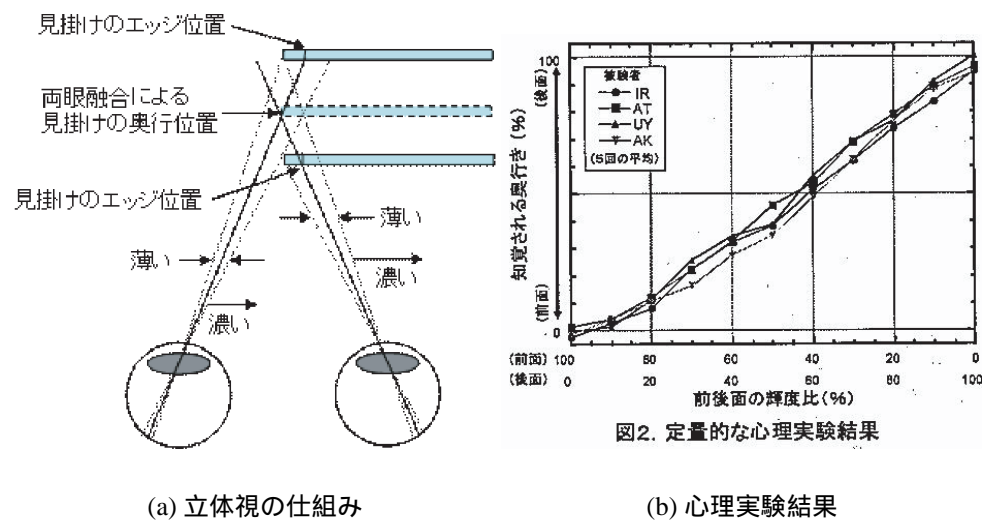


図 2.14: DFD(Depth-Fused 3D) の立体要因

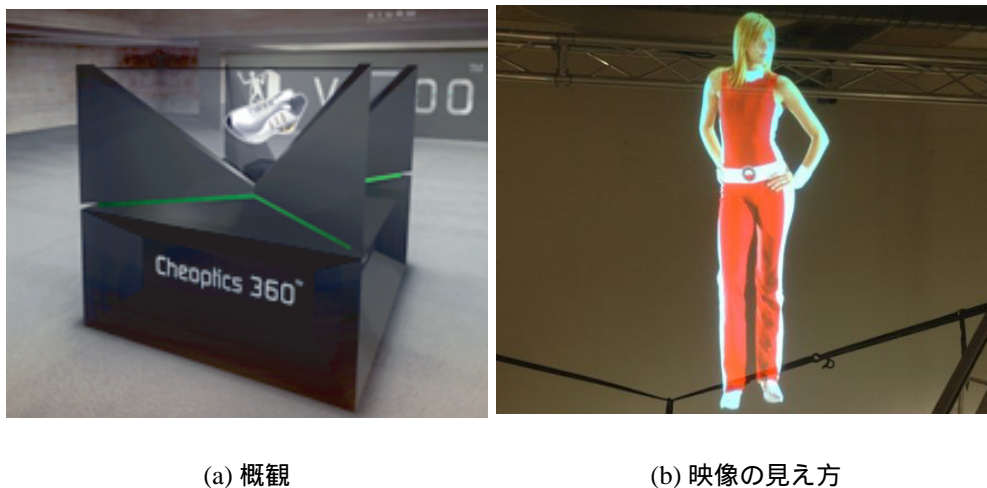


図 2.15: cheoptics360

## 2.4 空中浮遊型映像方式

本節では、空中浮遊型映像方式について述べることにする。この方式は、図 2.16 左のように、通常のディスプレイを暗室の中におき、フレネルレンズで投射された映像をそのレンズの焦点のところに結像させる方法が一般的な手法である。空中浮遊型映像は、両眼視差の原理が働かないという立体感としての機能が薄いものの、飛び出す映像としての臨場感があり、輻輳調節矛盾が起きないなどの利点があり、また浮遊した映像に対する新しいインタフェースが容易に可能となる技術である。この手法では視域が図 2.16 右のようにレンズの光線が通る範囲に限られてしまう。この問題を解決する手法として、パイオニアの開発した 3D フローティングビジョン [?] では、ディスプレイの手前に、ごく極小のマイクロレンズを並べた、ディスプレイの映像を空中に結像し、ユーザーの視域を広げることに成功している (図 2.17.)。さらに、空中に浮遊した映像を触るインタラクションを楽しむフローティングインタフェース [19] の開発も行っている。また、Heliodisplay [20] では、霧状のものに映像を投影して浮遊映像を提示させることに成功している (図 2.18.)。

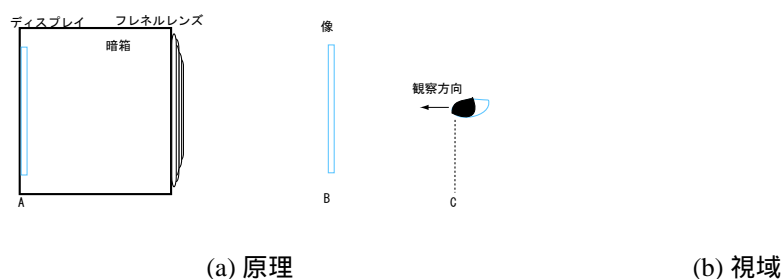
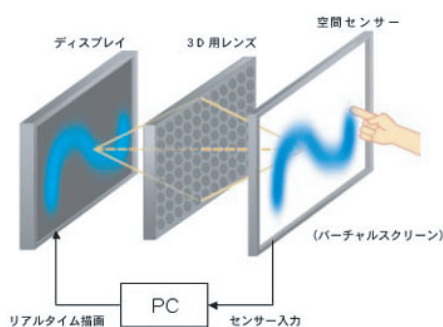


図 2.16: 一般的な空中浮遊映像表示技術



(a) 原理



(b) 映像

図 2.17: 3D フローティングビジョン

### 2.4.1 立体映像提示システムのまとめ

これまでに述べてきた立体映像表示技術をまとめると、表 2.1 のようになる。表 2.1 においては、立体映像技術として完成度の高いもの



図 2.18: heliodisplay

表 2.1: 立体映像表示技術まとめ

	大型化	動画化	小型化	両眼視差	輻輳調節矛盾
眼鏡あり方式					
眼鏡無し方式					
超多眼方式					
回転スクリーン方式					
DFD 方式					
空中浮遊型映像					

## 2.5 まとめ

本章では、人間の立体視の要因について述べ、その要因に基づいた上で、立体映像を表示する一般的な手法を説明した。表??に示す。両眼視差の原理を用いた映像技術は眼鏡をかける疲労感や輻輳調節矛盾といった現象が起こるものの情報量が少ないという利点があり Mercury, Stereo Edit, Shade といった両眼視差用の立体映像コンテンツ制作システムを利用できるので用途が非常に多く存在する。例えば立体シネマでは図の輻輳調節機能適応範囲外にする範囲で利用できるので好評な評価が得られている。超多眼方式などの視差を増やす方式ではやはり情報量が過多になるのが問題となっており、現段階ではハードウェアの向上を待つ他なく、立体感、臨場感といった実世界と同じように映像を知覚させる利点があるものの用途が狭いというのが現状である。その他の方式では、情報量の少ない大画面の Cheoptics360 は、情報伝達手段に優れ、広告に利用されやすい。最後に空中浮遊型映像表示システムでは、両眼視差による臨場感の特典がないものの立体感はそれほど得られないものの映像が宙に浮いている特典と、情報量が少ないためインタフェースとして扱いやすい。

## 第3章

---

# 両眼視差の原理を用いた 立体空中浮遊型映像表示技術 DLFI(Display-Less Floating Image)の提案



### 3.1 はじめに

本論文では、両眼視差の原理を用いた立体空中浮遊型映像表示システムを提案する。これは、立体映像でも扱いやすい両眼視差の原理を用いた映像をレンズによって空中に提示させる映像表示システムである。本章では、まず提案する立体映像表示システムの目的を述べ、空中浮遊型の立体映像表示技術について述べる。また、評価方法などについても検討し、最後に関連研究との位置付けを述べる。

### 3.2 提案符号化手法の概要と目的

第2章で挙げたように、従来の両眼視差の原理を用いた2眼式立体映像表示では、図3.1のように立体感を十分に演出しようと、画面から離れた位置に飛び出す映像として知覚させようとするため、輻輳調節矛盾が起きやすいという欠点があった。これらの欠点を解決する手法として、視差数を増やす超多眼方式などが挙げられるが、逆にコンテンツとして扱うに莫大な情報量が必要となってしまう、コンテンツとして利用するには非常に手間のかかるものとなり逆に扱い辛いものとなってしまった。利用するものは2眼式やDFD方式といった情報量の少ない方が有用であるといえる。また、心理的要因も高める必要も上げる手法の方が良いので、空中に映像を浮遊させる方がより完成度の高い立体映像ができると考えられる。

このような目的のもと、本論文では、空中浮遊型の映像表示技術に2眼式の立体映像技術を利用する手法を提案する。

提案手法では、通常の2眼式立体映像ディスプレイで立体を強調する為に大きな輻輳角を付ける事を行うことなく飛び出した映像を表現できる。また、空中浮遊映像で問題となる両眼視差の原理が伴わない問題を解決する。つまり、立体視要因で重要な輻輳、調節、両眼視差の機能を果たす映像表示技術を作成する。



◆画面は、ハメコミ合成。3D表示のイメージです。

図 3.1:

### 3.3 フレネルレンズの利用

本手法では空中浮遊型映像技術の原理を用いる。空中浮遊映像を用いる手法としては、第2章で挙げたように、霧状のものに映像を射出する手法、レンズによって映像を空中に結像させる手法が挙げられる。本論文では、両眼視差の原理を用いた手法で行うため、フレネルレンズを用いることにする。フレネルレンズによって映像を結像する方式ならば、偏光の性質を変えずに像を結ぶことができるように思われる。

フレネルレンズを用いる場合、像を結ぶには、フレネルレンズに入る映像情報をディスプレイに表示される映像情報に制限する必要がある。そこでフレネルレンズおよび両眼視差映像ディスプレイを暗箱内に設置し、フレネルレンズに入る光を遮断する。

### 3.4 DLFIの提案

試作したDLFIの概観を図3.2左に、概要を図3.2右にそれぞれ示す。本論文における実装では、フレネルレンズの焦点距離+約70cm離れて提示された空中浮遊立体映像を観察するということを想定する。暗箱内に偏光2眼式のディスプレイ、焦点距離が75cmのフレネルレンズをディスプレイから75cm離れたところに設置する。図3.3にDLFIの映像の出る仕組みを示す。偏光2眼式のディスプレイから出された映像が、フレネルレンズによってちょうど焦点距離離れた場所に偏光の特性を失わないまま結像する。これをさらに離れた位置からユーザが映像を見ると出された映像に両眼視差の原理が働き立体映像として知覚される。



(a) 外観

(b) 概要

図 3.2: DLFI(Display-Less Floating Image)

### 3.5 提案手法の評価方法

従来の立体映像技術では、輻輳調節矛盾による心理的疲れおよび空中浮遊型映像においては立体感を十分に満たす映像表示技術が提示されていないことが問題であった。現在のところ立体映像技術を評価する手法としては、どの立体映像技術を見ても評価基準が一定ではなく、客観的に評価する手法が難しいと考

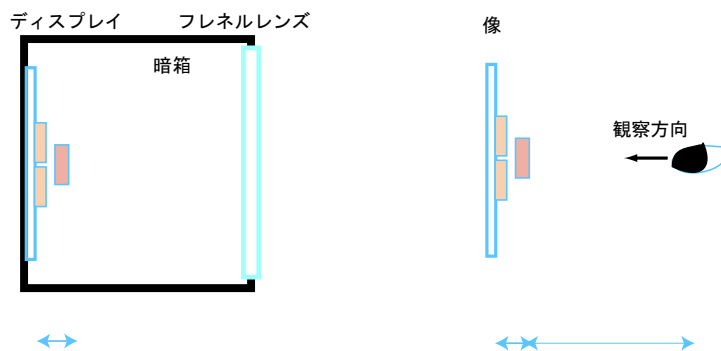


図 3.3: DLFI の仕組み

えられる。そのため、主観的に評価する必要がある。今回では、従来の空中浮遊映像と提案した DLFI 方式とを 50 人の方に比較検討してもらい、その主観評価から検討を行うことにする。

### 3.6 関連研究との比較

本研究の提案手法と、??節でも述べたような関連研究との比較を行う。節でも述べたが、立体映像表示技術では、臨場感のある映像表現と、視覚疲労現象が起きにくい映像提示表現と、ユーザーにとって利用しやすい技術であることが望まれる。

臨場感という観点では、提案手法が、空中浮遊映像の特徴である飛び出す映像表現が有効であり、両眼視差という立体視の要因に大きな影響を与えている。

## 第4章

---

# DLFI技術の評価

## 4.1 はじめに

本章では、提案した手法の評価実験についての紹介を行う。立体映像を評価する手法は、まだ客観的に行う手法は難しいため、主観評価を行う。評価手法は第??節で述べたように

## 4.2 実験条件

本章では、提案した立体映像ディスプレイの評価実験について述べることにする。実験部屋は、蛍光灯の直接当たらない環境光程度の明るさの部屋で行った。図 4.1 左に実験概要図を示す。

(a) 実験概要図

(b) 被験者の見る映像

図 4.1: DLFI の評価実験

本章の評価実験においては、視聴者 50 人による主観評価を行ってもらった。従来の空中浮遊型映像と今回提案した DLFI 方式で比較してもらった。比較に用いる動画は、3G の Shade を用いてボールに奥行きのある動きを与えた右眼用と左眼用の動画および視差の生じない動画を作成し、フレームレート 60fps で徐々に手前に動かす動作を与えた(図 4.1 右)。図 4.2 どちらのボールが より立体的に見えるかどうか、手前に見えるかどうかについての 5 段階評価をして頂いた。

	非常に強く感じる	5	4	3	2	全く感じない
提案手法のボールが 従来の空中浮遊型映像よりも						
①立体的に見えるか						
②手前に見えるか						

図 4.2: 評価実験アンケート

## 4.3 実験結果

50 人による解答結果を図 4.3 に示す。30 人以上の方が の質問に対し立体的に見えると解答し、 の質問に対しても奥行きが感じられると解答して頂き、従来の空中浮遊映像に比べ、奥行きが感じられるものと十

分に判断できる評価を頂いた。

(a) 立体感評価

(b) 奥行き評価

図 4.3: DLFI 手法の主観評価

## 4.4 提案手法の評価

の回答に対しては、提案した DLFI 方式従来の空中浮遊型映像と比べ、提案した DLFI 方式において、フレネルレンズに入射した映像の偏光の性質が変化しないことを示し、両眼視差の機能が果たしていることを示した。

の回答に対しては、提案した DLFI 方式が、従来の空中浮遊型映像に比べ、はっきりと映像に奥行き情報があると知覚されることを意味している。この際、問題となる

## 4.5 凹面ミラーの利用

本手法ではフレネルレンズを利用したが、視域が狭くなるという問題があった。この問題の解決手法として凹面ミラーを利用する方法が考えられる。凹面ミラーを利用する場合、対象物を空中に浮遊させる場合、2つの凹面ミラーを用いる。一方の凹面ミラーの焦点がちょうど他方の凹面ミラーの底辺に位置するように配置する。そして、一方の凹面ミラーに穴を開け、穴を開けた凹面ミラーの焦点の位置、つまりもう一方の凹面ミラーの底面に対象物をおくと対象物から出た光線情報は、一方の凹面ミラーによってすべての光線が並行になるように反射する(図 4.4(b))。そして平行な光線はもう一方の凹面ミラーによって、凹面ミラーの穴の開いた位置に収束し、収束した所に結像する(図 4.4(c)) この原理を用いると、穴を真正面から見る方向以外から対象物を見ることが可能であり、視域が増えると思われる。また、対象物の光線情報も再現するので、視点位置に応じて、映像が変わり運動視差も生じる。

この光学的特徴を応用する。2つの穴の開けた凹面ミラーを用意し、一方の穴に2眼式のディスプレイを設置すると同様の方法で、映像情報が反射し、図 4.5 この技術を更に応用する手法として DVM(Digital Vol-Matrix) 技術というものが挙げられる。これは、

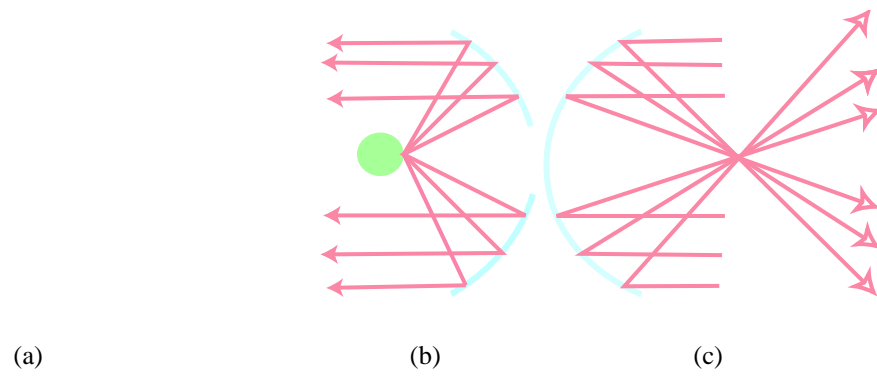


図 4.4: 凹面ミラーによる映像結像方法

図 4.5: 視域を広げる DLFI 方式

## 第5章

---

## 結論



## 5.1 本研究の成果

本研究の主な成果について述べる。本研究では、両眼視差の原理を用いた空中浮遊型3次元映像ディスプレイDLFI(Display-Less-Floating System)を提案した。提案手法では、立体感のある臨場感の高い映像を表示し、視覚疲労を減少させることに成功した。

第3章では、提案手法の目的を説明し、立体映像表示技術としてDLFIを提案した。また、関連研究との比較を行い、その中での提案手法の位置づけについて述べた。

第4章では、これまでの立体映像表示技術と比較し、DLFIの長所を述べ、また問題点を挙げることによって利用するための用途方法について述べた。

## 5.2 今後の展望

本研究の今後の展望について述べる。

### 可変焦点レンズの導入

本論文では焦点距離が一定なフレネルレンズを用いた簡易的な手法であったが、近年の光学的技術の進歩に伴い、可変焦点レンズを用いることにより、映像結像位置の変更を行うことができる。DLFIでは視域の制限が問題となっていたが、看視者の位置に応じて映像結像位置を変えることで、問題を解決できると思われる。

### 運動視差の立体要因の導入

本論文では、看視者が動いた時に生じる運動視差の立体視要因を満たさなかった。運動視差の要因を満たす手法としては、光線空間情報を完全に再現する方法、視点位置に応じた映像の変化を行う方法が挙げられる。前者の手法を用いる場合、莫大な情報量が必要で、立体映像を利用するユーザにかかる負担が大きくなってしまい、両眼視差の原理を用いる利点となる。後者の手法を用いる手法が現在では有効な方法ではあるが、ユーザにとって利用しやすくするためには視点位置に応じた両眼視差映像を作成する技術が必要である。

2.4.1節でも述べたが、現在のところ、完全と言える立体映像表示技術が流行するのは難しい。これは、従来情報伝達手段として2Dで情報を扱うことが多く、用途方法が限定される。あるいは、立体映像技術が望まれる分野では、シネマ、テレビなどのコンテンツ制作の分野、医療技術支援の分野、立体映像カメラなどがあり、どれも現状では、立体映像を利用するユーザへの負担が立体映像から得られる恩恵を上回っている。などが要因である。立体映像表示技術が多く存在する中、これからは、利用するユーザに焦点を絞って、技術が進化していく必要があると思われる。

# 謝辞

---

本研究を進めるにあたり、素晴らしい研究環境と数多くの成果発表の機会を与えて下さり、実に多くの有益なご助言頂きました。安田 浩 教授、青木 輝勝 先生に心から御礼申し上げます。安田教授には、さまざまな知見や研究への取り組み方についてご教示頂き、研究の方向性について大局的な見地からご指導頂きました。青木先生には、研究内容に関する具体的なお助言を頂くとともに、論文投稿や学会発表の際には細かな部分まで親身になって面倒を見て頂きました。本当にありがとうございました。

妹尾 孝憲 特任教員には、研究内容や発表方法に關して的確なアドバイスを頂くとともに、出張手続きやシステム管理など、研究室での生活における様々な場面で手助けをして頂きました。深く御礼申し上げます。

研究室において、多くの時間を共有させて頂いた研究生の方々には、本当にお世話になりました。研究内容や方針に關して実に多くの活発な議論をして頂くとともに、原稿や発表の内容に關して丁寧にご指導頂き、また、研究に対する姿勢に關して多くの見本を見せて頂きました。

また、2年間の研究生活全般にわたって、安田・青木研究室の皆様には大変お世話になりました。皆様に心より感謝申し上げます。非常に楽しく充実した学生生活をともに過ごし、お互い切磋琢磨した、修士課程2年の向井 新太氏には、研究のみならずあらゆる場面でお世話になりました。皆様の今後のさらなるご活躍をお祈り申し上げます。また、研究環境の整備に努めてくださった、辻 晶子氏、天野 友香氏、金杉 典子氏、安川 洋子氏に御礼申し上げます。

最後に、研究生活を通してお世話になりました全ての方々に対して、そしてなにより温かい目で見守って下さいました両親に対して、改めて心から感謝の意を表します。ありがとうございました。

2007 年 2 月 2 日  
細見 武郎

# 参考文献

---

- [1] 増田千尋, “ 3次元ディスプレイ ”, 産業図書, 1990年5月.
- [2] C. Fehn, E. LaBarre, S. Pastoor, ”Interactive 3DTV concepts Key technologies”, Proc. IEEE, Vol.94, Issue3, pp.524-538, Mar. 2006.
- [3] K. Hopf, P. Chojeci, F. Newmann, D. Przewozny, ” Novel autostereoscopic single-user displays with user interaction”, Proc. SPIE, Vol.6392, 639207, Oct. 2006.
- [4] 勝間ひでとし, “ 6-12 3D 画像・ホログラフィ ”, 画像電子学会誌, Vol.33, No.6, pp.991-994, Nov. 2004.
- [5] Y. Flauel, T.J. Naughton, O. Matoba, E. Tajahuerce, and B. Javidi, “ Three-Dimensional Imaging and Processing Using Computational Holographic Imaging ”, Proceedings of The IEEE, Vol.94, No.3, pp.636-653, Mar. 2006.
- [6] C. Burckhardt, “Optimum parameters and resolution limitation of integral photography” Journal of Optical Society of America, vol.58, pp.71-76, 1968.
- [7] 山口健, 吉川浩, “ インタラクティブホログラフィックテレビジョン ”, 映像メディア学誌, Vol.60, No.5, pp.813-818, 2006年
- [8] K. Nitta, N. Nishikawa, O. Matoba, T. Yoshimura, ”Three-dimensional imaging system with stereo vision capturing and wavefront reconstruction”, Proc. SPIE, Vol.6392, 639206, Oct. 2006
- [9] B. Lee, S. Jung, and J.-H. Park, “Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching”, Optics Letters, vol.27, no.10, 2002.
- [10] 本田武士, 惣司浩史, 宮崎大介, 向井孝彰, “ デジタルマイクロミラーデバイスを用いた高解像度な傾斜型体積走査ディスプレイ ”, 3D イメージコンファレンス 2006, 1-2, July 2006.
- [11] Balogh, Tibor, “ The Holovizio System”, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII. Edited by Woods, Andrew J.; Dodgson, Neil A.; Merritt, John O.; Bolas, Mark T.; McDowall, Ian E. Proceedings of the SPIE, Volume 6055, pp. 279-290. 2006.
- [12] 大塚理恵子, “ TRANSPOST: 360度立体映像ディスプレイシステム ”, 3次元画像コンファレンス 2005, S-2, July 2005.
- [13] 陶山史郎, “ 新たな立体錯視減少に基づく DFD(Depth-Fused-3D) ディスプレイ ”, 3D 映像, Vol.9, No.3, pp.20-24, Sep. 2005.
- [14] 栗林英範, 石樽康雄, 陶山史郎, 高田英明, 伊達宗和, 石川和夫, 畑山豊彦, “ DFD(Depth-fused-3-D) 表示の奥行き知覚に与えるぼけの効果 ”, 映像メディア学誌, Vol.60, No.3, pp.431-438, 2006.

- [15] 廖洪恩, 岩原誠, 小池崇文, 桃井康行, 波多伸彦, 佐久間一郎, 土肥健純, “ マルチプロジェクション Integral VideoGraphy 三次元画像表示装置の開発 ”, 信学論 D-II, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2198-2208, 2004 年 12 月.
- [16] T. Koike, M. Oikawa, N. Kimura, F. Beniyama, T. Moriya, M. Yamasaki, “Integral Videography of high-density light field with spherical layout camera array”, Proc. SPIE, Vol.6055, 605510, Jan. 2006.
- [17] 永井大輔, 本田捷夫, “ 投影光学系扇形配列による立体映像表示装置の開発 ”, 信学技報 EID2000-233, pp.13-18, 2000 年 11 月.
- [18] Vizoo, “Cheoptics360”, <http://www.cheoptics360.dk/>  
pione 石川大, “ 箱庭型臨場感の提案とめがね無し小型立体表示装置の開発”, PIONEER RD, Vol.12, NO.3, 2003.
- [19] 石川大, 采原克美, 富澤功, “ フローティングインタフェースの開発”PIONEER RD, Vol.16, No.2, 2006.
- [20] “ Heliodisplay”, IO2 Technology LLC, <http://www.io2technology.com/> . December 2005.

## 発表文献

---

- [21] 筧 康明, 細見 武郎, 飯田 誠, 苗村 健, 松下 光範: “Lumisight Table における透明卓上インタフェースの基礎検討”, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2005, September, 2005.