

博士論文

立体画像の生成及び表示に関する研究

A Study on 3D Image Generation and Display

指導教官

包 躍 教授

Professor Yue Bao

2014年1月30日 提出

January, 30, 2014

東京都市大学大学院工学研究科システム情報工学専攻

Tokyo City University Graduate School, Research Division in Engineering,

System Information Engineering

1191801

顧 飛

Fei Gu

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本論文の構成及び概要	2
1.2	本研究に関連する学術論文・研究発表	5
第 2 章	全方位自由視点立体画像作成システム	
2.1	緒論	7
2.2	全方位画像撮影システム	8
2.3	画像処理アルゴリズム	9
2.3.1	輻輳角を考慮した画素列算出法	12
2.3.2	画像合成	14
2.4	全方位画像撮影システムによる実験	16
2.4.1	全方位画像撮影システムの構成	16
2.4.2	実験方法	17
2.4.3	実験結果	19
2.4.4	動画像への適用についての検討	21
2.5	結論	22
第 3 章	高精度な全方位自由視点立体画像の生成	
3.1	緒論	23
3.2	提案手法	24
3.2.1	自由視点画像撮影システム	24
3.2.2	スケーリング補間	25
3.3	実験	28
3.3.1	撮影システム	28
3.3.2	スケーリング係数を求める実験	30
3.3.3	自由視点画像の生成実験	33
3.4	結論	40
第 4 章	奥行きの高い裸眼立体表示法	
4.1	緒論	41
4.2	提案手法	43
4.2.1	立体画像劣化の原因	43
4.2.2	透過式ディスプレイによる表示装置の構築	44

4.2.3	レンズ端における光線のずれの計算	47
4.2.4	透過式ディスプレイによる表示深度の繋ぎ合わせ	49
4.3	実験及び考察	52
4.3.1	CG物体の撮影モデル	52
4.3.2	深度画像による領域分割	53
4.3.3	試作システムの配置	54
4.3.4	領域分割による立体表示	60
4.3.5	奥行きに関する考察	62
4.4	結論	65
第5章 本研究の総括		66
謝辞		68
参考文献		69

第1章 序論

電子通信テクノロジーがめざましく発展する現在、遠隔通信技術による遠隔会議や遠隔通信教育も頻繁に行われるようになった。そのため、遠隔地の3次元空間の情景を、距離感を含めてまるで視覚的にユーザに提示する技術が求められている。遠隔地の風景や情報をユーザに提示する際に、まるでユーザ自分自身がその場所にいるかのような没入感覚を与える技術であるテレプレゼンス^{1)~7)}に関する研究が盛んに行われており、臨場感が豊かな画像作成も試みられている。

ユーザが自由な見回しができるようにするために、遠隔地の情報を取得する際に、より広範囲の情報を取得する必要がある。距離感を伴った没入感覚を与えるために、立体視という要素も不可欠である。これらの要求は、全方位3次元自由視点画像の生成及び表示によって満たされる。

全方位3次元自由視点の生成とは、現実環境において一周360度全方位の情報を画像として取り込み、光線画像処理によって自由視点の画像を生成することである。その大きな特徴として、実際に生成される視点位置にカメラがなくてもその視点の情報を画像で提供することができることである。

3次元情報を忠実かつリアルに提示することが重要であるため、画像を用いた提示は一般的である。画像を取得する際に、全方位センサー⁸⁾⁹⁾や複数台のカメラを利用したもの¹⁰⁾¹¹⁾が多数存在するが、システムが複雑である。また、距離画像によって画像をマッピングすることで視点画像を生成するもの¹²⁾¹³⁾もあるが、オクルージョンが生じ、情報が欠ける画像となってしまう問題がある。そのため、シンプルな装置で情報の欠落が少ない自由視点画像の生成手法が求められている。

生成した自由視点画像をより臨場感が豊かでリアルな没入感覚をユーザに提供できるようにするために、立体ディスプレイを用いて表示する必要がある。現在、一般的に用いられている立体ディスプレイは特殊なメガネを着用して視聴する手法が主流になっている。しかし、メガネを使うことで観察者が煩わしさを感じてしまう。また、メガネ式立体ディスプレイでは多視点の視差画像表示に適さないため、メガネ式立体ディスプレイを用いて自由視点画像の立体表示を行うことが困難である。そのため、多視点の視差画像表示に対応できる裸眼で視聴可能な裸眼立体ディスプレイ技術を用いることが望ましい。

裸眼立体ディスプレイの中では、レンチキュラーレンズを用いる方式は既存デバイスとの整合性が良く、最も実用化が進んでいる。しかし、多視点の視差画像をレンチキュラーレンズの方向に合わせて交互に繰り返し並べて二次元的な電子表示パネルに表示する従来の立体表示装置では、視差画像が不連続に切り替わるフリップ現象が自然さを損ね、深い奥行き感を視聴者に提供することができないため、臨場感が豊かな立体表示が困難である。より臨場感が豊かな立体表示を行うため、奥行きが深い裸眼立体表示技術が必要である。

本論文では、シンプルなシステム構成で情報の欠落が少ない自由視点画像の生成を実現するために、1台のカメラと1枚の回転ミラーを用いた新たな自由視点立体画像撮影システムを提案する。また、より臨場感に富んだ自由視点立体画像を生成するために、輻輳角を考慮した画像処理アルゴリズムを考案した。これにより、自由視点画像における手前にある物体の奥行きも奥にある物体の奥行きも、それぞれの奥行きに合わせた忠実な画像の生成は可能であるため、奥行きの深い自由視点立体画像を作成することができる。さらに、作成した奥行きの深い立体画像を従来の立体表示技術を用いては奥行きの深さを再現することが困難であるため、本論文では、透過式ディスプレイを用いて複数の虚像面を作成することでレンズにおける光線のずれを軽減して表示立体像の劣化を改善することで奥行きの深い裸眼立体表示手法を提案する。

1.1 本論文の構成及び概要

本論文の内容を章ごとに概説する。

第1章では、これまでの研究動向を概説し、全方位自由視点画像の生成や裸眼立体表示技術について述べる。

第2章では、全方位自由視点立体画像作成システムについて述べる。

全方位自由視点画像を撮影するために、複数台のカメラを使用するもの¹⁴⁾と、回転アームの上に大量のカメラを設置し回転しながら撮影画像を取得する方法^{15) 16)}が提案されている。また、移動ロボットに全方位画像センサーを搭載する方法¹⁷⁾や両眼ステレオ画像を取得する方法^{18) 19)}も提案されている。しかしながら、前者は複数のカメラを使用する必要があり、構成されるシステムは複雑で高価である。後者は移動ロボットが常に動いているため、取得した画像に対し、振動による誤差が生じ易く、ユーザに提示するステレオ画像はズれる問題がある。また、複数枚の写真を撮影し、中間視点の画像を作成する手法^{20)~23)}も提案されているが、カメラと撮影物体の位置関係によってオクルージョンが発生し、提示画像は、情報の欠落が生じてしまう。

これらの問題を解決するために、シンプルな構成で、かつずれやオクルージョンの少ない全方位自由視点の立体画像作成手法を提案する。まず1台のカメラと1枚の回転ミラーを使用し、カメラを動かさずに全方位の画像を撮影する。次に、得られた撮影画像を用い、考案した輻輳角を考慮した自由視点生成の画像処理アルゴリズムにより、任意方向の視点の視差画像を作成する。具体的には、回転ミラーを利用して仮想カメラを生成し、生成された仮想カメラによって全方位の画像撮影を行う。仮想カメラの位置で撮影した画像、つまりその位置の光線情報を利用して自由視点の画像を生成する。そのため、異なる視点に応じて必要な光線情報で視点画像を再構築するため、オクルージョンが生じないのは本手法の大きな特徴である。

第3章では、高精度な全方位自由視点立体画像の生成について述べる。

第2章において1台のカメラと1枚の回転ミラーを用いた新たな自由視点立体画像生成システムを提案した^{24)~27)}。このシステムを用いることによって生成したい自由視点の位置に応じて、複数の撮影画像から画像列を抽出して結合することで自由視点画像を生成することができる。しかし、異なる視点の画像の画像列を単純につなぎ合わせるため、不連続なエッジが生じる問題がある。

上記の問題を解決するために、スケーリング補間による滑らかな自由視点画像生成法を提案する。自由視点画像を生成する際に、異なる視点で撮影した画像列を用いるため、同一の斜めエッジでも異なる画像列の中での傾きが異なる。このまま画像列を結合させると、斜めエッジが不連続になり、滑らかでない画像が生成される。そこで、画像を一方向に拡大、または縮小すると、画像中のエッジの傾きが変わることを利用して、画像列の中心から水平方向へスケーリングすることによって、エッジの傾きを変える。しかし、スケーリングする画像列の幅が大きくなると、撮影する回数は減るが、得られる光線情報が少なくなってしまう。一方、画像列が短くなると、撮影する回数は増えてしまい、処理時間がかかる問題がある。そのため、画像列の幅を一定にする必要がある。本章では使用する撮影画像の枚数に対応した画像列の幅について定量的な算出を行った。適切なスケーリング処理により画像列中にあるエッジの端点を上下方向に移動させ、異なる視点から撮影した画像列中のエッジをつなぎ、滑らかで高精度な自由視点画像を生成することができる。

第4章では、奥行きが深い裸眼立体表示手法について述べる。

第2章及び第3章の提案手法によって生成した奥行きが深い自由視点画像を立体的に表示することによって、より臨場感が豊かな情報提示ができ、リアルな奥行き感を提供することが可能になる。そのため、自由視点立体画像に対応可能な裸眼立体ディスプレイを用いて表示する必要がある。裸眼立体ディスプレイによる表示^{33)~45)}の中でよく知られている方式としてレンチキュラーレンズ方式^{46)~50)}がある。レンチキュラーレンズ方式は、既存のデバイスとの整合性がよく、最も実用化されているが、立体画像を表示する際に、色モアレ、クロストークやフリップが発生するため、深い奥行きの提示が困難である。また、疎なレンズアレイを用いた手法が研究されている^{51)~53)}。この手法はピッチが大きなレンズを用いるので、フリップを軽減でき、位置合わせの問題も解決できるが、この手法ではレンズ・表示画像間距離に対応した虚像面を作成するため、生成された虚像面上において歪みの無い立体像を表示できるが、虚像面以外の立体像は劣化してしまい、奥行きが深い立体表示は困難である。

本章では、表示物体の奥行きに応じて、表示する領域を分割し、複数枚の透過式ディスプレイで表示することにより、複数の虚像面を生成する奥行きが深い裸眼立体表示方法を提案する。

表示画像における物体の奥行きに応じて表示する領域を分割するために、表示用のレンチキュラーレンズにおける光線のずれに関する計算方法を考案した。これを用いることで、

レンズにおいて最も光線のずれが少ない部分を一つの領域として立体画像を分割でき、有限の表示枚数でも質の高い立体表示は可能になる。そして、分割されたそれぞれの領域画像に合わせて、透過式ディスプレイを用いて表示することによって、各表示画像の物体とレンズを対応させ、立体像の劣化を軽減させ、奥行きのある深い立体表示を可能にする。これにより、多視点視差画像を表示可能かつ深い奥行き感を提供することができる。

第5章では、結論として本論文で得られた主な結果を要約し、論文を総括する。

全方位自由視点立体画像の生成システムを構築することにより、実環境を取り込み、写実性の高い見回し可能なテレプレゼンスを実現でき、さらにリアルな奥行き感を伴った裸眼立体表示を行うことで、災害現場のみでなく、遠隔医療、都市計画、交通工学、教育やアミューズメントなどの幅広い分野での活用が可能である。

1.2 本研究に関連する学術論文・研究発表

A. 学術論文

第2章

文献 27)

顧 飛、中田 崇行、包 躍 「1台のカメラを用いた全方位自由視点立体画像の生成」、
『画像電子学会誌』、第40巻第4号、pp687-694、2011年7月

第3章

文献 57)

顧 飛、包 躍、中田 崇行 「スケーリング補間を用いた全方位自由視点立体画像の生成」、
『画像電子学会誌』、第43巻第1号、2014年1月

B. 国際学会における研究発表

文献 24)

FeiGu, TakayukiNakata, YueBao ; 「Making of Free Viewpoint 3D Images Using One Camera」、
『ICCAS-SICE2009』、pp4629-pp4634、JAPAN、(August 2009)

文献 25)

FeiGu, TakayukiNakata, YueBao ; 「Arbitrary 3D Image Generation Using a Single Camera
and a Spin Mirror」、『ICCAS-SICE2010』、pp2364-pp2370、TAIWAN、(August 2010)

文献 26)

FeiGu, TakayukiNakata, YueBao ; 「A Method for Generating and Displaying a Free View 3D
Image」、『ICCAS-SICE2011』、pp277-pp282、JAPAN、(August 2011)

文献 58)

FeiGu, TakayukiNakata, YueBao ; 「Generation the 3D Image of the Free Viewpoint by
Combination of Partial Image Sequences」、『IEEE-CIVS2010』、pp134-pp137、SOUTH
KOREA、(November 2010)

C. 国内学会・シンポジウムにおける研究発表

文献 59)

中田 崇行、顧 飛、包 躍 「一台のカメラと回転ミラーを用いた自由三次元視点画像
の生成」、『画像電子学会第240回研究会、画像電子学会』、pp31-pp36、2008年10
月

文献 60)

顧 飛、中田 崇行、包 躍 「一台のカメラを用いた自由視点画像撮影法」、『アドバ
ンティ2008シンポジウム、自動制御計測学会』、pp139-pp144、2008年12月

文献 61)

顧 飛、中田 崇行、包 躍 「自由視点生成のための画像合成」、『アドバンティ 2010 シンポジウム、自動制御計測学会』、pp75-pp80、2010 年 11 月

文献 62)

渠 源、包 躍、顧 飛、古村 晴紀「透過式ディスプレイを用いた深い奥行き 3D 動画の裸眼立体表示」、『画像電子学会第 264 回研究会、画像電子学会』、pp87-pp92、2013 年 3 月

第2章 全方位自由視点立体画像作成システム

2.1 緒論

全方位自由視点画像を撮影するために、複数台のカメラを使用するもの¹⁴⁾と、回転アームの上に大量のカメラを設置し回転しながら撮影画像を取得する方法¹⁵⁾¹⁶⁾が提案されている。また、移動ロボットに全方位画像センサーを搭載する方法¹⁷⁾や両眼ステレオ画像を取得する方法¹⁸⁾¹⁹⁾も提案されている。しかしながら、前者は複数のカメラを使用する必要があり、構成されるシステムは複雑で高価である。後者は移動ロボットが常に動いているため、取得した画像に対し、振動による誤差が生じ易く、ユーザに提示するステレオ画像はズレる問題がある。また、複数枚の写真を撮影し、中間視点の画像を作成する手法^{20)~23)}も提案されているが、カメラと撮影物体の位置関係によってオクルージョンが発生し、提示する情報が欠落してしまう。一方、カメラの前にミラーをセットして、カメラの回転によって生成したパノラマ画像を利用する手法^{28)~31)}が提案されているが、生成された距離画像を用いて画像をマッピングすることで視点画像を生成しているため、距離計測が行えない部分に、オクルージョンが生じ、計測誤差による視点画像への影響も生じる問題がある。

本章ではこれらの問題を解決するために、シンプルな撮影システム構成で、かつずれやオクルージョンの少ない全方位自由視点の立体画像作成手法を提案する。

まず1台のカメラと1枚の回転ミラーを使用して仮想カメラを生成する。ミラーの回転によって仮想カメラが回転されるため、カメラを動かさなくても全方位に複数の画像を撮影することができる。次に、得られた撮影画像を用い、考案した輻輳角を考慮した自由視点生成の画像処理アルゴリズムにより、任意方向の視点の視差画像を作成する。輻輳角を考慮したことで生成した自由視点画像における物体の奥行きを忠実に再現できる。

また、仮想カメラにより撮影した画像の画像列、すなわち光線情報そのものを使用して視点画像を再構築するため、距離画像によって画像をマッピングすることで視点画像を生成する従来手法に比べてオクルージョンが生じない。

提案手法は、以下の特徴を有する。

- 1台のカメラと1枚のミラーしか使用していないため、システム構成がシンプルである。
- カメラを動かさず、回転ミラーのみを動かして画像撮影を行うため、カメラの振動による視差画像間の誤差が生じない。
- システムが移動することなく不特定多数のユーザにそれぞれ任意方向立体映像を提供可能である。

2.2 全方位画像撮影システム

Fig. 2.1 (a) に示すように、固定カメラを鉛直上向きに設置し、その固定カメラ光軸に対してミラーを45度傾け、回転させるにより、Fig. 2.1 (b) のような全方位撮影可能な仮想カメラを形成する。

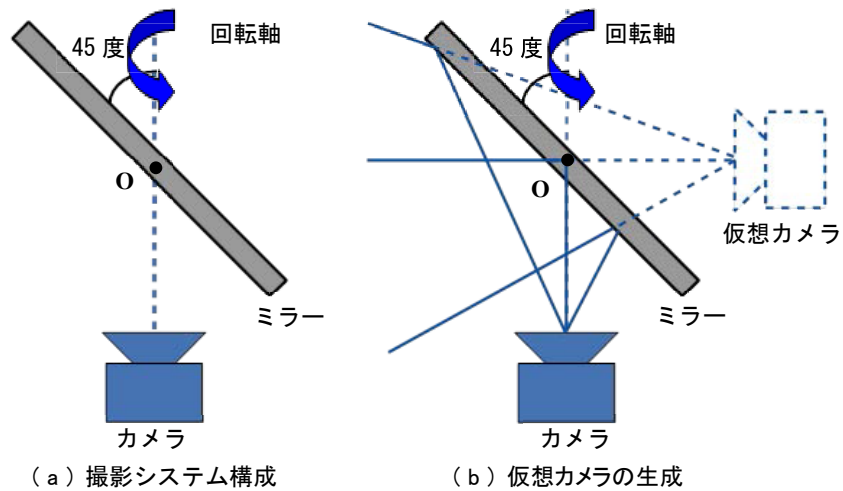


Fig. 2.1 全方位画像撮影システム

全方位画像撮影システムを鉛直方向から見た場合を Fig. 2.2 に示す。固定カメラ光軸の位置を O 、ミラーを使用して生成した仮想カメラの視点を O' とする。回転中心と仮想カメラの視点間に撮像面がある。

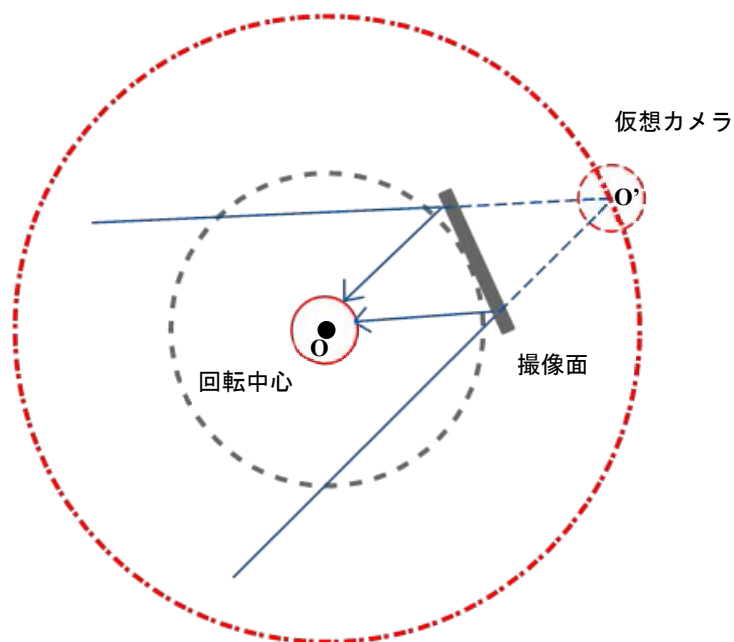


Fig. 2.2 仮想カメラの構築

Fig. 2.3 において、E における自由視点画像を生成する場合、P は視点 E にカメラをおく場合の撮像面となる。光線 EE_c は光線 C_cE_c であるため、位置 C_c の仮想カメラで撮影された画像の画素列を自由視点 E の合成画像の画素列とすることができる。 EE_c と同様に EE_a 、 EE_b 、 EE_d も撮影された画像群から選択され、そこから抜き出された画素列でつなぎ合わせることで合成画像が得られる。

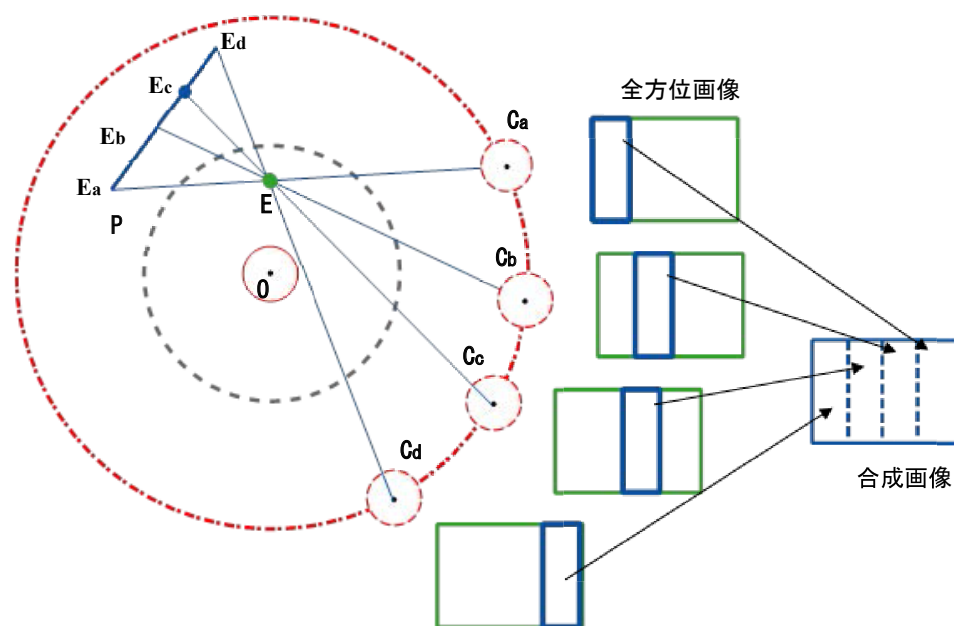


Fig. 2.3 自由視点画像の生成

2.3 画像処理アルゴリズム

ここでは横方向の視差のみを対象とするため、実際の処理は、Fig. 2.4 のような縦の画素列の合成のみである。

図中 $n-2$ 、 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ 、 $n+2$ …は仮想カメラの撮像位置である。

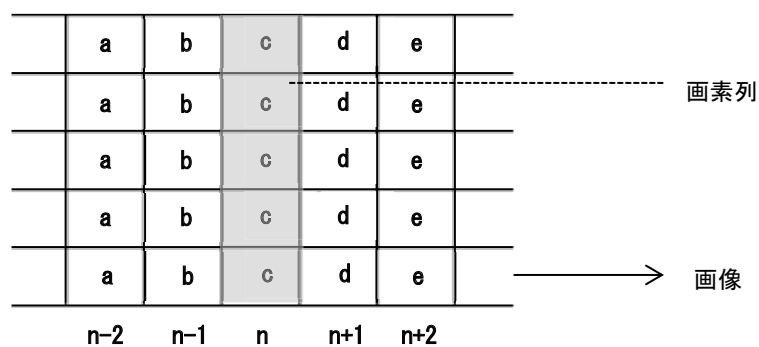


Fig. 2.4 画素列

Fig. 2.5 に仮想カメラ撮像位置の変化に伴う画素列の抽出例を示す。全方位自由視点立体画像を生成する際、生成する視線方向 D.V.、視点 E における視野角 Φ を予め決める必要があるため、 $\Phi = 60$ 度とする。また、任意方向の両眼視差画像を得ることが目的のため、OE を眼間距離 65 mm の半分 32.5 mm とする。

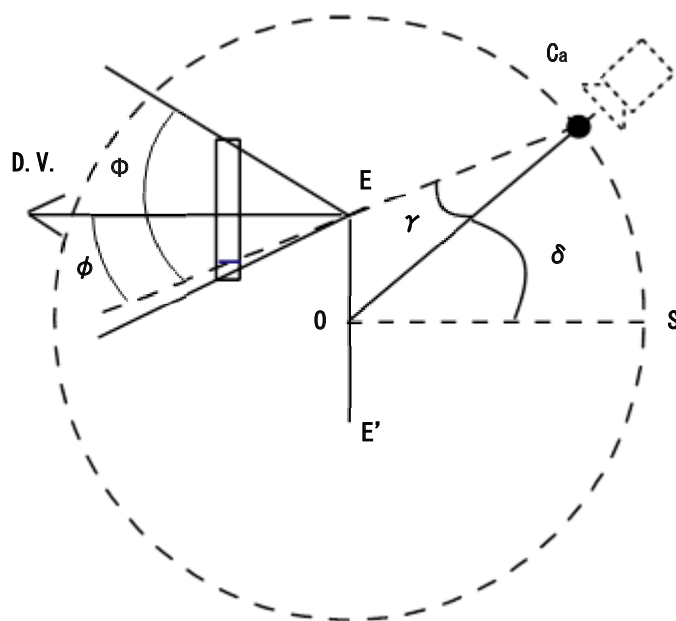
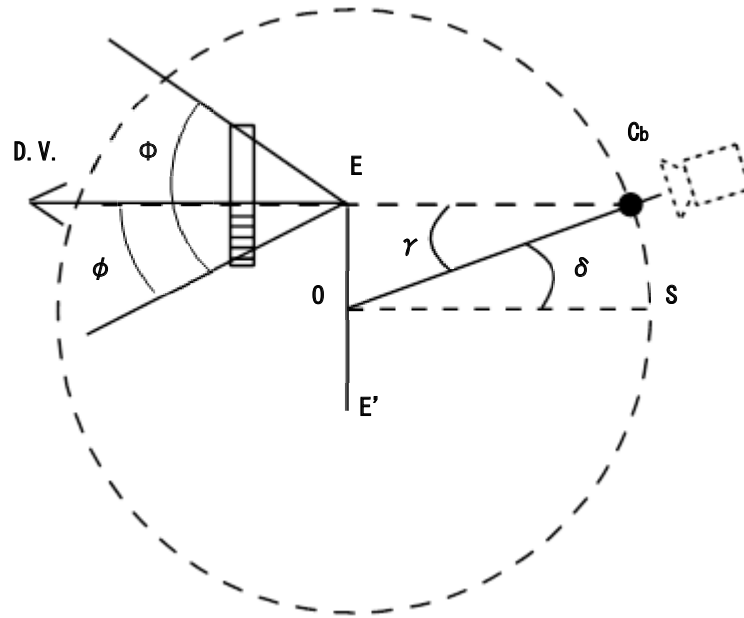


Fig. 2.5 画素列抽出の一例

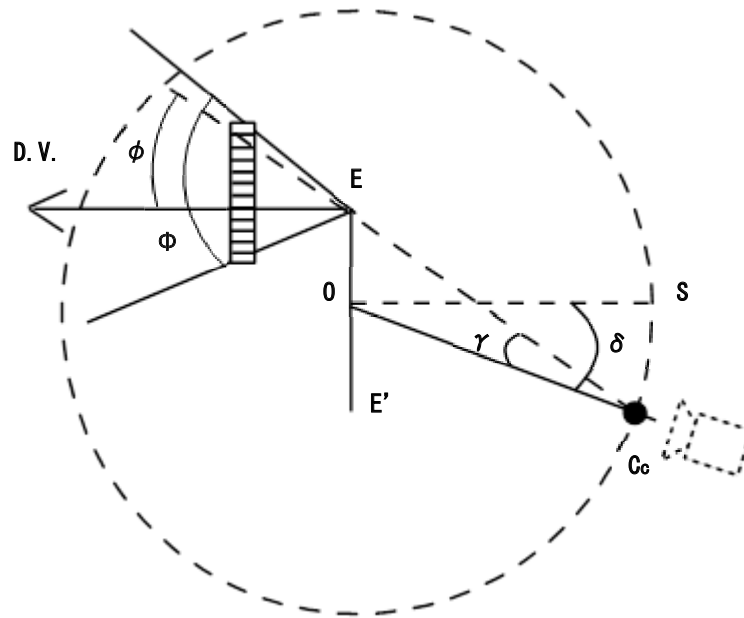
Fig. 2.5 に示したように、基準線を S とすると、S から仮想カメラ C_a までの回転角度は、 δ である。このとき、仮想カメラ C_a 位置で撮影した画像にある必要な画素列は、撮影画像中心から γ だけ離れた場所にある。

実際に、E における自由視点画像を作成するとき、必要とする光線の角度 ϕ は視野角内で、 $-\Phi/2 \sim \Phi/2$ 度まで変化する。また、 ϕ に応じて仮想カメラの位置を表す角度 $\delta(\phi)$ が変わり、撮影画像も変化する。撮影画像内での E 視点に必要な画素列位置も変化する。この画素列に対応する光線の水平角を $\gamma(\phi)$ とする。

画角 Φ 内のすべての $\delta(\phi)$ 、 $\gamma(\phi)$ を算出すれば、自由視点生成に必要なすべての画素列に対応する光線を求めることが可能となる。また、 ϕ の変化に伴う $\delta(\phi)$ 、 $\gamma(\phi)$ の角度変化を Fig. 2.6 に示す。



(a) C_b 位置での例



(b) C_c 位置での例

Fig. 2.6 画素列抽出の一例

右目の視点 E と同様に左目の視点 E' 用の画像も生成できる。

2.3.1 輻輳角を考慮した画素列算出法

具体的な $\delta(\phi)$ 、 $\gamma(\phi)$ の算出について述べる。(以下、 $\delta(\phi)$ 、 $\gamma(\phi)$ を δ 、 γ と表す。)

まずは、自由視点の観察方向をユーザが決定すると、Fig. 2.7 のように観察方向の角度 θ が決まる。しかし、輻輳角 ε が存在するため、観察方向は D.V. となり、観察方向の角度は $(\theta + \varepsilon)$ となる。眼間距離は 65 cm 固定のため、 θ が決まることにより、回転中心 O からそれぞれ眼間距離の半分離れた E と E' も決まる。ここで、注視点は PV とし、 $\theta = 0$ とする。

基準線 S から O を中心として、観察角度は θ であるときの仮想カメラ位置を C_1 とする。さらに、 C_1 から $(\varepsilon + \delta)$ 回転した位置を C_2 とする。また、眼間距離の半分 $EO (= 32.5 \text{ mm})$ を t とする。仮想カメラの O を中心とする回転半径を r とする。これらの位置関係は Fig. 2.7 の通りとなる。

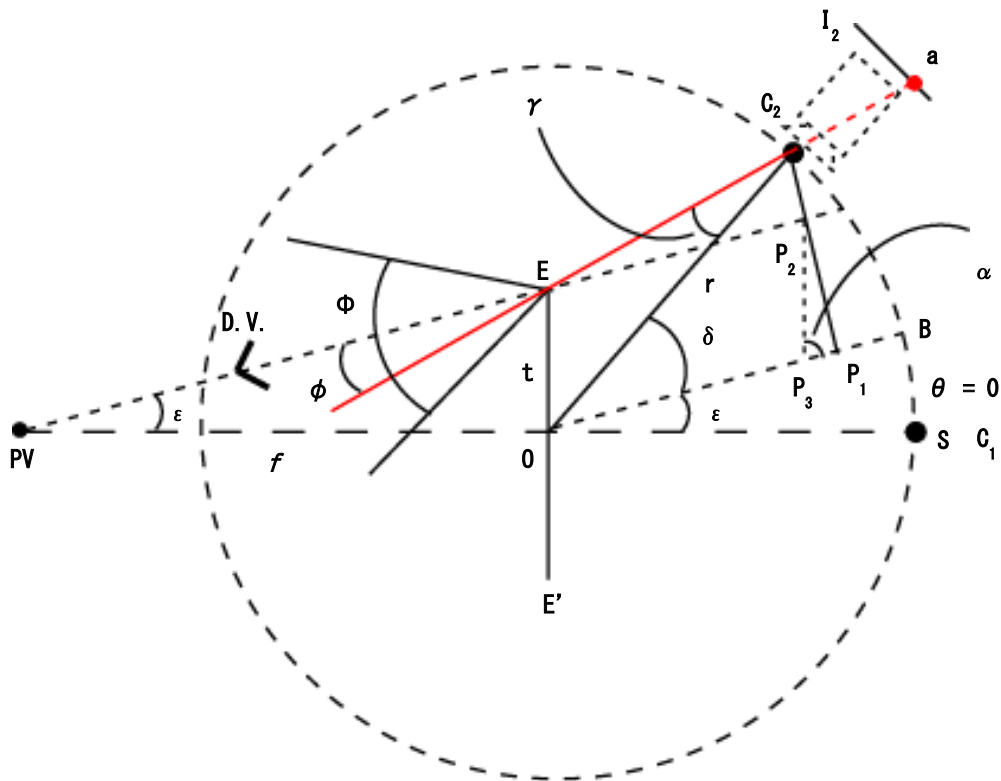


Fig. 2.7 輻輳角 ε 付き必要光線算出図

仮想視点 E の視野角 Φ にある ϕ の位置の光線を求めるとき、その光線を取得できる仮想カメラ位置を C_2 とする。 C_2 から OB に垂線を降ろし、その交点を P_1 とする。 OC_2 は回転中心から仮想カメラまでの距離 r である。

視線方向 D.V. に平行する OP_1 を引き、 P_2 から EO に平行する P_2P_3 を引くと、平行四辺形 EOP_3P_2 においては、 $P_2P_3 = t$ 、 $EP_2 = OP_3$ である。また、回転中心 O から注視点 PV までの距離 f は任意で設定でき、既知の値として使用できるため、式(2.1)が成り立つ。

$$\varepsilon = \tan^{-1}\left(\frac{t}{f}\right) \quad (2.1)$$

また、 $\angle C_2OP_1 = \delta$ 、 $\angle P_2P_3P_1 = \alpha = 90 - \varepsilon$ 、 $P_2P_3 = t$ であるため、直角 $\triangle C_2OP_1$ により次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} OP_1 &= r \times \cos \delta, & P_3P_1 &= t \times \sin \varepsilon \\ C_2P_1 &= r \times \sin \delta, & P_2P_1 &= t \times \cos \varepsilon \end{aligned} \quad (2.2)$$

よって、式(2.3)が求められる。

$$\begin{aligned} EP_2 &= OP_3 = r \times \cos \delta - t \times \sin \varepsilon \\ C_2P_2 &= C_2P_1 - P_2P_1 = r \times \sin \delta - t \times \cos \varepsilon \end{aligned} \quad (2.3)$$

そのため、直角 $\triangle C_2EP_2$ により次式が成り立つ。

$$\tan(\phi) = \left(\frac{r \times \sin \delta - t \times \cos \varepsilon}{r \times \cos \delta - t \times \sin \varepsilon} \right) \quad (2.4)$$

式(2.4)を変形し、観察方向 θ も考慮すると、次式になる。

$$\delta = \sin^{-1}\left[\frac{t}{r} \cos(\varepsilon + |\phi|)\right] - |\phi| + \theta \quad (2.5)$$

$\triangle C_2OE$ においては、 t と r は既知であるため、余弦定理により $\angle \gamma$ を次式のように求められる。

$$\angle \gamma = \angle EC_2O = \cos^{-1}\left(\frac{EC_2^2 + r^2 - t^2}{2 \times r \times EC_2}\right) \quad (2.6)$$

ただし、

$$EC_2 = \sqrt{t^2 + r^2 - 2 \times t \times r \times \cos(90 - \delta)}$$

式(2.5)より δ は ϕ のみをパラメータとする関数 $\delta(\phi)$ であり、同様に、式(2.6)より γ を求めるのに ϕ の値のみをパラメータとする関数 $\gamma(\phi)$ である。

これにより光線 C_2E の画像情報を取得するには、姿勢角 $\delta(\phi)$ で撮影された仮想カメラの画像 I_2 から $\gamma(\phi)$ で示す画素列 a を参照すれば良いことがわかる。 Φ を $-\Phi/2 \sim \Phi/2$ まで変化させることで観察方向 θ における視野角 Φ の仮想視点画像を生成できる。

2.3.2 画像合成

以上幅 1 画素の画素列の算出について述べた。しかし、この場合、使用する撮影画像の枚数は大量となり、撮影時間も増えてしまうため、ある一定幅の縦画素列を考慮する必要がある。

Fig. 2.8 のように一画素の画素列ではなく、 $\gamma(\phi)$ に対応する画素列を中心とし、ある一定幅を持つ带状画素を取り出し、繋ぎ合わせる。带状画素列の繋ぎ合わせであれば、より高速に自由視点画像を生成できる。

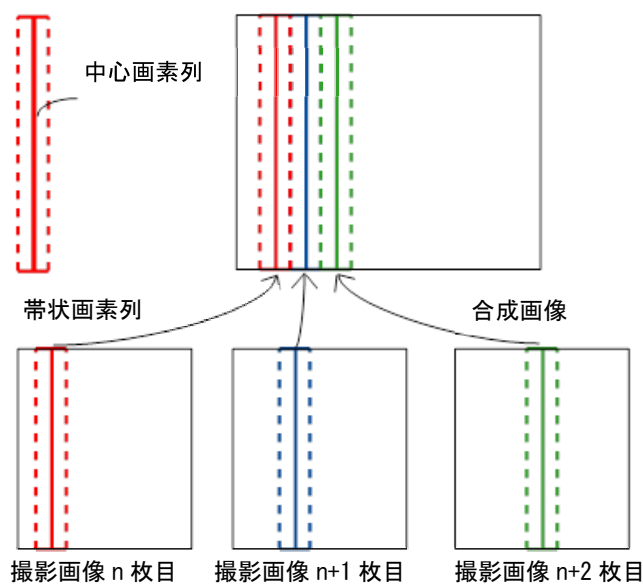


Fig. 2.8 带状画素による画像合成

Fig. 2.9 に自由視点画像の生成を行うプログラムの流れを示す。このプログラムの処理は、ミラーの回転によって仮想カメラが回転し、360 度の撮影画像が得られる。その中から必要な画像を取り出す。光線方向に従って画像処理を行う。このプログラムで使用する画像は回転ミラーにより撮影したものであるため、反転、回転処理を行った。

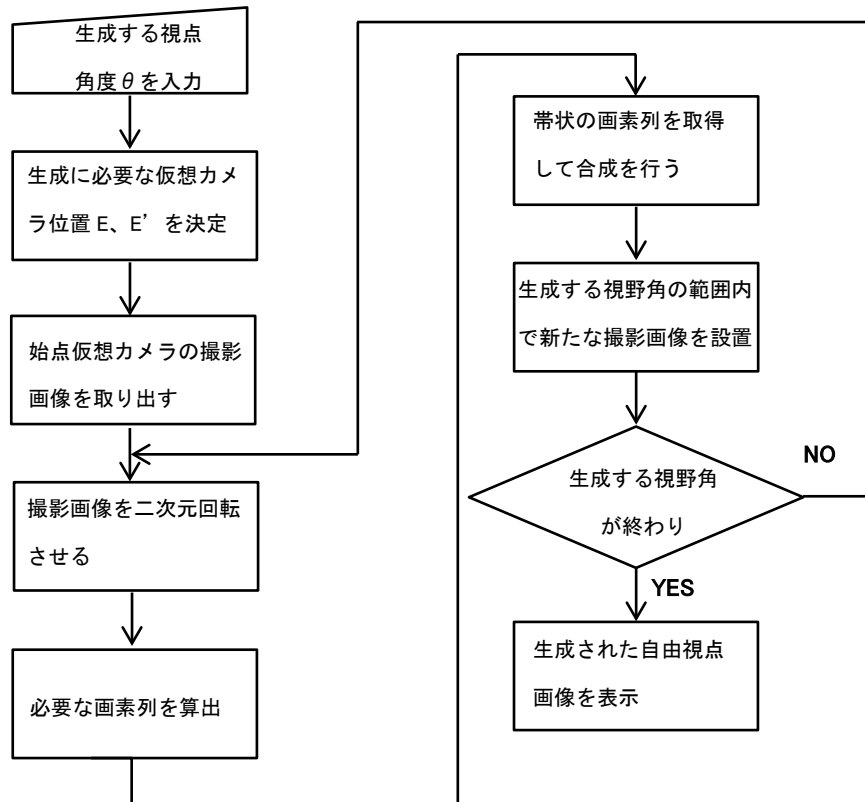


Fig. 2.9 自由視点画像生成フローチャート

2.4 全方位画像撮影システムによる実験

提案手法の有効性を評価するため、全方位画像撮影システムを用いて全方位自由視点立体画像の生成実験を行った。

2.4.1 全方位画像撮影システムの構成

全方位画像撮影システムの外観を Fig. 2.10 に、構成する各パーツ及び仕様を Table 2.1 に示す。試作システムの寸法は、220(横) × 510(縦) × 320(奥行き) mm である。

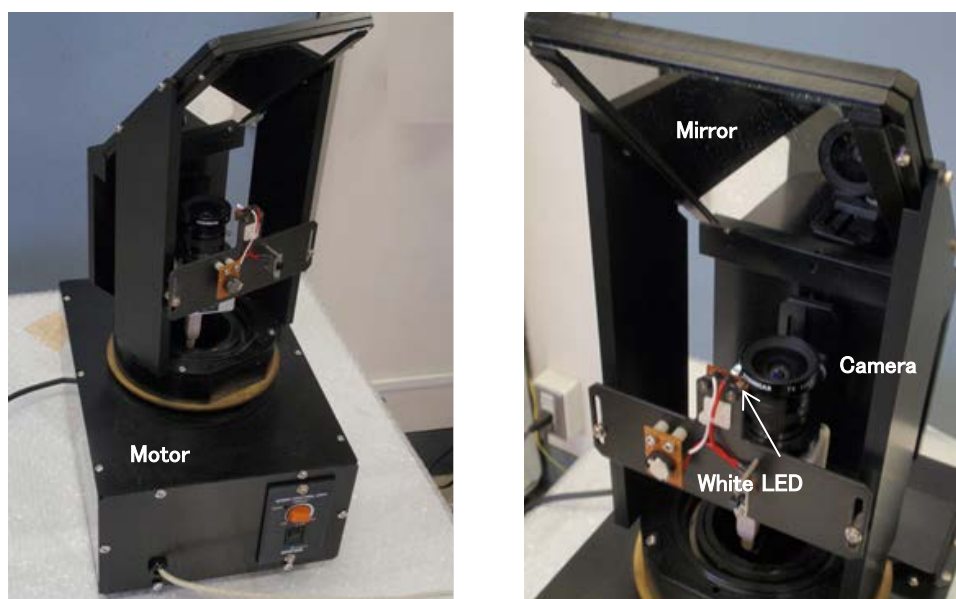


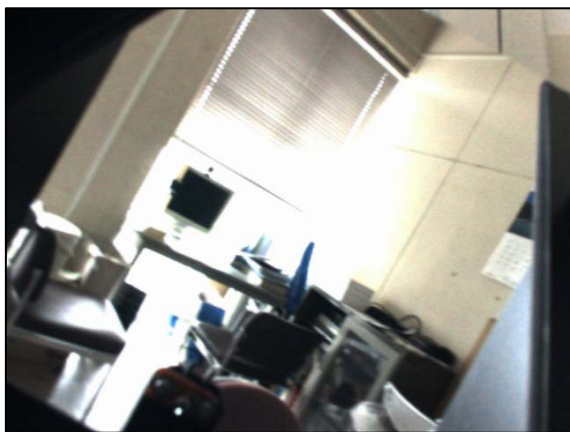
Fig. 2.10 試作システム

Table 2.1 試作システムの構成パーツの仕様

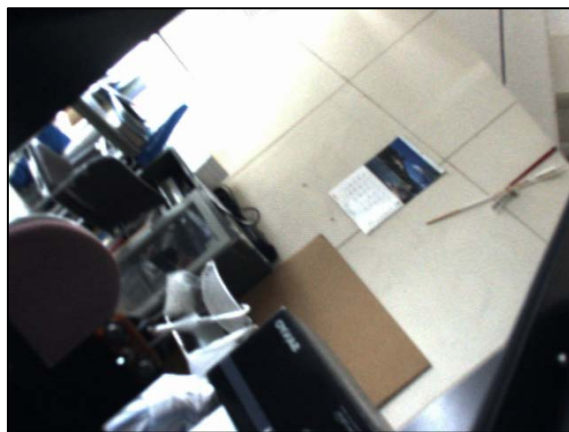
構成パーツ	仕様
ミラー	外形寸法:135(幅)×177(高)mm 種類:平面鏡
カメラ	メーカー:センサーテクノロジー 型番:STC-C33USB(カラー) 解像度:640(横)×480(縦)pixel 外形寸法:50(幅)×108(高)×68(奥行)mm フレームレート:30 fps
モータ	メーカー:ORIENTAL MOTOR 型番:US206-001 種類:AC モータ 外形寸法:59(幅)×86(高)×58(奥行)mm
LED	外形寸法:3(直径)mm×7(縦)mm 種類:白色
出力	USB 接続により画像を出力

2.4.2 実験方法

実際の環境で、撮影した各画像（一部）を Fig. 2.11 に示す。仮想カメラの位置に対応して、画像が回転していることが確認することができる。



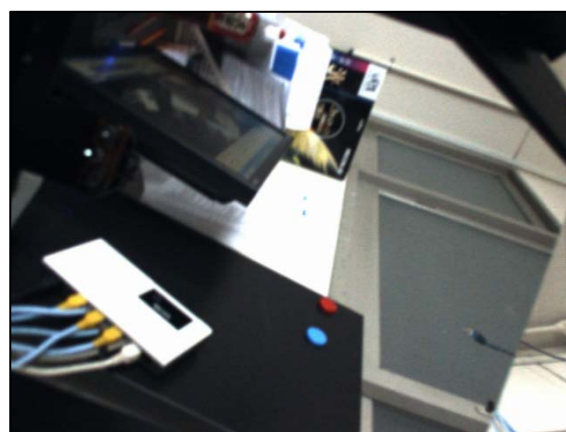
30 度回転



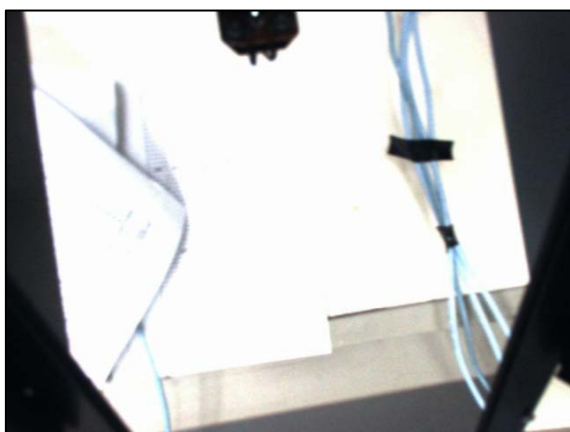
50 度回転



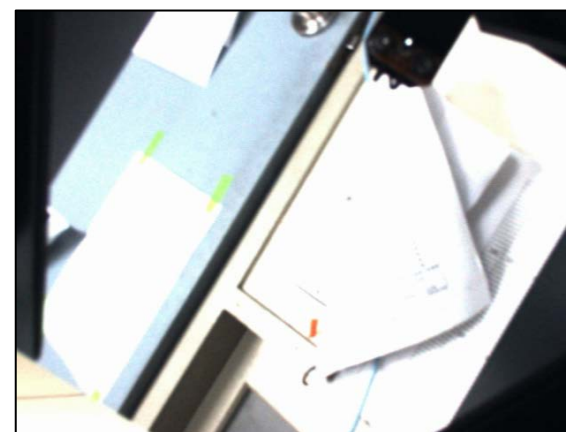
80 度回転



110 度回転



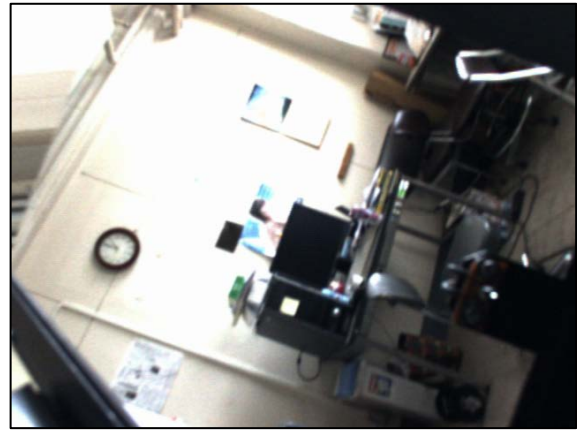
170 度回転



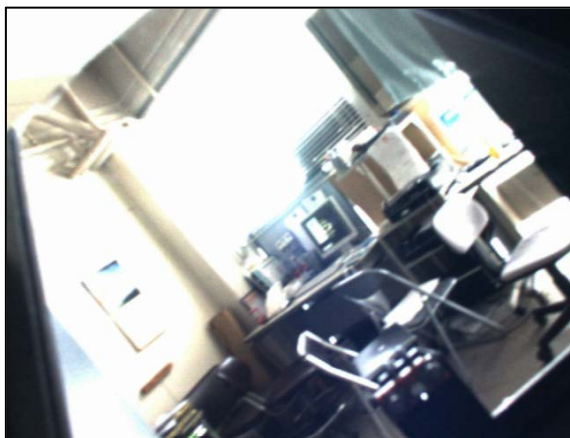
210 度回転



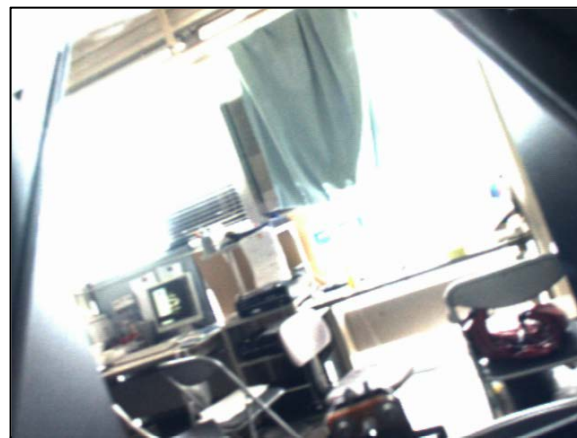
250 度回転



290 度回転



320 度回転



340 度回転

Fig. 2.11 全方位画像撮影システムで撮影した全方位画像の一部

得られた画像（以下、フレーム画像という）に対応した仮想カメラ位置を知るため、Fig. 2.10 に示すように、試作装置の回転部分に白色 LED を取り付けている。Fig. 2.12 に示したように、LED はミラーの回転に伴い、フレーム画像上で円軌道を描くため、画像上の LED を検出すれば、フレーム画像における仮想カメラ位置角度の検出が可能である。

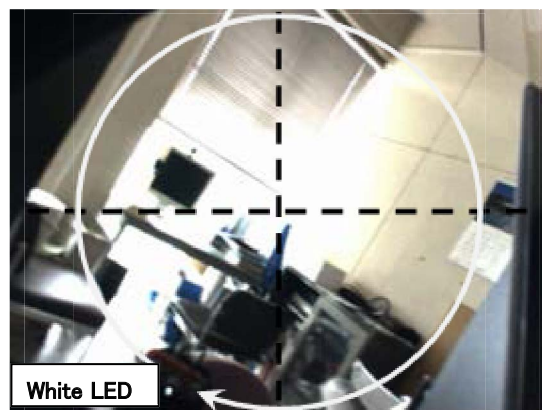


Fig. 2.12 LED によるフレーム画像の角度算出

2.4.3 実験結果

得られた各フレーム画像は、Fig. 2.13 のような異なる仮想カメラ位置の時系列画像となる。生成したい自由視点の角度に応じて、時系列画像から必要なフレーム画像を取り出し、2.3 節により自由視点画像を生成する。

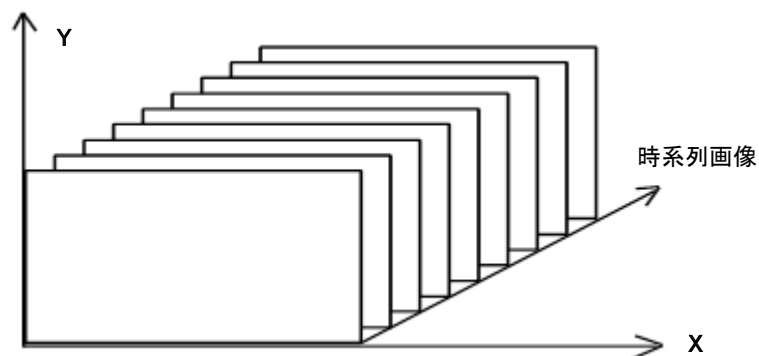


Fig. 2.13 仮想カメラ位置による時系列画像群

全方位画像撮影システムを用いて、 $\theta=15$ 度、30 度、90 度、270 度、340 度の自由視点画像を作成し、Fig. 2.14 に示す。これらは各々6.5 cm 離れた二枚の視差画像である。



(a) 15 度視点 左視点画像

右視点画像

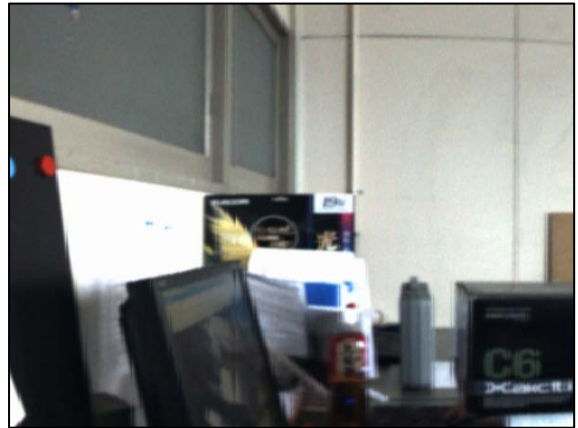


(b) 30 度視点 左視点画像

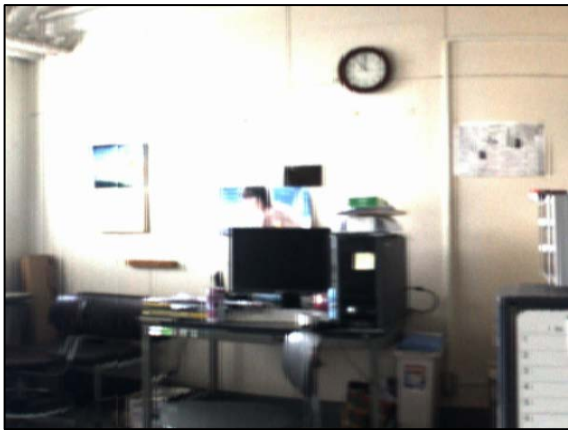
右視点画像



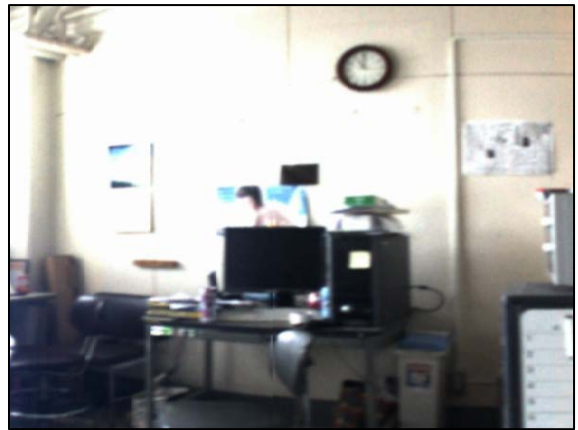
(c) 90度視点 左視点画像



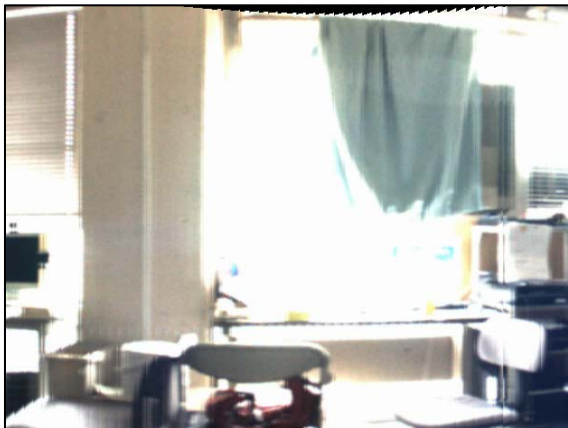
右視点画像



(d) 270度視点 左視点画像



右視点画像



(e) 340度視点 左視点画像



右視点画像

Fig. 2.14 実験結果画像

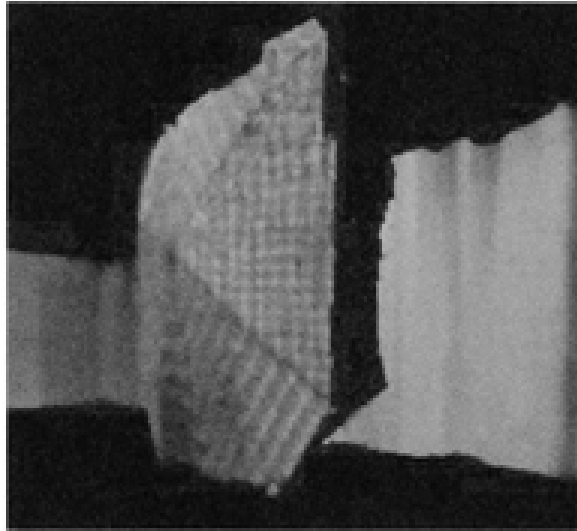


Fig. 2.15 従来研究の結果画像

Fig. 2.15 は参考文献 12) で得られた結果画像である。参考文献 12) で示されたカメラとミラーを共に回転して三次元復元を行う方法では、左右両目のパノラマ画像から奥行を推定して距離画像を生成して、画像を貼り付けて三次元復元を行っているのに対して、本章で提案する方法は撮影された全方位画像から自由視点の視差画像を提示している。提案手法で使用する画像列は、仮想カメラ位置で撮影した画像、つまりその位置での光線情報である。撮影する仮想カメラで取得した光線情報に基づいて任意の自由視点の画像を生成することができる。距離画像によって生成した視点に比べて、距離を計算することなく、本手法では異なる視点に応じて必要な画像列で視点画像を再構築するため、オクルージョンが生じない。本実験で得られた結果画像と従来研究の結果画像を比べてみるとオクルージョンが生じていないことが確認された。

また、上記実験結果から、自由視点立体画像の生成は可能であることが確認された。

2.4.4 動画像への適用についての検討

本章で提案した自由視点映像の作成原理から、動きのあるシーンの自由視点映像の生成への適用は不向きである。実験で使用したカメラのフレームレートは 30 fps であるため、動物体を撮影して自由視点映像の生成は困難だと考えられる。撮影した全方位の画像群から自由視点映像を生成しているため、フレーム画像の間隔は大きいため、生成された自由視点映像には不連続した画像になってしまうからである。

しかし、静止画においては、提案方法は仮想カメラが取得した光線そのものを視点映像として提示することができる。また、異なる視点ごとに応じて視点画像を生成することが可能であるため、オクルージョンが生じない特徴がある。

2.5 結論

本章では、1台のカメラと1枚のミラーを用いて自由立体視点画像を生成する手法を提案した。

提案手法では、1台のカメラと1枚のミラーのみを使用するため、安価かつシンプルなシステム構成となり、また、カメラは固定したままで回転ミラーによって画像の撮影を行うため、振動等の誤差が生じにくい特徴がある。さらに、同時に多人数にそれぞれが希望する方向の立体映像を生成可能である。

自由視点画像の生成原理において、異なる仮想カメラで撮影した画像に対して、各々に必要な画素列の計算が必要であるため、輻輳角を考慮した画素列の算出方法を考案した。また、画像合成において、帯状の画素列を使用することによって、合成に必要な画像枚数が減り、合成時間の短縮もできる。さらに、各仮想カメラによって撮影した画像の回転角度を計測するために、白色LEDを取り付けることで撮影画像の回転角度の算出は可能となる。

提案手法の有効性を確かめるために、提案原理に基づいて全方位画像撮影システムを用いて全方位自由視点立体画像生成の検証実験を行った結果、全方位フレーム画像が得られ、得られた画像から自由視点立体画像を生成できることが確認された。

第3章 高精度な全方位自由視点立体画像の生成

3.1 緒論

第2章で提案した1台のカメラと1枚の回転ミラーを用いた自由視点立体画像生成システム^{24)~27)}によって生成したい自由視点の位置に応じて、複数の撮影画像から画像列を抽出して結合することによって自由視点画像を生成できる。仮想カメラの画像を画像列でつなぎ合わせると効率よく自由視点画像を生成できるが、不連続なエッジが生じる問題がある。画像列の幅が大きくなると、撮影する回数は減るが、得られる光線情報が少なくなってしまう。一方、画像列が短くなると、撮影回数も増えて処理時間がかかるため、自由視点画像の生成効率が悪くなってしまう。

近年、多視点画像をつなぎ合わせる機能を備えるデジタルカメラ³²⁾も商品化されている。デジタルカメラを左右にゆっくりと移動しながら、移動方向に応じて複数枚の画像を撮影すれば、一枚のパノラマ画像に合成できる。しかし、上記と同様な理由により合成画像にもエッジ不連続の問題が生じる。

エッジ不連続の問題を改善するため、画像列間における不連続なエッジを抽出し、それらの端点を用いて最小二乗法によって近似的に滑らかなエッジを得ることができる。しかし、画像全体に歪みが生じてしまう。

また、撮影画像の枚数を増やす方法も考えられる。自由視点画像を生成する際に、使用する撮影画像の枚数を増やすと、1枚の撮影画像から取り出す画像列の幅が小さくなるため、画像列間におけるエッジのつながりを滑らかにすることができる。例えば、生成する自由視点画像の解像度が640(横)×480(縦)ピクセルの場合、640枚の撮影画像からそれぞれ1ピクセルの画素列を取り出してつなぐため、画素列間におけるエッジの不連続は理論上では発生しない。しかし、視野角を60度にすると、一周で6×640枚の撮影画像が必要となり、回転しながらの撮影であるため、現実的な方法ではない。

本章では、スケーリング補間による滑らかな自由視点画像生成法を提案する。

自由視点画像を生成する際に、異なる視点で撮影した画像列を用いるため、同一の斜めエッジでも異なる画像列の中での傾きが異なる。このまま画像列を結合させると、斜めエッジが不連続になり、滑らかでない画像が生成される。そこで、画像を一方向に拡大、または縮小すると、画像中のエッジの傾きが変わることを利用して、画像列の中心から水平方向へスケーリングすることによって、エッジの傾きを変える。これにより画像列中にあるエッジの端点を上下方向に移動させ、異なる視点から撮影した画像列中のエッジをつなぎ、滑らかな自由視点画像を生成する。

3.2 提案手法

3.2.1 自由視点画像撮影システム

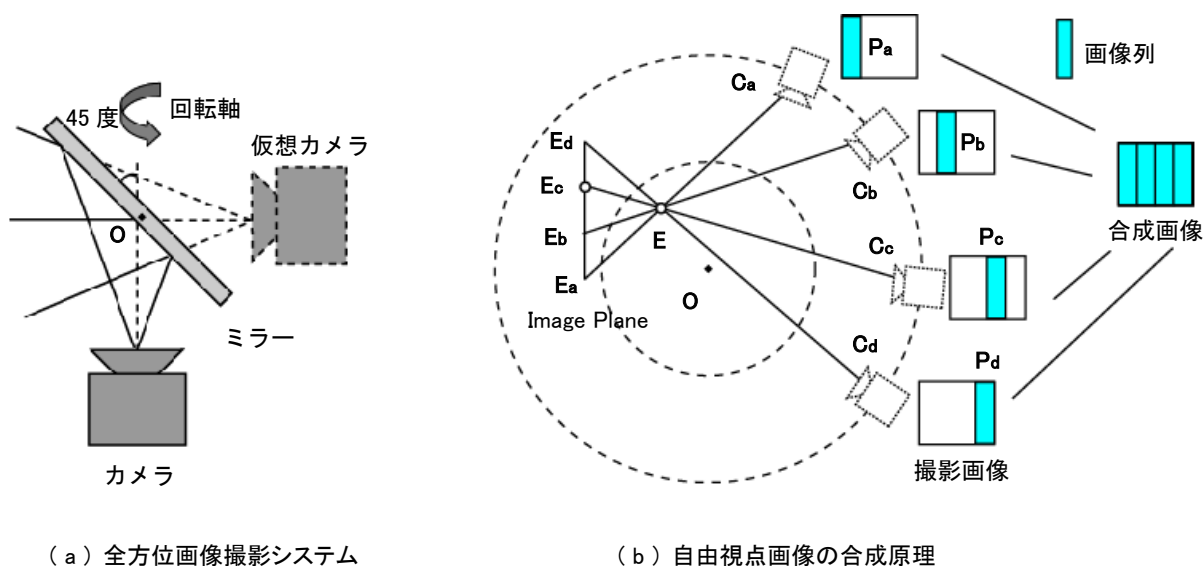


Fig. 3.1 自由視点画像撮影システム

Fig. 3.1 (a) に示すように、固定したカメラを鉛直上向きにし、上方に 45 度傾けたミラーを設置する。固定カメラの光軸を中心に、ミラーを回転させることで全方位に撮影可能な仮想カメラを形成することができる。

全方位画像撮影システムを鉛直方向から見た場合を Fig. 3.1 (b) に示し、O はミラーと仮想カメラの回転中心であり、Fig. 3.1 (a) の仮想カメラレンズ中心の回転軌跡を外側の破線の円で表し、Fig. 3.1 (a) のミラーが回転中心を O として回転した時のミラー面上の回転軸の端点軌跡を内側の破線の円で表している。

Fig. 3.1 (b) に視点 E における自由視点画像生成のイメージを示す。Image Plane は視点 E にカメラをおく場合のカメラの撮像面である。EE_c は C_cE_c と同じ光線であるため、位置 C_c の仮想カメラで撮影された画像の画像列 P_c を自由視点 E の合成画像の画像列とする。

EE_c と同様に EE_a、EE_b、EE_d をもとに位置 C_a、C_b と C_d の仮想カメラで撮影された画像群から画像列 P_a、P_b と P_d を取り出し、画像列 P_a、P_b、P_c、P_d をつなぎ合わせることで自由視点 E の撮像面上の合成画像を生成する。なお、生成する視点位置によって使用する撮影画像も変化するため、自由視点生成に必要なすべての画像列に対応する光線を算出する必要があるが、詳細な算出方法を著者らが提案した自由視点立体画像生成システム²⁷⁾に記述してある。

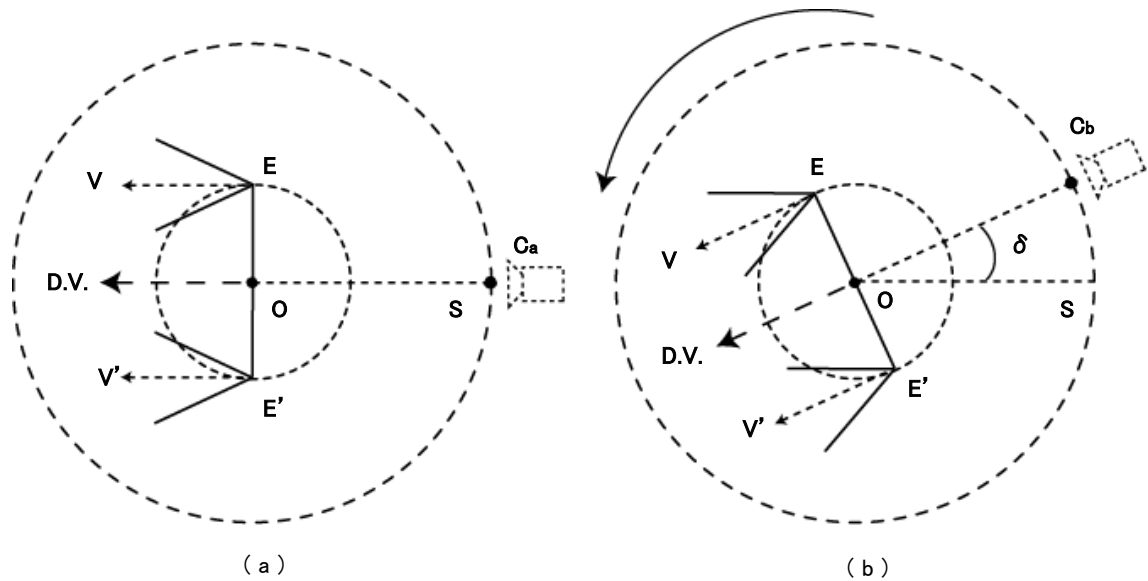


Fig. 3.2 自由視点の観察方向に関する定義

Fig. 3.2 (a) に示すように、生成された自由視点画像は両眼視差画像であり、右視点 E と左視点 E' の距離を平均眼間距離の 65 mm にしているため、視点が円心を O、直径を EE' とした円上にある。Ca 位置を仮想カメラの回転開始位置とし、OS を基準線とした場合、視点 E と E' から基準線 OS と平行した光線 EV と E'V' を引き、これを視点の視線方向として定義する。この時、視点の視線方向は仮想カメラの視線方向 D.V. と同じ方向で、EV と E'V' は基準線 OS と平行であるため、なす角は 0 度である。

仮想カメラが反時計周りに、Fig. 3.2 (b) に示すような Cb 位置まで δ 度を回転した場合、視点 E と E' も円上で回転され、視線方向 EV と E'V' は基準線 OS とのなす角が δ となるため、視点 E と E' における観察方向は δ 度である。

3.2.2 スケーリング補間

3.2.1 のシステムにおいては、ミラーの回転により、仮想カメラも回転する。回転しながら撮影を行う仮想カメラで撮影した各画像内においては傾いた物体のエッジの傾きが異なる。

上記のことについては、カメラを固定して表すと Fig. 3.3 のようになる。カメラを点 C に置き、x 軸に対して傾きが α 度の物体 S を撮影することについて考える。Fig. 3.3 (a) において、A は y 軸上の固定点であり、B は回転中心を O とし、y 軸を回転軸として反時計に回転する点である。物体 S が AB の位置にあるとき、カメラ C で撮影した画像は Image(AB)

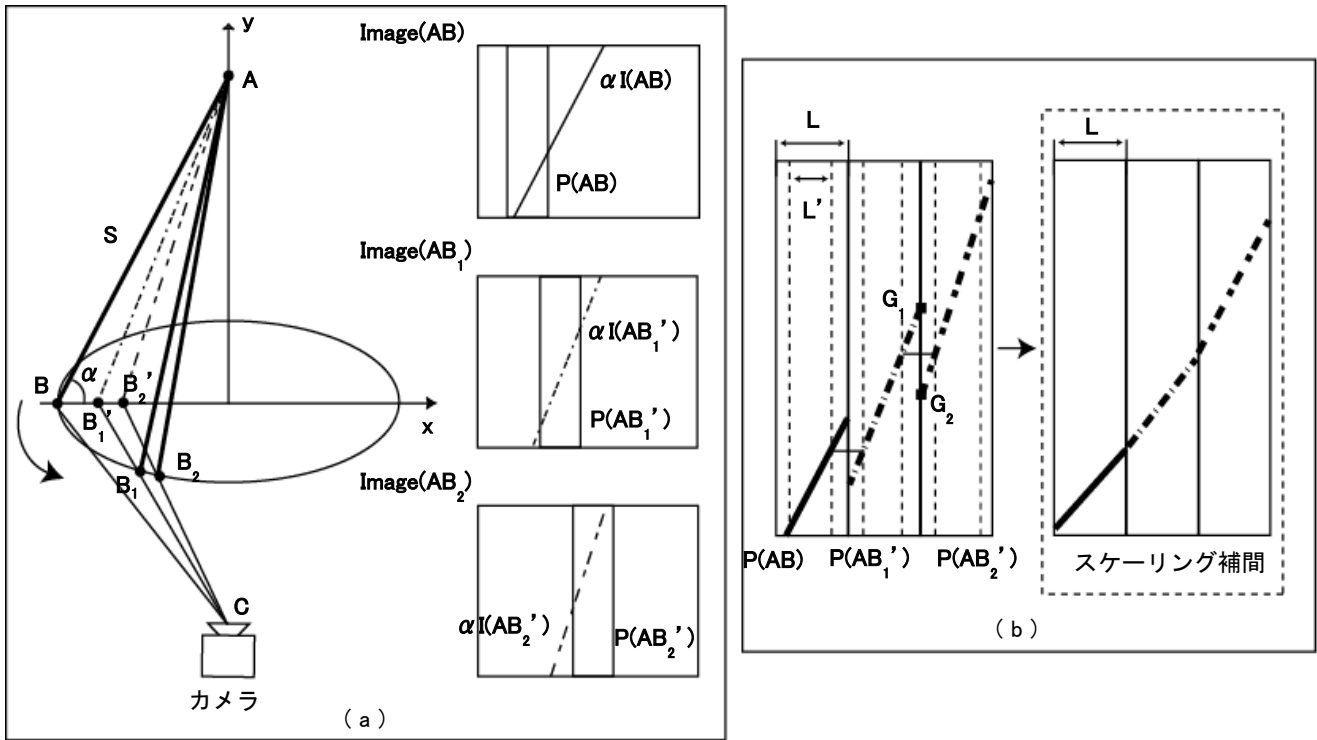


Fig. 3.3 物体の傾きによる画像列の不連続

である。物体 S の撮像 $\text{Image}(AB)$ 上における傾きを $\alpha I(AB)$ とし、その中の自由視点画像生成に必要な画像列を $P(AB)$ とする。次に、回転点 B が B_1 に回転し、撮影画像 $\text{Image}(AB_1)$ 上における物体 S の傾きが $\alpha I(AB_1')$ となり、自由視点画像生成に必要な画像列が $P(AB_1')$ となる。さらに、 B_1 が B_2 に回転し、撮影画像 $\text{Image}(AB_2)$ 上における物体 S の傾きが $\alpha I(AB_2')$ となり、自由視点画像生成に必要な画像列が $P(AB_2')$ となる。

撮影画像 $\text{Image}(AB)$ 、 $\text{Image}(AB_1)$ 、 $\text{Image}(AB_2)$ における物体 S の傾き $\alpha I(AB)$ 、 $\alpha I(AB_1')$ 、 $\alpha I(AB_2')$ は、物体の回転によって異なるため、Fig. 3.3 (b) に示したように撮影画像から取り出した画像列 $P(AB)$ 、 $P(AB_1')$ 、 $P(AB_2')$ を結合させても、エッジが途切れて不連続な画像になってしまう。

Fig. 3.3 (b) 左に示すように取り出した画像列 $P(AB)$ 、 $P(AB_1')$ 、 $P(AB_2')$ を単純に合成すると、同じエッジでも各画像列におけるエッジの傾きが異なるため、水平方向においては各画像列に重なる部分が生じ、エッジが繋がらない。この問題を解決するために、水平方向に画像を拡大・縮小させると、画像中の斜めエッジの傾きが変わることを利用する。

画像列 $P(AB)$ 、 $P(AB_1')$ 、 $P(AB_2')$ の幅は固定であるため、拡大すると画像列にあるエッジの端点は上下方向に移動することになる。例えば、Fig. 3.3 (b) に示したように、画像列 $P(AB_1')$ において、画像列を水平方向へ拡大すると、エッジの端点 G_1 は下へ移動し、画像列

$P(AB_2')$ において、画像列を水平方向へ拡大すると、エッジの端点 G_2 は上へ移動する。そして、拡大が適切であれば、端点 G_1 と G_2 が同じ点となり、Fig. 3.3 (b) 右のように画像列間において斜めのエッジがつながる。

具体的には、Fig. 3.3 (b) 左に示すように、画像列 $P(AB)$ の幅 L よりも幅が小さい L' の画素列を決め、 L' の画素列を中心から水平方向へ幅 L まで拡大する。画素列 $P(AB_1')$ 、 $P(AB_2')$ に対しても同様な処理を施す。

L' は次式により求める。

$$L' = \left(\frac{L}{\eta} \right) \quad (3.1)$$

式中の η はスケーリング係数である。

3.3 実験

まず、全方位画像撮影システムを用いて自由視点画像の生成を行い、生成された自由視点画像を用いてスケーリング係数を求める実験を行った。次に、求められたスケーリング係数を用いて自由視点画像の生成実験を行い、提案手法の有効性についての評価を行った。

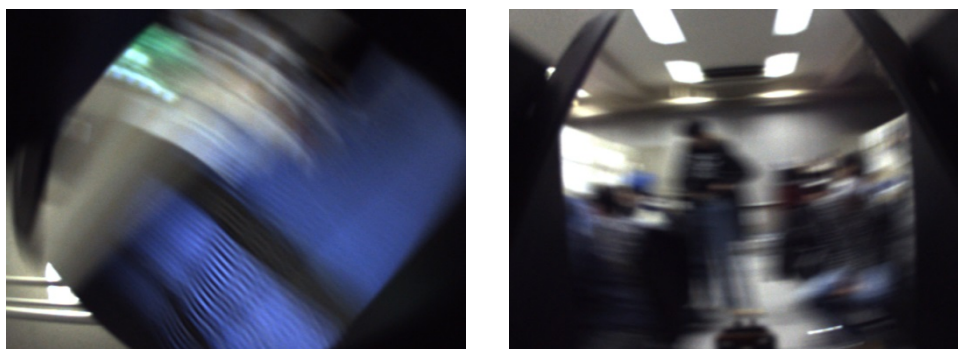
3.3.1 撮影システム

全方位画像撮影システムの外観図を Fig. 3.4 (a) に示し、ミラーはギアモータの回転によって回転されている。モータによる回転速度は可変である。全方位の画像撮影を行う際に、1回転に必要な最小回転時間は 0.4 s であり、1回転に必要な最大回転時間は 16 s である。

全方位画像撮影システムに取り付けたカメラのシャッター速度は $\frac{1}{30}$ s であるため、ボケのないフレーム画像を撮影するために、1回転に必要な回転時間は 8 s 以上でなければならない。また、回転時間は 8 s 以下で撮影したフレーム画像を Fig. 3.4 (b) に示す。



(a) 全方位画像撮影システム



(b) 回転時間は 8s 以下で撮影したフレーム画像

Fig. 3.4 全方位画像撮影システムによる画像撮影

仮想カメラの回転位置を知るために、装置の回転部分に白色 LED を取り付けた。LED はミラーの回転に伴い、画像上で円軌道を描くため、画像上の LED を検出すれば、フレーム画像における仮想カメラ位置の角度検出が可能である。

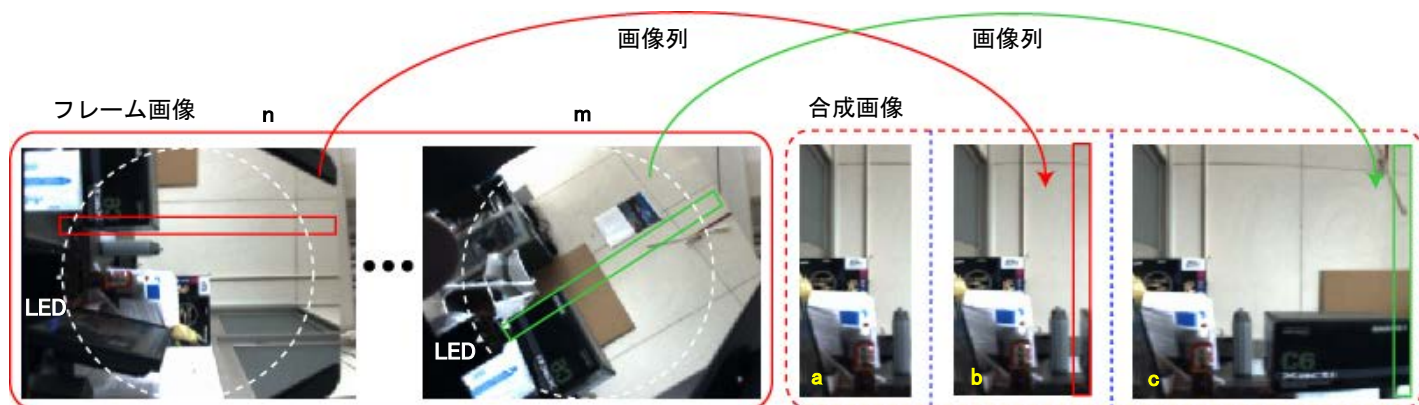


Fig. 3.5 フレーム画像からの画像列取り出しによる自由視点画像生成

Fig. 3.5 左側の画像は自由視点画像生成に必要なフレーム画像であり、右側の画像 a、b、c は画像列を用いて視点画像を合成する途中画像である。自由視点画像を生成するとき、使用するフレーム画像が第 n 枚目の場合、視点画像生成に必要な画像列を取り出す必要がある。

ミラーの回転によりフレーム画像も回転するが、検出された LED の回転角度で画像を 2 次元回転変換させれば、正立画像に戻すことができる。そして、この正立した画像列をこれまで取り出した画像列 a とつなぎ合わせると Fig. 3.5 の b になり、次にフレーム画像 m に対しても同様な処理を行うと Fig. 3.5 の c になる。

視点生成に必要なすべてのフレーム画像に対しても同様な処理を行うことで、自由視点画像を生成できる。生成された 30 度方向の視点画像及び 90 度方向の視点画像を Fig. 3.6 に示す。Fig. 3.6 (a')、(b') は Fig. 3.6 (a)、(b) の一部を拡大した画像であり、画像列間におけるエッジが不連続であることが確認できる。

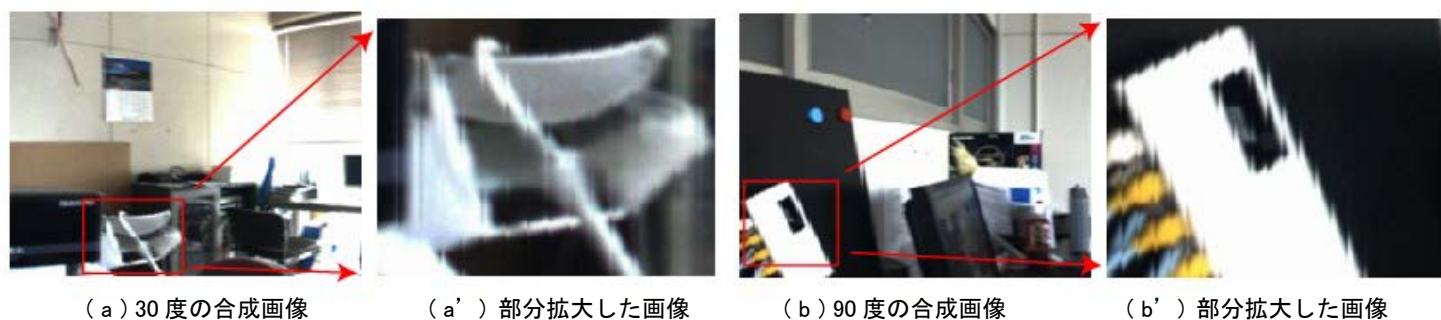


Fig. 3.6 スケーリング処理なしの合成画像

3.3.2 スケーリング係数を求める実験

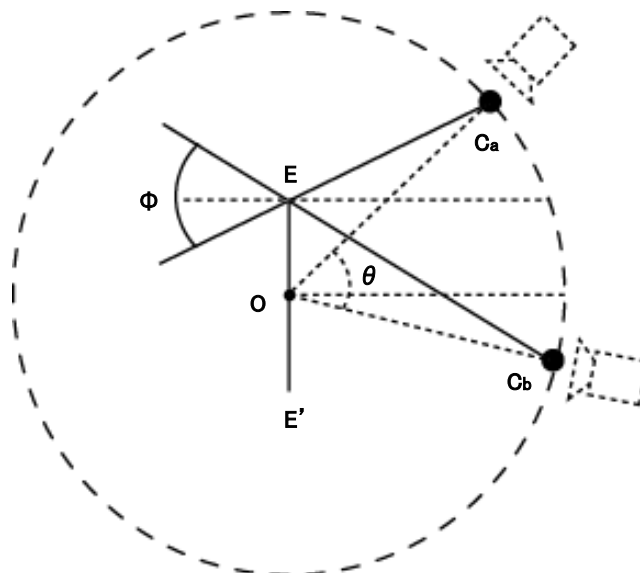


Fig. 3.7 必要なフレーム画像数の算出

本システムで使用するカメラの解像度は 640(横)×480(縦)ピクセルであり、水平視野角 Φ は 60 度であるため、生成される自由視点画像と水平視野角も同じである。実験において、Fig. 3.7 に示す Φ は 60 度であり、 $OE = 32.5 \text{ mm}$ であり、仮想カメラの回転半径 OC_a と OC_b は 110 mm であるため、 $\triangle C_aEO$ と $\triangle EOC_b$ では、 $\angle EOC_a = 45.1747894748$ 度、 $\angle EOC_b = 105.1747894939$ 度と求めることができる。

また、 $\theta = \angle EOC_b - \angle EOC_a$ であるため、 $\theta = 60.0000000191$ 度となる。 θ と Φ の誤差が非常に小さいため、一つの視点画像を生成する際に必要なフレーム画像数 N' は、次式を用いて近似的に求めることができる。

$$N' \approx \Phi \times \left(\frac{N}{360} \right) \quad (3.2)$$

ただし、 Φ は自由視点画像の水平視野角であり、 N は 360 度回転して撮影したフレーム画像の枚数である。

実験では、全方位画像撮影システムは 1 回転に必要な時間は 12.8 s であり、カメラのフレームレートは 30 fps であるため、1 周回転して撮影したフレーム画像の枚数 $N = 384$ 枚である。そのため、水平視野角は 60 度の視点画像を生成するには、式(3.2) により必要なフレーム画像数 N' は 64 枚であると求められる。そのため、横幅は 640 ピクセルの視点画像を生成するのに、1 枚のフレーム画像から 10 ピクセル幅の画像列が必要である。すなわち、固定画像列の幅 L は 10 ピクセルである。 L' について、1~9 ピクセルまでの間で選択するこ

とができるが、1~4 ピクセルまでの画素列幅は短く、元の画像情報が少ないため、 $L' = 5$ 、6、7、8、9 ピクセルの場合について実験を行った。Fig. 3.8 は、 $L' = 5$ 、6、7、8、9 ピクセルでスケーリングを施した画像である。

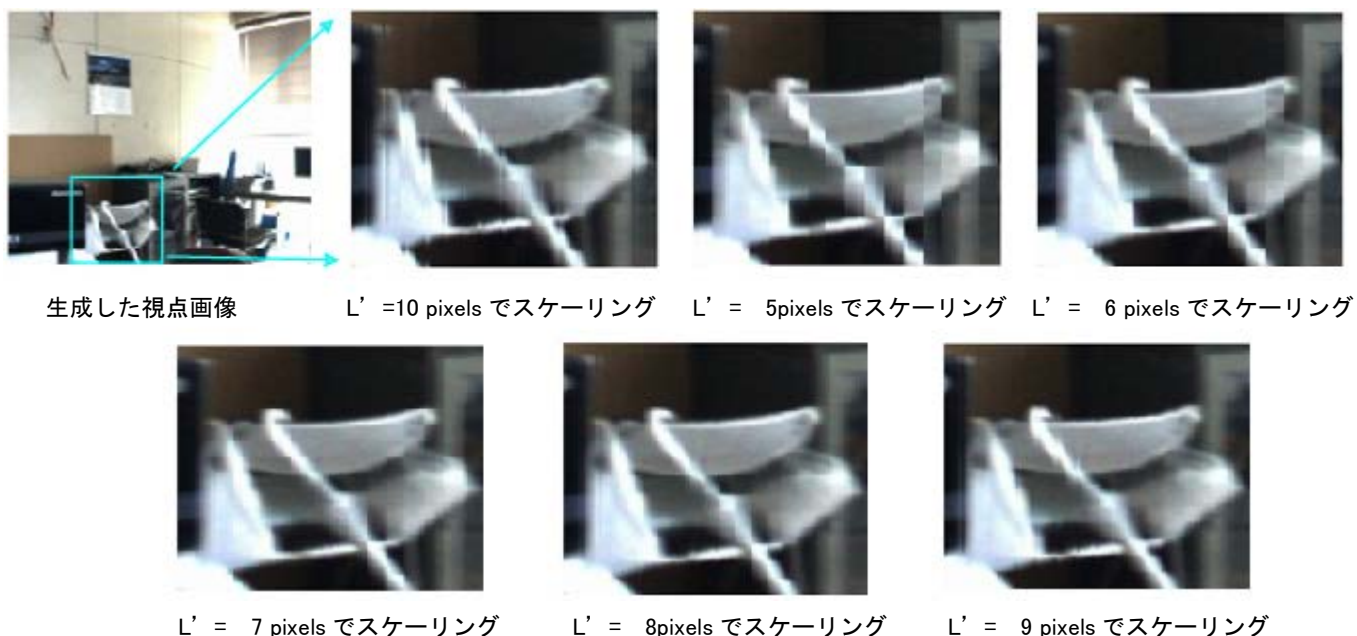


Fig. 3.8 スケーリング処理を行った画像

一般的に画像中のエッジが連続している場合、画像は滑らかであるのに対して、エッジが多数に途切れている場合、画像の滑らかさは低下する。そのため、スケーリングを行った後の画像列間のエッジが連続しているかについて評価を行った。

Fig. 3.3 (b) 左に示したように、撮影位置が不連続であるため、同じ斜めの直線でも異なる画像列の中では傾きが異なってしまふ。そのため、一本のエッジでも水平方向では二重に形成され、エッジが不連続になる。つまり、本システムでのエッジ不連続はエッジが二重に生成されていることが原因である。2 値化後の斜めエッジが多い場合、水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値が大きくなる。スケーリング処理によって二重に生成されたエッジが一重になると上記の累積値が小さくなるので、水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値を算出することで、エッジが連続しているかどうかを評価することができる。

また、水平方向のエッジは、式(3.3)に示す Sobel オペレータを用いて検出した。検出されたエッジ画像を Fig. 3.9 に示す。式(3.3)では、 V は各画素の画素値である。

$$Edge_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times V \quad (3.3)$$

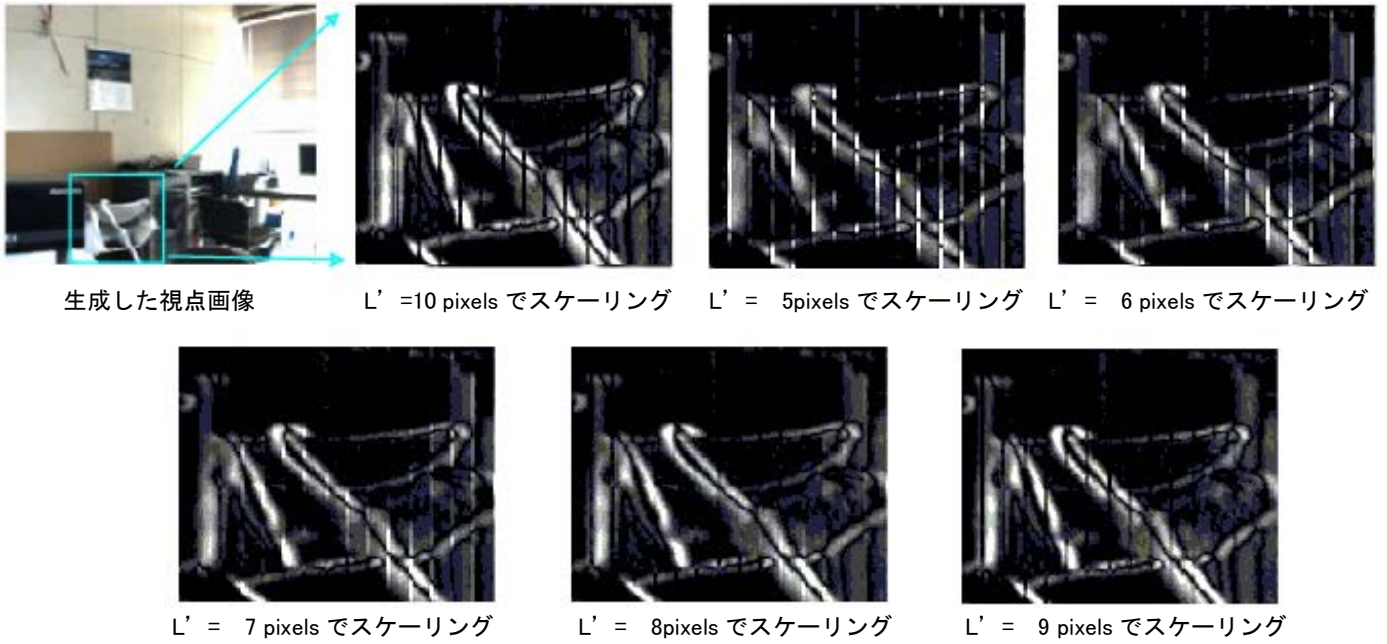


Fig. 3.9 合成画像のエッジ画像

Fig. 3.9 において、 $L' = 5, 6, 9, 10$ ピクセルでスケーリングしたエッジ画像から、画像列間が不連続である場合、水平方向のエッジの輝度変化が激しいことが分かる。一方 $L' = 7, 8$ ピクセルでスケーリングした場合、画像列間のエッジが連続し、水平方向のエッジの輝度変化が小さいことが分かる。

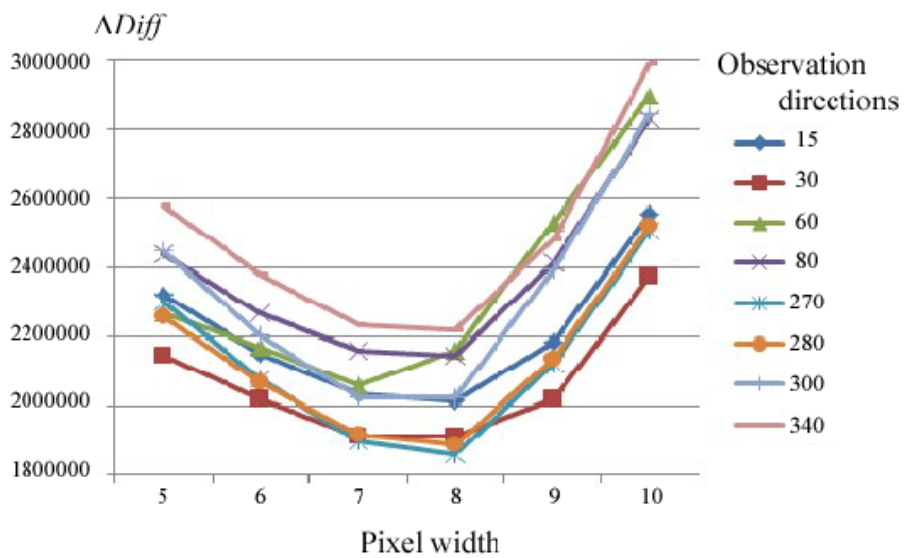


Fig. 3.10 画素値幅に対する輝度変化量累積値 $\Delta Diff$

Fig. 3.10 は、 $L' = 5, 6, 7, 8, 9$ ピクセルでスケーリングした合成画像のエッジ画像に対して水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値 $\Delta Diff$ を式(3.4) により求めたグラフである。

$$\Delta Diff = \sum_{i=0}^{H-1} \sum_{j=0}^{W-1} \left| I[i, j] - I[i+1, j] \right| \quad (3.4)$$

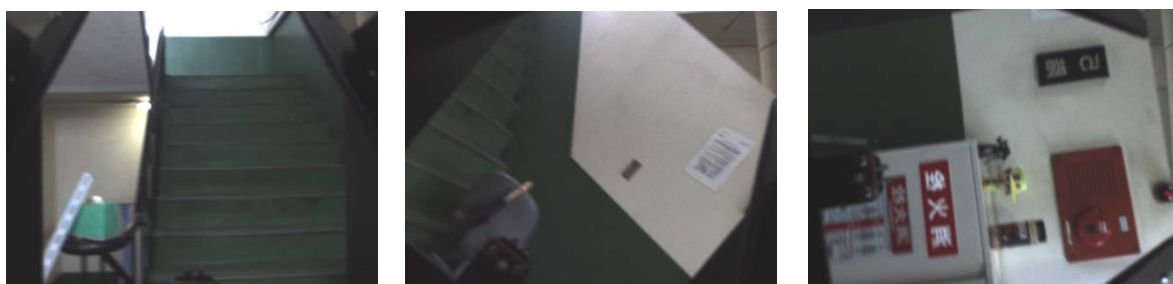
Fig. 3.10 の結果から、観察方向が 60 度の場合、 $L' = 7$ ピクセルでのエッジの水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値は最小であるが、それ以外は、 $L' = 8$ ピクセルの場合にエッジの水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値は最小であるため、最適の L' を 8 ピクセルとする。式(3.1) よりスケーリング係数 η は 1.25 となる。

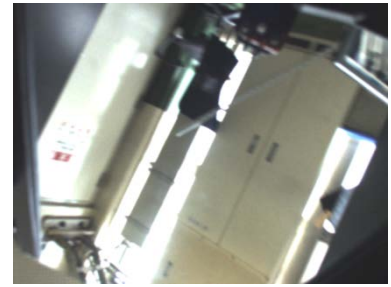
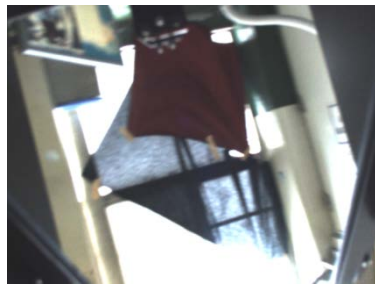
全方位画像撮影システムを用いて自由視点画像を生成する際に、回転する仮想カメラが撮影した全方位画像から画像列を取り出してつなぎ合わせるによって視点画像を合成している。本来、生成する視点から撮影物体までの距離を計算し、得られた撮影画像に対してアフィン変換を行うことで画像列をより正確につなぎ合わせなければならないが、これでは画像処理における計算量が大幅に増え、リアルタイム処理に適さない。提案手法では複雑な計算が必要なく、近似的に視点画像を生成することができるが、不連続なエッジが生じてしまう。しかし、提案手法のスケーリング処理を行うことで生成した視点画像が視覚的に滑らかであることが確認された。また、画像が視覚的に滑らかであることは不連続なエッジが少ないので、上記で説明した水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値を用いることで評価可能であるため、本実験において上記の評価関数を用いることは妥当だと考えられる。

3.3.3 自由視点画像の生成実験

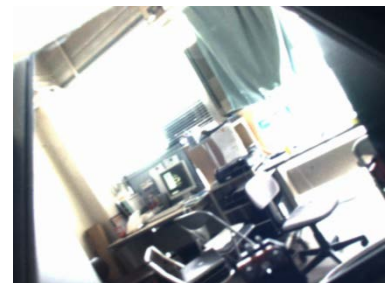
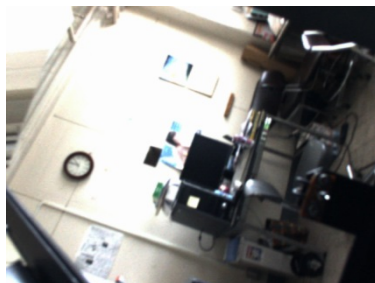
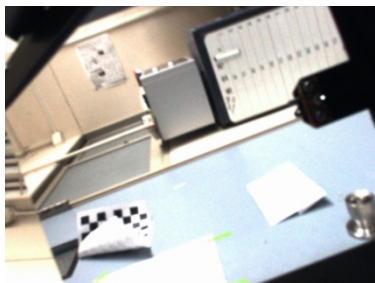
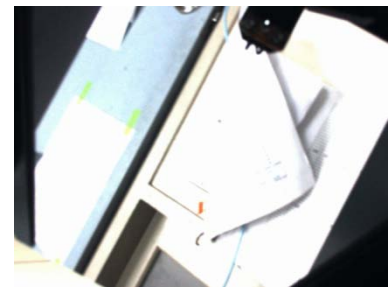
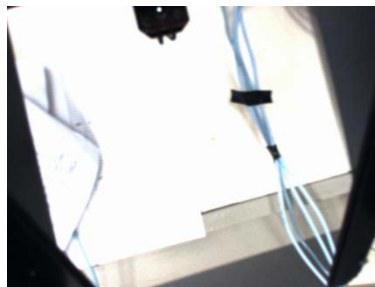
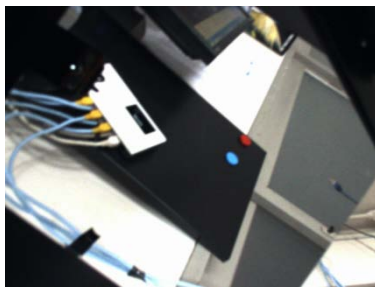
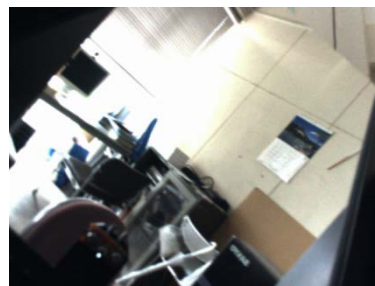
3.3.2 で求められた係数 η を用いて、Fig. 3.11 に示す異なる 3 セットの撮影画像を使用して自由視点画像の生成実験を行った。

生成される自由視点画像の解像度は 640(横)×480(縦)ピクセルである。





セット1のフレーム画像の一部



セット2のフレーム画像の一部



セット3のフレーム画像の一部

Fig. 3.11 自由視点画像の生成で用いるフレーム画像の一部

セット1は、 $2.5(W) \times 3.0(H) \times 6.3(D)$ m の廊下において午後4時に撮影した画像で、光源は自然光である。ミラーを360度回転させ、426枚のフレーム画像を撮影した。この場合、視野角が60度の視点画像を生成するには、式(3.2)により71枚のフレーム画像が必要である。そのため、1枚のフレーム画像から取り出す画像列の幅 $L=9$ ピクセルである。

セット2は、 $4.2(W) \times 3.0(H) \times 2.5(D)$ m の室内において正午に撮影した画像で、光源は36ワットの蛍光灯8本である。ミラーを360度回転させ、384枚のフレーム画像を撮影した。この場合、視野角が60度の視点画像を生成するには、式(3.2)により64枚のフレーム画像が必要である。そのため、1枚のフレーム画像から取り出す画像列の幅 $L=10$ ピクセルである。

セット3は、 $3.0(W) \times 3.0(H) \times 8.4(D)$ m の室内において午前10時に撮影した画像で、光源は自然光である。ミラーを360度回転させ、270枚のフレーム画像を撮影した。この場合、視野角が60度の視点画像を生成するには、式(3.2)により45枚のフレーム画像が必要である。そのため、1枚のフレーム画像から取り出す画像列の幅 $L=14$ ピクセルである。

また、撮影する際に使用するカメラのシャッター速度は、 $\frac{1}{30}$ s である。

これらの画像列幅 L と 3.2.2 節で求められたスケーリング係数 η を式(3.1) に代入して L' は 7、8 と 11 ピクセルとなる。

画素列の幅 $L' = 7、8$ と 11 ピクセルで実験した結果を Fig. 3.12 と Fig. 3.13 に示す。なお、比較しやすくするために、生成された自由視点画像（スケーリングなしで生成した画像）とスケーリングを施した画像の一部の拡大画像とそのエッジ画像を示す。

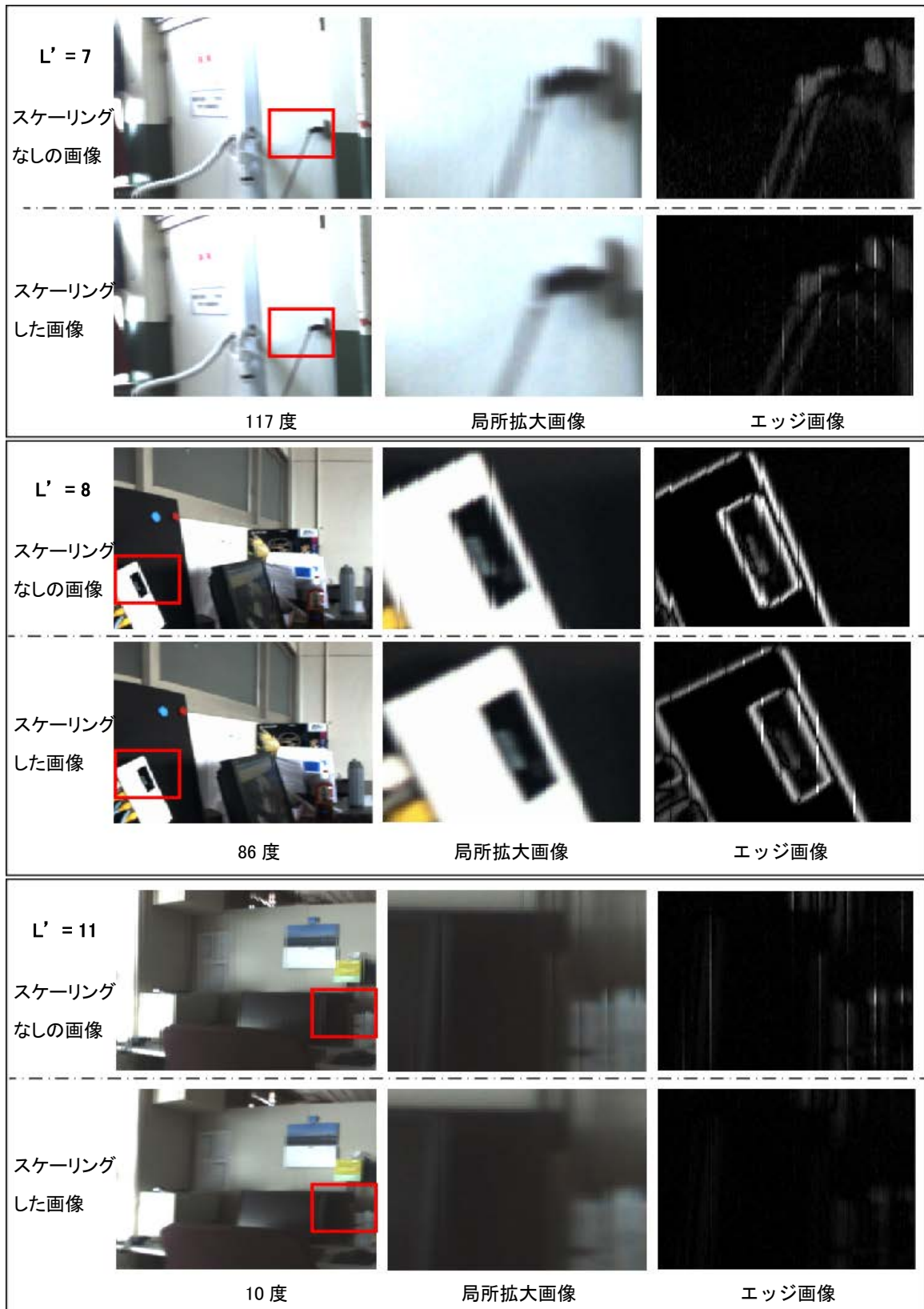


Fig. 3.12 実験結果 1

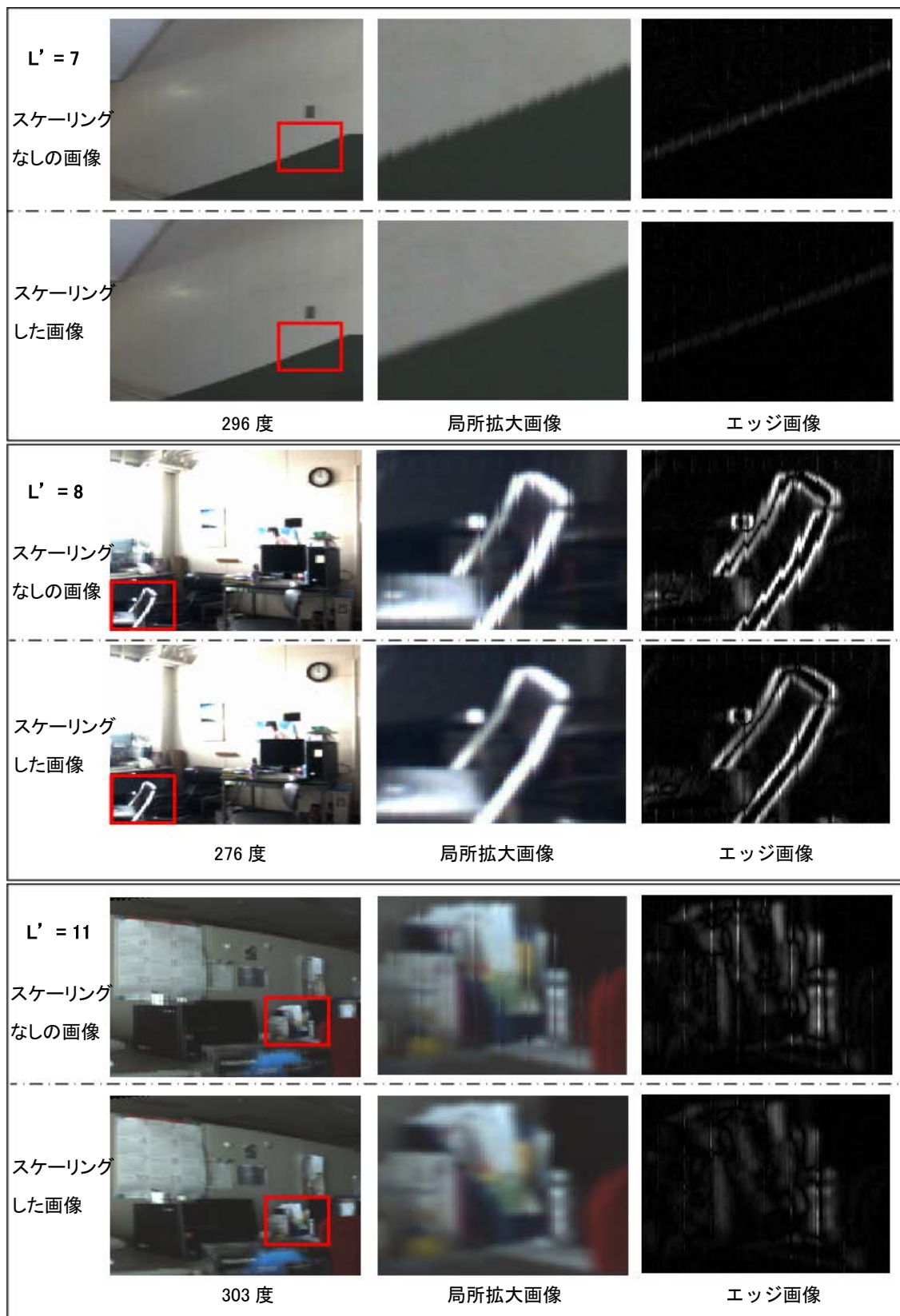


Fig. 3.13 実験結果 2

画素列の幅 $L' = 7, 8$ と 11 ピクセルでスケーリングされた画像は、スケーリングなしで生成した画像よりも画像列間が連続であり、滑らかな画像であることがわかる。定量評価のため、それぞれのエッジ画像に対して、水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値を求め、これらの結果を Fig. 3.14 に示すグラフにプロットした。

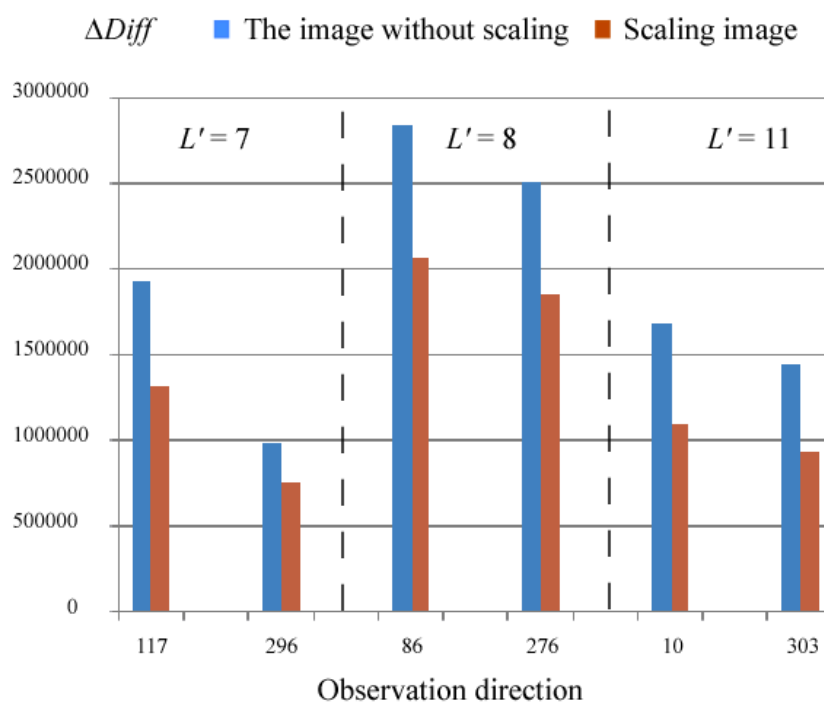


Fig. 3.14 Fig. 3.12 と Fig. 3.13 の輝度変化量の累積値

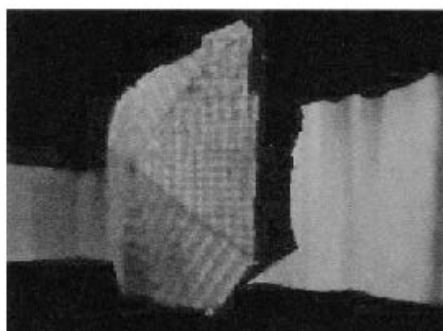
Fig. 3.14 の実験結果から、 $L' = 7, L' = 8, L' = 11$ ピクセルでスケーリングされた画像における水平方向の近隣画素間の輝度変化量の累積値は、いずれもスケーリングなしで生成した画像よりも小さいため、本章の提案手法であるスケーリング補間を用いて生成した自由視点画像のほうがより滑らかであることが確認された。

3.4 結論

自由視点画像生成法が多数提案されているが、装置が複雑で高価である問題やオクルージョンが発生する問題があった。近年、これらの問題を解決するため、多視点画像から画像列を切り出し、つなぎ合わせて自由視点画像を生成する方法が提案されていた。しかし、異なる視点で得られた画像の中の斜めエッジの傾きが異なるため、画像列のつなぎ目でエッジが不連続になる問題があった。



(a) 提案手法による結果画



(b) 従来研究の結果画像



(c) デジタルカメラによる合成画像

Fig. 3.15 比較画像

本章は、画像を拡大縮小するとき、エッジの傾きが変化することに着目し、スケーリング補間を用いて画像列をつなぎ合わせる方法を提案する。提案方法により Fig. 3.15 (a) に示すように、生成された自由視点画像は従来法で生成された自由視点画像のオクルージョンの問題(Fig. 3.15 (b)) や画像列間におけるエッジ不連続の問題(Fig. 3.15 (c)) を解決できた。提案方法の有効性が、視覚的な評価及び数値評価実験により確認された。

第4章 奥行きのある深い裸眼立体表示

4.1 緒論

第2章と第3章の提案手法により奥行きのある深い自由視点立体画像を生成できるが、これに適した裸眼立体表示手法が必要である。裸眼立体表示手法^{33)~45)}の中でよく知られている方式としてレンチキュラーレンズ方式^{46)~50)}がある。レンチキュラーレンズを用いる方式は既存デバイスとの整合性が良く、最も実用化が進んでいる。しかし、多視点の視差画像をレンチキュラーレンズの方向に合わせて交互に繰り返し並べて二次元的な電子表示パネルに表示する従来の立体表示装置では、視差画像が不連続に切り替わるフリップ現象が自然さを損ね、深い奥行き感を視聴者に提供することができないため、臨場感が豊かな立体表示が困難である。

また、疎なレンズアレイを用いた手法が研究されている^{51)~53)}。この手法はピッチが大きなレンズを用いるので、フリップを軽減できると同時に複数の画素観察を前提とするため、クロストークが存在しない。

しかし、この手法ではレンズ・表示画像間距離に対応した虚像面を作成するため、生成された虚像面上では歪みのない立体像を表示できるが、虚像面以外において立体像は劣化してしまうため、奥行きのある深い立体表示が困難である。

上記の問題を解決するために、モータ駆動ステージによってレンズ・表示画像間距離を変化させる手法⁵⁴⁾が提案されている。この手法では振動するステージにレンズアレイを乗せることによりレンズ・表示画像間距離を物理的に変化させ、立体像劣化を解消させている。しかし、立体像を時分割で表示することになるため、立体像表示の際にチラツキが生じてしまう問題や、レンズアレイの移動に応じて液晶に表示する画像を切り替えなければならないため、応答速度が非常に速い液晶も必要になる問題がある。さらに、常にレンズアレイを振動させなければならないため、振動や騒音、耐久性の問題も存在する。また、カメラを上下左右に移動してプロジェクタで投影した画像を撮影し、撮影された画像を合成してレンズアレイに合わせて表示する手法⁵⁵⁾⁵⁶⁾も提案されている。この手法では、レンズアレイに合わせてカメラで横方向280枚、縦方向210枚の写真を撮影して合成画像を作成する。レンズアレイの各レンズ下の表示画像の解像度を大きくすると、観察する際に画像の奥行きを深くすることができるが静止画しか表示できないため、実用性が低い。

本章では、表示物体の奥行きに応じて、表示する領域を分割し、複数枚の透過式ディスプレイで表示することにより、奥行きのある深い裸眼立体表示方法を提案する。

提案手法では、レンズ・表示画像間距離に対応した奥行き以外の立体像が劣化してしまう問題を解決するために、複数枚の透過式ディスプレイを用いてそれぞれの画像を表示することによって、レンズ・表示画像間距離を複数作成でき、それぞれの虚像面を生成することができる。これによって、異なる奥行きを持つ立体画像に対してそれぞれの奥行きに

対応した距離で生成した虚像面で画像を表示することができるため、立体像が劣化せずに滑らかな立体表示を行うことができる。

提案手法の特徴としては、レンズを動かす物理的な駆動部を必要としないため、振動や騒音、耐久性の問題が生じない上に、立体表示装置の構造がシンプルである。また、立体動画への拡張もできる。

検証実験において、2枚の透過式ディスプレイと1枚のiPadディスプレイを用いて実験システムを試作した。また、表示する立体画像を3層に分割して、それぞれの画像に対応するディスプレイで表示し、提案手法の有効性を確認することができた。

4.2 提案手法

4.2.1 立体画像劣化の原因

Fig. 4.1 に示すように、ピッチが大きいレンチキュラーレンズを使用して立体表示を行う際に、レンズ・表示画像間の距離 d はレンズの焦点距離 f と異なり、 $d < f$ であるため、表示画像上の物体は奥行き L_1 にある虚像面 1 にあるように観察される。この L_1 は d と f を式(4.1) に代入することで求められる。

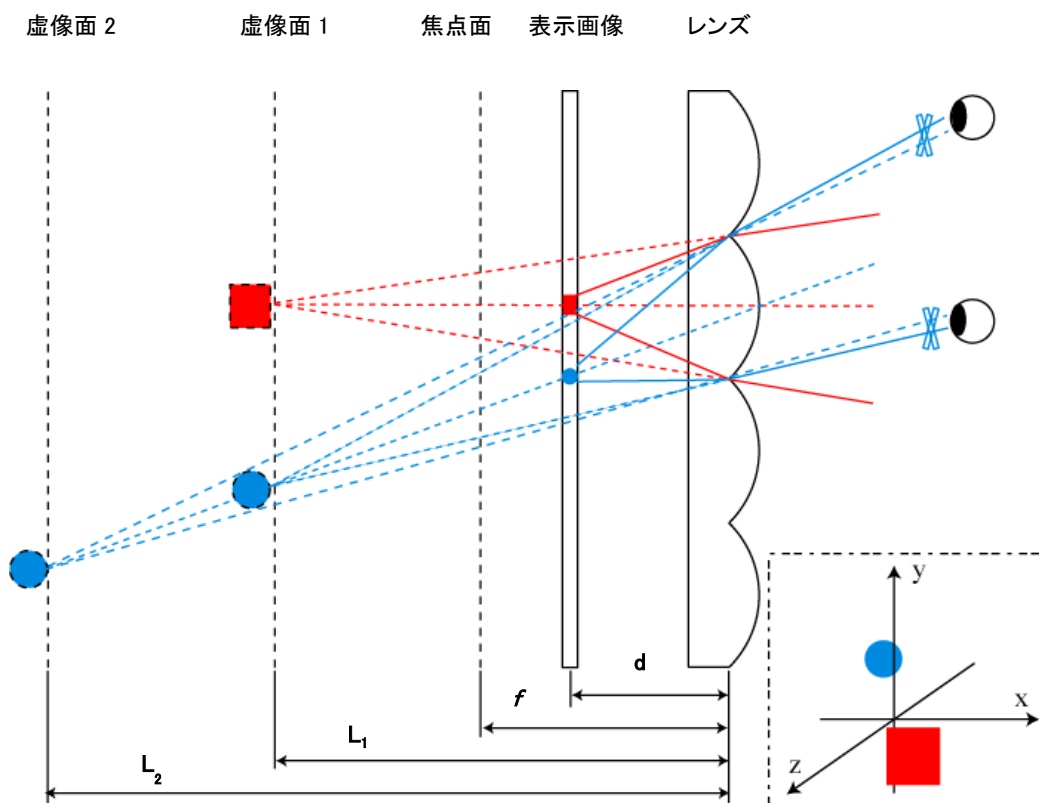


Fig. 4.1 立体像の劣化原因

$$L_1 = \frac{f \times d}{f - d} \quad (4.1)$$

しかし、一つの表示画像に対して、一つの虚像面しか存在しないため、奥行きが異なる物体を表示するとき、虚像面は一つしかなく、表示物体の一部分しか焦点が合わない。例えば、表示画像上にある赤い物体が虚像面 1 上にあるなら、レンズを通る物体からの理想の光線と、画像からの実際の光線が一致するため、表示する立体像が崩れることなく観察することができる。

これに対して、虚像面 1 とは異なる奥行き L_2 にある青い物体を表示する場合、実際に観察される光線は虚像面 1 からの青色の実線になる。しかし、青い物体から出る理想の光線は、虚像面 2 からの点線であるため、理想の光線と実際の光線との間にずれが生じてしまい、観察された立体像が崩れてしまい、正しく再生されない問題がある。

4.2.2 透過式ディスプレイによる表示装置の構築

上記の問題を解決するために、本章では、表示する物体の奥行きに応じて、表示する領域を分割し、複数枚の透過式ディスプレイを用いて表示することにより、奥行きの高い立体表示方法を提案する。

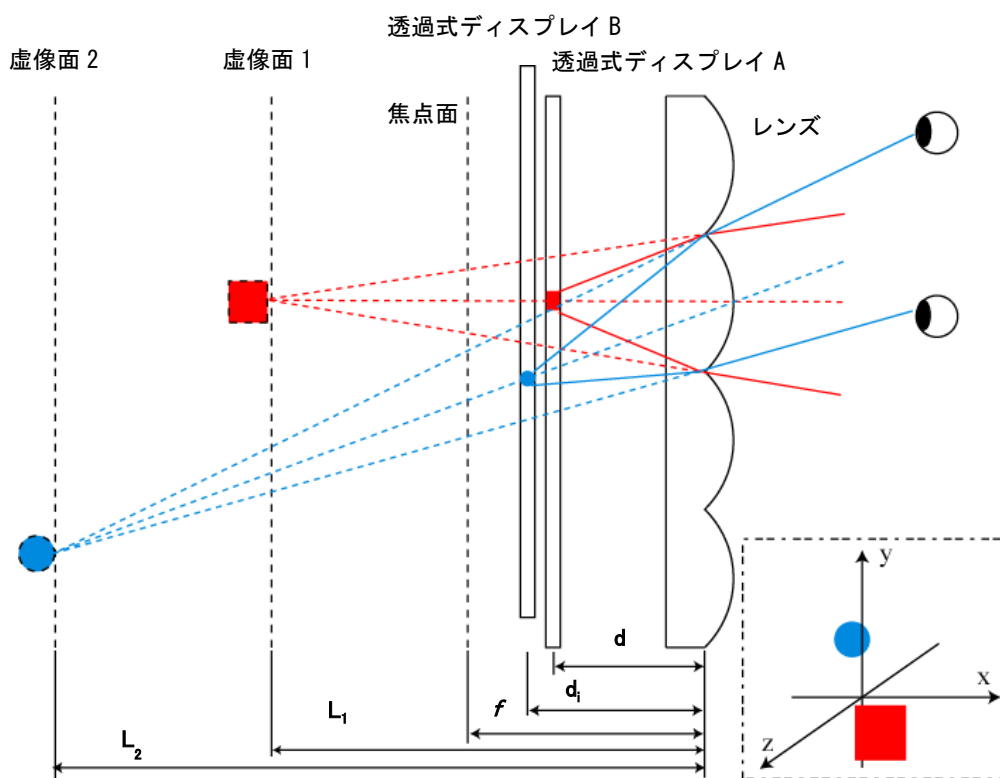


Fig. 4.2 提案システムイメージ

具体的には Fig. 4.2 に示したように、立体像の奥行きに応じてレンズ・表示画像間の距離を変化させる必要があるため、手前の赤い物体を 1 層目として一つ目の透過式ディスプレイで表示し、奥の青い物体を 2 層目として二つ目の透過式ディスプレイで表示した場合、それぞれの表示画像に対してそれぞれの虚像面を生成することができる。そして、1 層目の透過式ディスプレイで表示する手前の赤い物体は、1 層目に対応した虚像面で再生されることになり、2 層目の透過式ディスプレイで表示する奥の青い物体は、2 層目に対応した虚像

面で再生されることになる。そのため、それぞれの立体像が理想に近い位置で再生され、理想の光線と実際の光線を一致させることができ、光線のずれを軽減できる。これにより、ピッチが大きいレンズを用いても立体像の崩れを軽減できる立体表示は可能であるため、より自然な裸眼立体表示は可能となる。また、層を多く分割することにより、より奥行き
の深い立体表示を実現できる。

提案システムを実現するために、光を透過する機能を持つディスプレイが必要である。近年、LCD 技術の向上により透過式ディスプレイが市販されるようになった。Fig. 4.3 (a) に示すのは、Samsung Electronics Co., Ltd が開発した透過式ディスプレイの実物画像である。

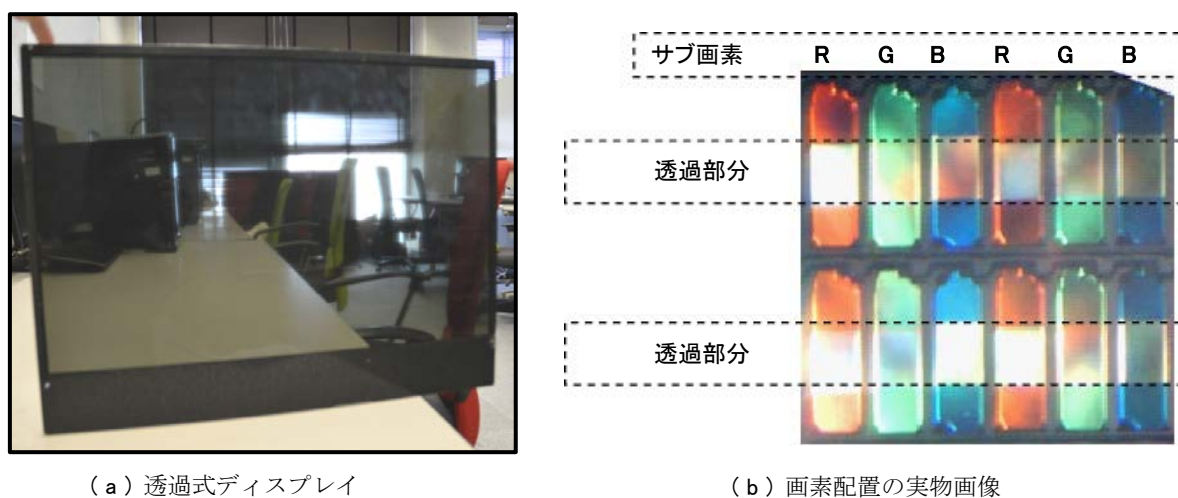


Fig. 4.3 透過式ディスプレイの構造

Fig. 4.3 (b) に示したのは、透過式ディスプレイの画素配置の実物画像である。透過式ディスプレイの画素の配置順番は R、G、B となっているが、一般的な液晶ディスプレイと異なるのは、各サブ画素の間に透明な領域が作られているところである。透過式ディスプレイを用いて画像表示を行う際に、この透明な領域は発光することなく、光を透過させる役割を果たしている。そのため、透過式ディスプレイの背面から来た光が透明な領域を透過するため、ディスプレイ自体が透けているように見える。提案手法では、表示する画像に対して領域を分割した上、それぞれの奥行きに応じて各ディスプレイを重ねて表示する必要があるため、後面に配置したディスプレイからの光線が、前面に配置したディスプレイを透過して観察されなければならないため、上記の透過式ディスプレイを用いることで提案手法の目的を達成することができると考えられる。

Fig. 4.2 のように 2 枚の透過式ディスプレイで表示システムを構築する際に、2 枚のディスプレイを同じ方向に配置すると、偏光フィルムの影響で画像を表示することができない。そのため、Fig. 4.4 (a) に示すように、後面の透過式ディスプレイ B を固定し、前面の透過式ディスプレイ A を回転させて画像表示を行う必要がある。

2枚の透過式ディスプレイを重ねて観察する場合、2枚のディスプレイの間に距離があるため、Fig. 4.4 (b) のように透過式ディスプレイ A と透過式ディスプレイ B の画素ピッチ P_1 が同じであるにもかかわらず、透視投影により視点 e から見た透過式ディスプレイ B のピッチが P_2 として観察される。なお、 $\triangle eab$ と $\triangle ecd$ の相似関係から、 P_2 ($P_2 < P_1$) を次式により求めることができる。

$$P_2 = \frac{D_1}{D_1 + D_2} \times P_1 \quad (4.2)$$

しかし、 P_1 と P_2 は Fig. 4.4 (c) に示したようにそれぞれ異なる周期を有するため、 P_1 と P_2 の周期間の微小のずれにより、モアレが生じてしまう。

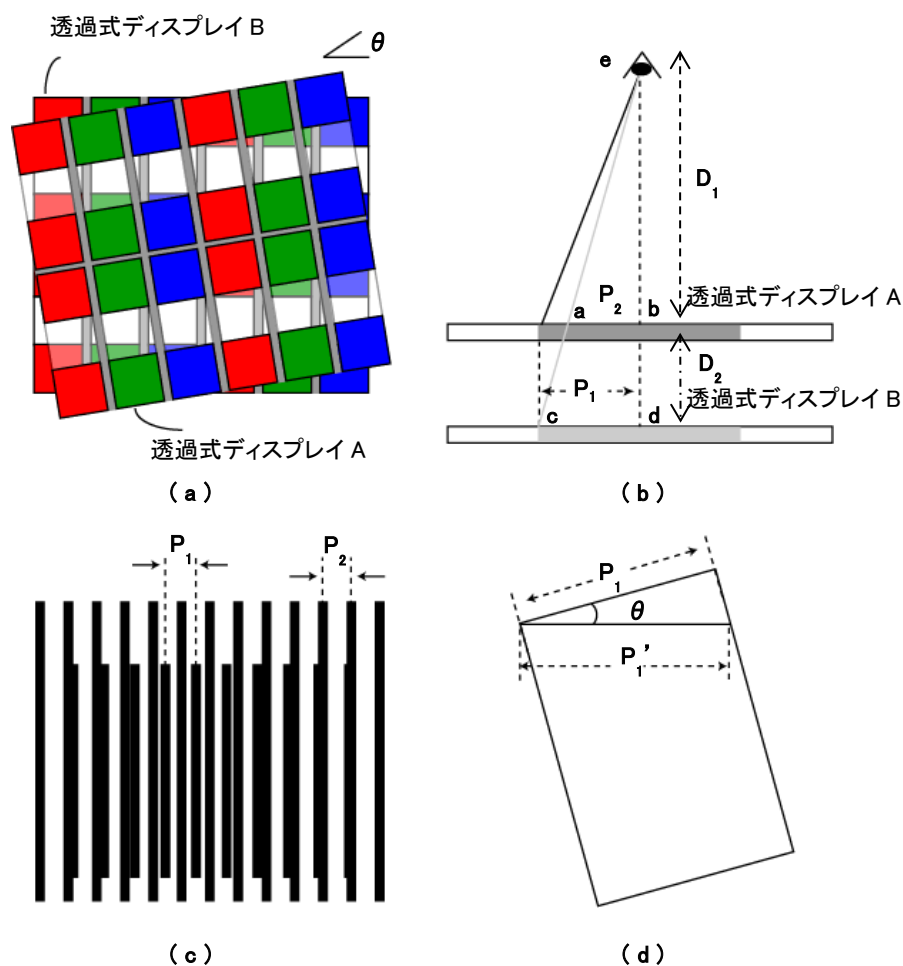


Fig. 4.4 モアレの軽減

モアレを軽減するために、 P_2 を大きくし、 $P_2 = n \times P_1$ ($n = 2, 3, 4 \dots$)、つまり P_2 が P_1 の整数倍になるようにすれば二つの周期が重なり合うため、モアレを軽減すること

ができる。また、透過式ディスプレイ A を回転させるため、Fig. 4.4 (d) に示したように P_2 を回転した後の画素ピッチは、 P_2' になり、次式により求められる。

$$P_2' = \frac{P_2}{\cos \theta} \quad (4.3)$$

ただし、回転角を θ とする。そして、次式が成り立つ。

$$\frac{P_2}{\cos \theta} = n \times P_1 \quad (n = 2, 3, 4 \dots) \quad (4.4)$$

回転角 θ が適切であれば、モアレを除去することが可能である。回転角 θ に関する具体的な検討は 4.3 節に示す。

4.2.3 レンズ端における光線のずれの計算

Fig. 4.2 に示したように、複数枚の透過式ディスプレイを用いることにより、レンズ・表示画像間の距離を変化させることが可能となる。また、レンズ端における光線のずれを人の目には分からない範囲にすることで、レンズ・表示画像間の距離が一定であっても表示できる奥行きに幅を持たせ、より奥行きが深い立体表示を行うことができる。

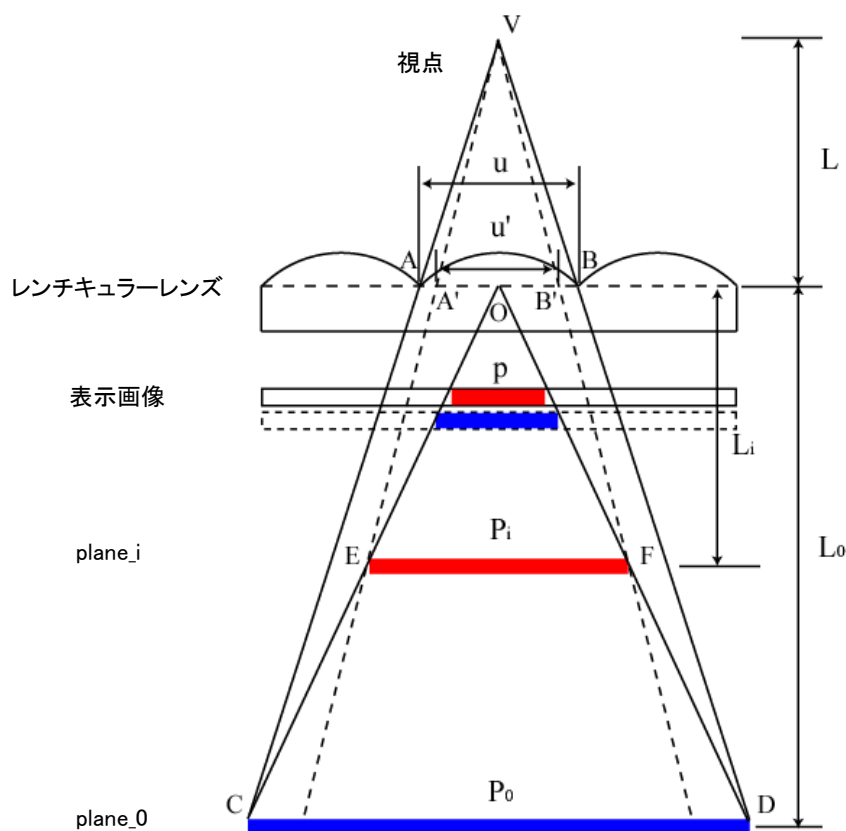


Fig. 4.5 レンズ端における光線のずれ計算

そこで、Fig. 4.5 を用いてレンズ端における光線のずれを計算する。Fig. 4.5 に示したように、レンズピッチが u のレンチキュラーレンズを用いて、表示画像上に幅が p のオブジェクトを表示し、本来理想な表示面 Plane_0 において幅は P_0 で表示されるが、実際に虚像面 Plane_i で幅が P_i の像として再生されるとした場合、観察する視点から幅が P_i の再生像はレンズ上で幅は u' の像として観察される。なお、視点からレンズ中心までの距離を L とし、レンズ中心から表示画像までの距離を L_i 、レンズ中心から理想な表示面までの距離を L_0 とする。よって、視点 V とレンズピッチ AB から構成された $\triangle VAB$ 、視点 V と理想な表示面 Plane_0 から構成された $\triangle VCD$ の相似関係から、次式が求まる。

$$P_0 = \frac{L + L_0}{L} \times u \quad (4.5)$$

また、レンズ中心 O と虚像面 Plane_i から構成された $\triangle OEF$ 、レンズ中心 O と理想な表示面 Plane_0 から構成された $\triangle OCD$ の相似関係から、次式が求まる。

$$P_i = \frac{L_i}{L_0} \times P_0 \quad (4.6)$$

さらに、 $\triangle VA'B'$ と $\triangle VEF$ の相似関係から、 u' を求めることができる。

$$u' = \frac{L}{L + L_i} \times P_i \quad (4.7)$$

式(4.5)と(4.6)を式(4.7)に代入して整理すると、

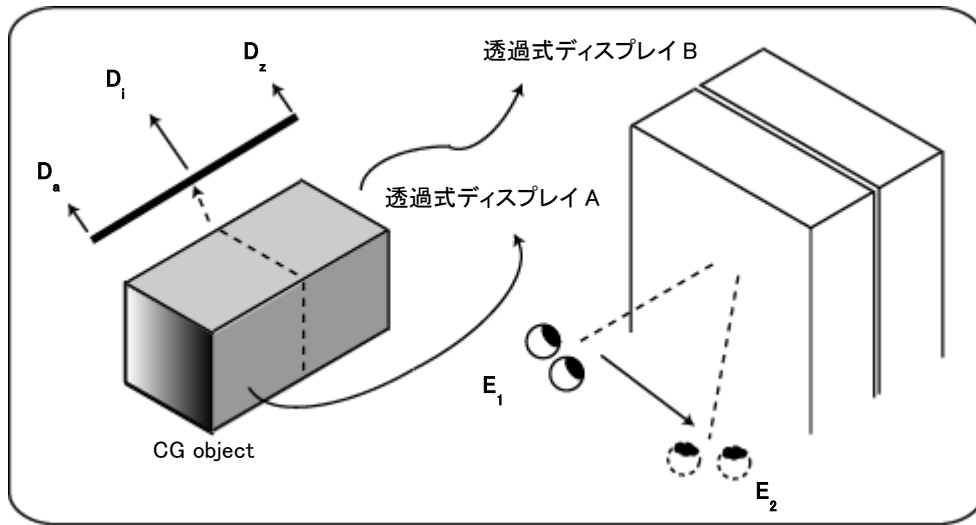
$$u' = \frac{L + L_0}{L + L_i} \times \frac{L_i}{L_0} \times u \quad (4.8)$$

レンズ端でのずれは、 u と u' の差で求めることができるため、以下の式で表すことができる。

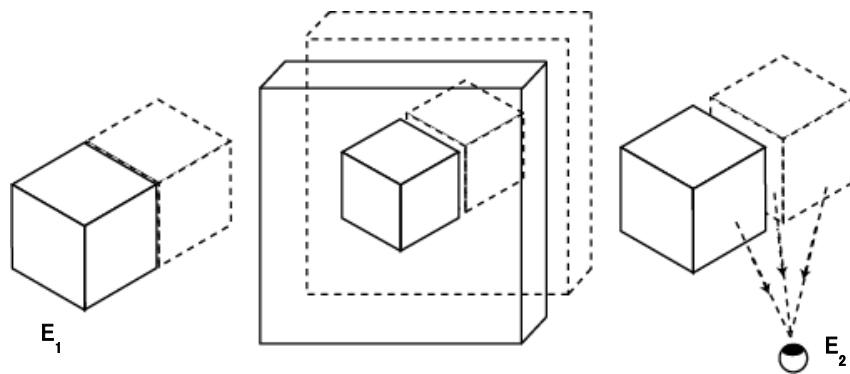
$$\frac{u - u'}{2} = \left(1 - \frac{L + L_0}{L + L_i} \times \frac{L_i}{L_0} \right) \times \frac{u}{2} \quad (4.9)$$

これによって、レンズ端における光線のずれによって発生する立体像の崩れを定量的に表すことができる。この誤差が 0 に近い範囲を一つの領域として表示することにより、表示する立体画像に対して領域分割を行うことができ、有限の表示枚数でもより質の高い立体画像を表示することができる。

4.2.4 透過式ディスプレイによる表示深度の繋ぎ合わせ



(a) 分割した立体画像をそれぞれの透過式ディスプレイで表示する



(b) 観察視点によって観察される途切れる表示画像

Fig. 4.6 立体画像表示深度が途切れる原因

Fig. 4.6 (a) に示したように、CG 物体の深度は、 D_a から D_z までであるとし、 D_i で分割すると、CG 物体が $D_a \sim D_i$ と $D_i \sim D_z$ の二つの領域として分割されることになる。領域 1 ($D_a \sim D_i$) を透過式ディスプレイ A で表示し、領域 2 ($D_i \sim D_z$) を透過式ディスプレイ B で表示することができる。

視点位置 E_1 から視点位置 E_2 に移動すると、透過式ディスプレイに対して斜め方向から観察することになるため、Fig. 4.6 (b) のように CG 物体が途切れてしまう。これは、深度 D_i で領域を分割したため、分割された二つの領域の深度は互いに重ならないため、左右に視点位置を移動した場合、領域画像の接続する境目において、分割された二つの領域が連続せず、途切れているように観察されるからである。

この問題を解決するために、領域分割を行う際に、各領域がある程度重なるように表示することで解決できるが、各ディスプレイで表示した際に同じ領域が表示され、表示物体の色が濃くなってしまいう問題がある。本章では、各領域画像が重なる部分に対して徐々に明度を変化させて明度に対してグラデーションすることによって、画像が重なっても均一の色で表示することを可能にする。

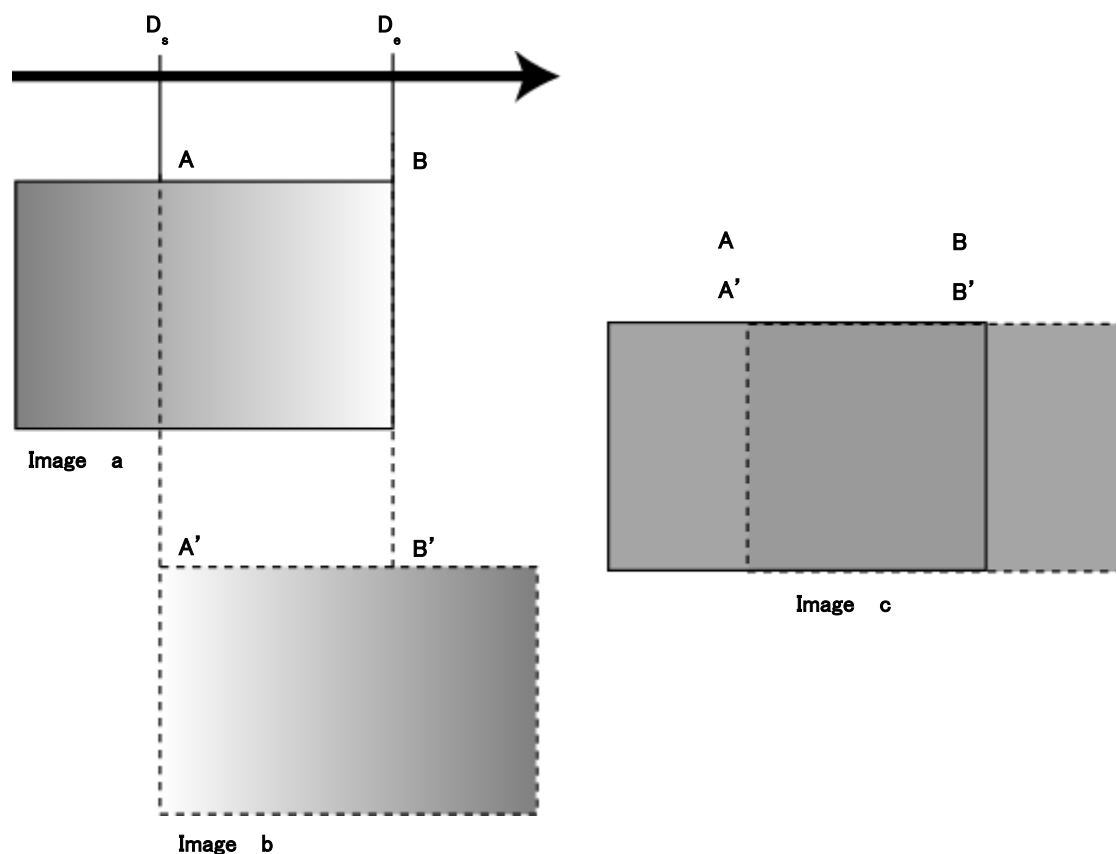


Fig. 4.7 グラデーションの原理

具体的には、Fig. 4.7のように領域1の画像をImage a、領域2の画像をImage bとし、領域1の画像における重複領域をAB、領域2の画像における重複領域をA'B'とする。AとA'、BとB'がそれぞれ対応する深度は D_s と D_o とする。

領域ABの画像に対して、AからBまで元の明度から白までグラデーションし、領域A'B'に対して、A'からB'まで白から元の明度までグラデーションを行う。その後、領域画像ABとA'B'を重ねると、Image cのように表示する画像が同じ色にすることができる。これによって、領域が重複しても観察画像の色が濃くなることなく、領域画像の境目では画像がつながり、連続した立体画像の表示ができる。

また、グラデーション処理を行う際に、表示画像に対して RGB 表色系から HLS 表色系に変換し、明度 L (Lightness) のみを変化させることでグラデーションを実現する。なお、明度に関する計算において、元の色の明度から白(255) まで変化させるケース(Case 1) と白(255) から元の色の明度まで変化させるケース(Case 2) が存在する。次式を用いて、グラデーション値を算出することができる。

$$G_i = L_i + \frac{255}{|D_s - D_e|} \quad \text{Case 1} \quad (4.10)$$

$$G_i = 255 - \frac{255 - L_i}{|D_s - D_e|} \quad \text{Case 2} \quad (4.11)$$

ただし、 G_i は新たに算出される明度値であり、 L_i は元の明度値であり、 D_s と D_e は、グラデーションの開始位置とグラデーションの終了位置に相当する奥行き値である。

4.3 実験及び考察

4.3.1 CG 物体の撮影モデル

CG 物体の作成及び撮影はレイトレーシングソフト POV-Ray を用いて行う。また、CG 物体の撮影は、Fig. 4.8 に示すような凸ミラーアレイを使った撮影モデルを用いて行う。

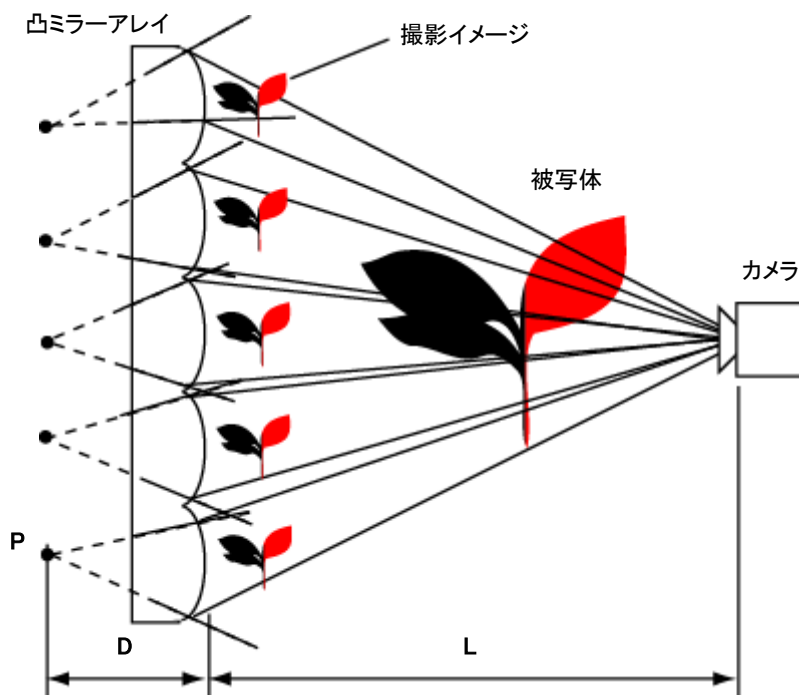


Fig. 4.8 凸ミラーアレイも使った撮影モデル

Fig. 4.8 のように、凸ミラーアレイを用いることで、凸ミラーアレイに写った被写体の正立像を撮影することができる。レンズによる屈折が起こらないため、歪まない画像を得ることができる。撮影像を表示する際に、凸ミラーアレイによるカメラ像 P に相当する位置に凸レンズアレイを置けばよい。しかし、現実の装置で Fig. 4.8 のように撮影するとき、カメラと凸ミラーアレイの間に被写体が存在するため、撮影は困難である。

POV-Ray では、CG 物体に `no_image` 属性を指定し、直接カメラに写らないようにすることができる。この CG 物体は凸ミラーに反射した像がうつるため、被写体の全てを `no_image` 属性にすることで被写体を写すことなく、この撮影モデルを使用することができる。また、凸ミラーアレイには `no_shadow` と `no_reflection` 属性を指定し、被写体への影や映り込みを防止する。

4.3.2 深度画像による領域分割

上記の撮影モデルで得られた画像を、奥行きに応じて領域分割を行うが、任意の奥行きで領域分割を可能にするために、撮影時に領域分割して撮影するのではなく、撮影画像から切り出す方法を考える。撮影した画像に対して、奥行きに応じて領域数を任意に分割可能にするために、画像の深度を数値化する。そのため、0 から 255 まで変化する輝度画像を用いて深度を表し、深度画像を作成していく。

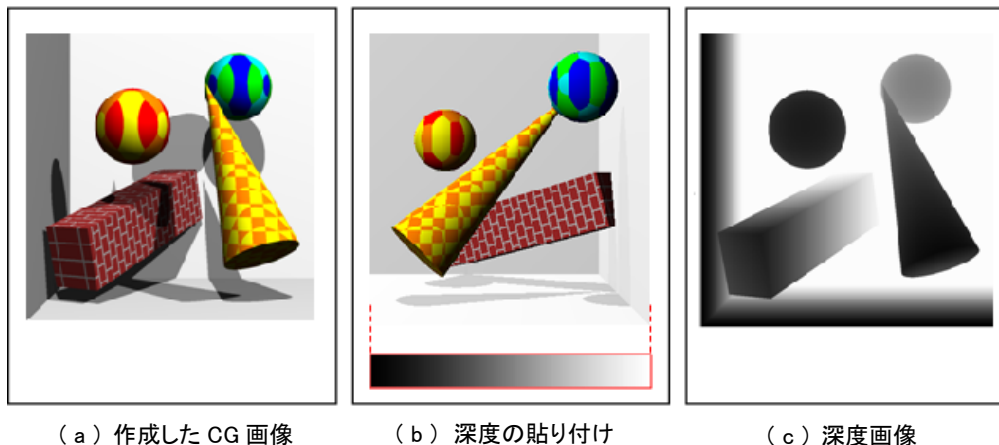


Fig. 4.9 深度画像の作成

Fig. 4.9 (a) は CG 画像であり、元画像を横から撮影した画像が Fig. 4.9 (b) になり、0 から 255 まで変化する輝度画像を全ての CG 物体に貼り付けることによって Fig. 4.9 (c) のような深度画像を作成することができる。なお、奥行きは手前であるほど輝度値が 0 に近づき、奥であるほど輝度値が 255 に近づくように輝度値を割り当てていく。これによって、元画像と深度画像を用いて任意の奥行きに分割することが可能である。例えば、輝度値は 27~51 までの領域を 1 層目とし、51~109 までの領域を 2 層目とし、109~231 までの領域を 3 層目として分割すると、Fig. 4.10 に示すような分割画像が得られる。

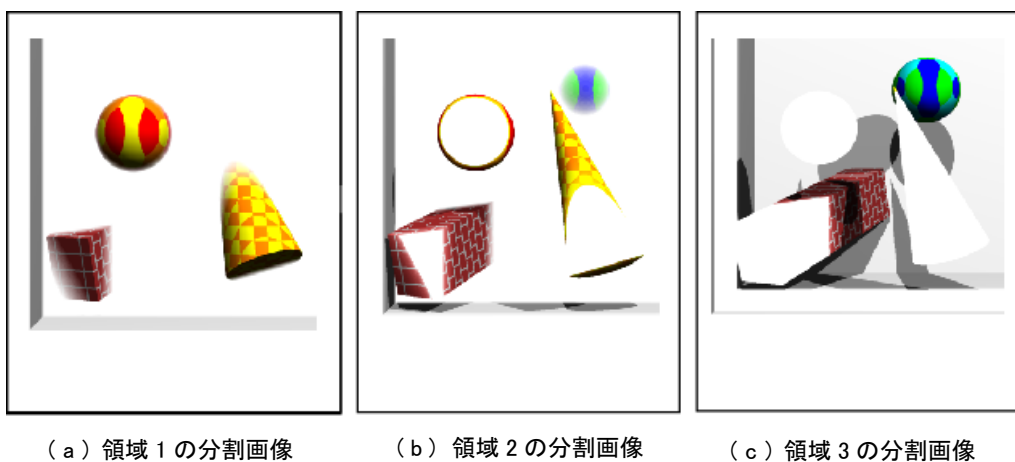
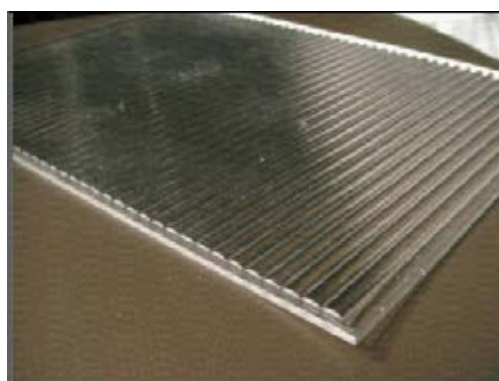


Fig. 4.10 領域分割画像の一例

4.3.3 試作システムの配置

提案手法の有効性を確認するため、Fig. 4.11 に示すようなレンチキュラーレンズ、透過式ディスプレイと iPad ディスプレイを用いて実験システムを試作した。なお、検証実験では作成した CG 画像を 3 領域に分割してから表示を行うため、2 枚の透過式ディスプレイと 1 枚の iPad ディスプレイを使用する。なお、試作システムで使用する各 부품のスペックを Table 4.1 に示す。



(a) レンチキュラーレンズ



(b) 透過式ディスプレイ



(c) iPad ディスプレイ

Fig. 4.11 試作システムのパーツ

Table 4.1 試作システムの構成パーツ及び仕様

構成パーツ	仕様
レンチキュラーレンズ	外形寸法: 330(幅) × 248(高) × 2.3(奥) mm レンズピッチ: 7.55 mm 焦点距離: 14.8 mm 屈折率: 1.49
透過式ディスプレイ	表示領域: 473.76(幅) × 296.1(高) mm 解像度: 1920(横) × 1080(縦) pixels 透過率: 15%
iPad ディスプレイ	外形寸法: 185.7(幅) × 241.2(高) × 9.4(奥) mm 解像度: 2048(横) × 1536(縦) pixels 画素ピッチ: 0.096 mm

試作システムによる立体表示実験では、Fig. 4.12 に示すように、分割した領域 1 の画像 (以後:1 層目画像) を透過式ディスプレイ A で表示し、分割した領域 2 の画像(以後:2 層目画像) を透過式ディスプレイ B で表示し、分割した領域 3 の画像(以後:3 層目画像) を iPad ディ스플레이で表示する。

レンチキュラーレンズから透過式ディスプレイ A までの距離を d_1 とし、レンチキュラーレンズから透過式ディスプレイ B までの距離を d_2 とし、レンチキュラーレンズから iPad ディ스플레이までの距離を d_3 とし、観察視点 E からレンチキュラーレンズまでの距離を D とする。これらのパラメータを Table 4.2 に示す。

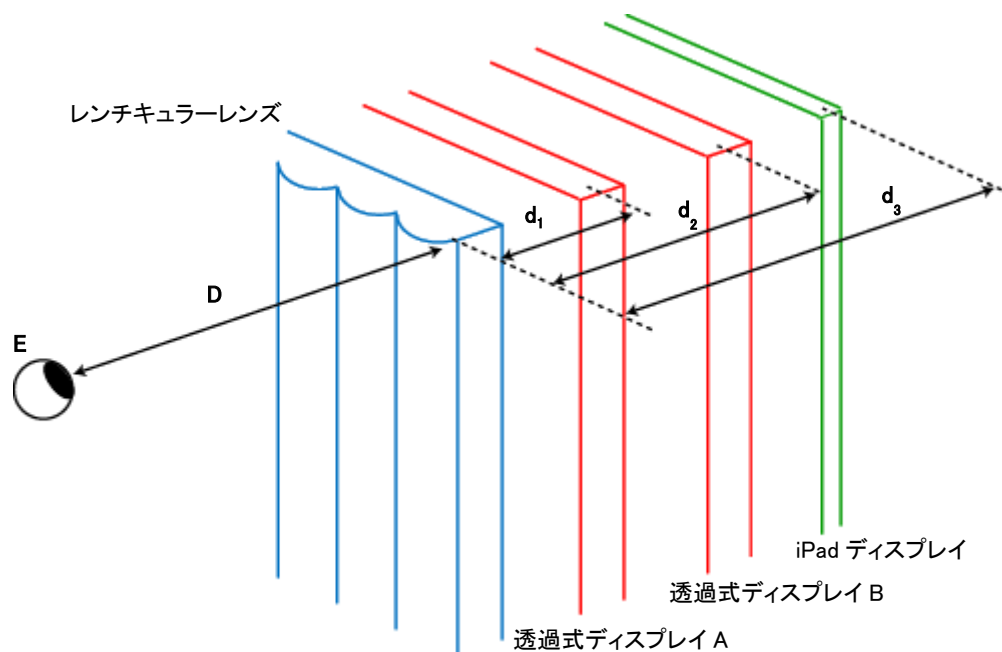


Fig. 4.12 試作システムの配置図

Table 4.2 レンズ・表示ディスプレイ間の距離(mm)

D	500
d_1	5
d_2	11
d_3	14.6

4.2.2 節では、2 枚の透過式ディスプレイを回転して配置する必要があると述べたが、回転角 θ について式(4.4) を用いて算出できる。その値を Table 4.3 に示す。なお、式(4.4) において $P_1 = 0.282 \text{ mm}$ であり、 P_2 は式(4.2) により、 0.27 mm と求められる。

Table 4.3 回転角 θ の値

n	2	3	4	5
$\theta (^{\circ})$	58.5	69.6	74.9	78.0

透過式ディスプレイ A を回転させ、画素ピッチが透過式ディスプレイ B の画素ピッチの整数倍になったとき、モアレが生じない。Table 4.3 の結果から、透過式ディスプレイ A の画素ピッチが透過式ディスプレイ B の画素ピッチの 2 倍、3 倍、4 倍、5 倍になったとき、それぞれの回転角は 58.5° 、 69.6° 、 74.9° 、 78.0° である。また、Fig. 4.13 にそれらの回転角度で撮影した観察画像を示す。

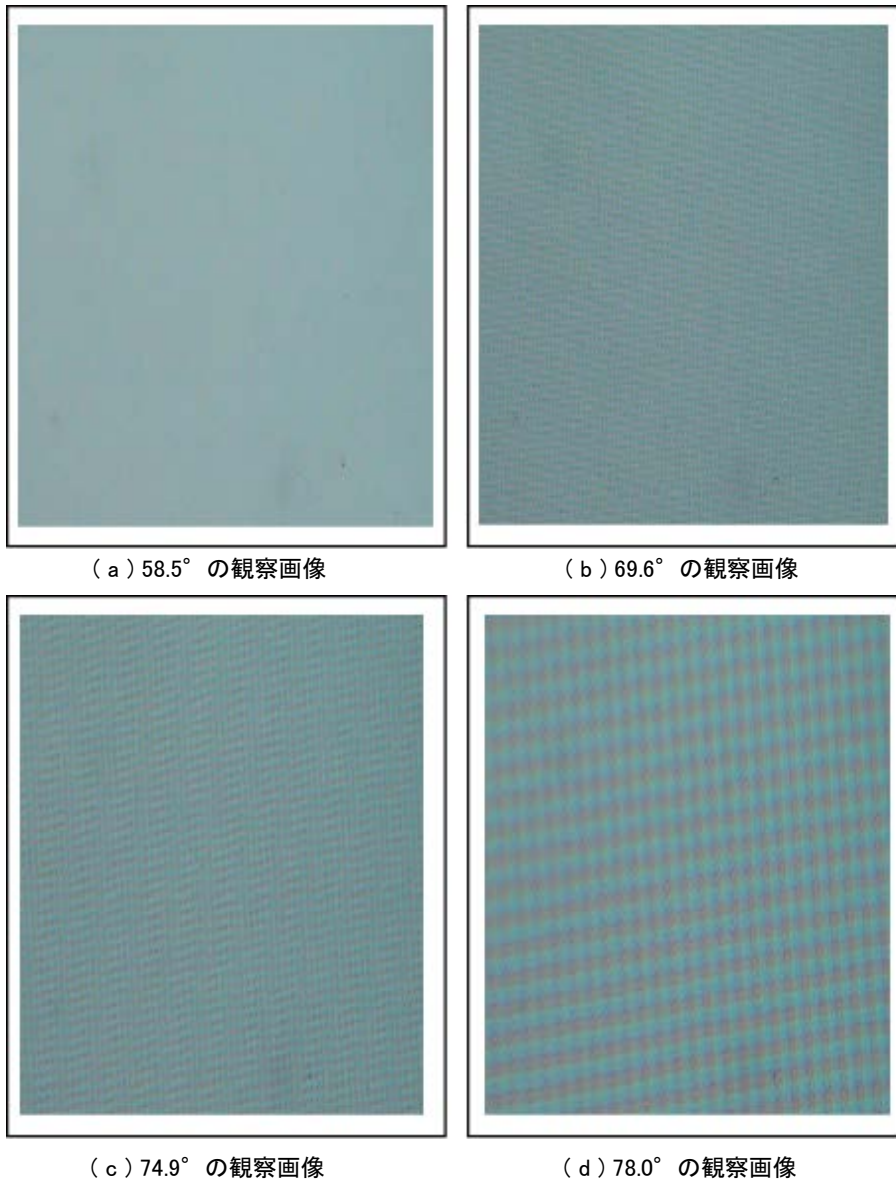


Fig. 4.13 モアレ除去の実験画像

Fig. 4.13 の結果画像から、回転角 $\theta = 58.5^\circ$ 以外の場合、色モアレが確認された。そのため、本システムでは2枚の透過式ディスプレイの回転角度を 58.5° に設定して実験を行う。

また、2枚の透過式ディスプレイの透過部と iPad ディスプレイの画素の位置関係によって Fig. 4.14 (a) のような色モアレが生じる場合がある。これは、2枚の透過式ディスプレイの透過部から iPad ディスプレイの特定色のサブ画素が観察されるため、縦に並ぶサブ画素のラインは強い色モアレを生じさせる。

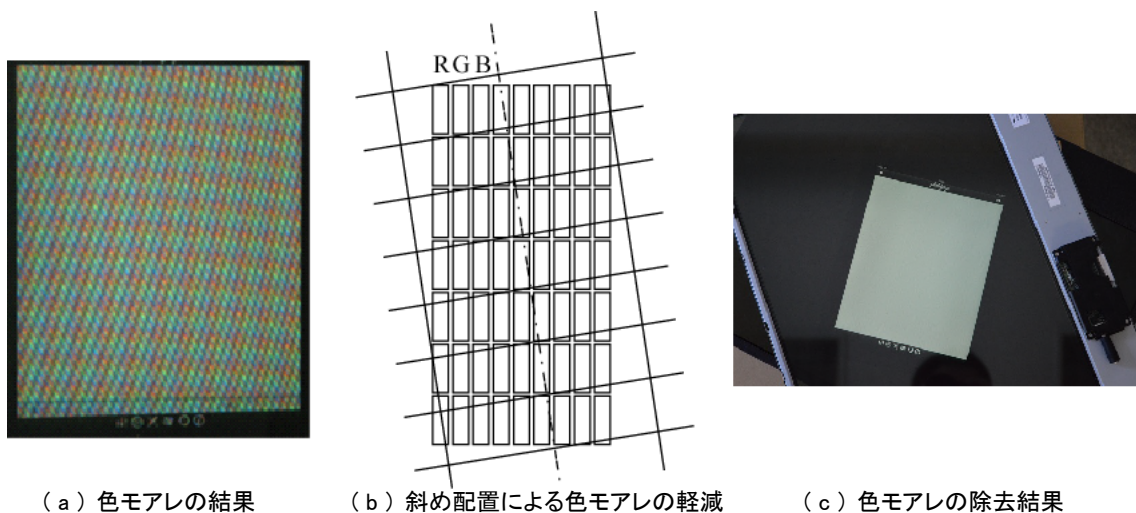


Fig. 4.14 色モアレの軽減について

縦方向に特定色のサブ画素のみを映すことがないようにするために、Fig. 4.14 (b) のように透過部に対して iPad ディスプレイを傾ける。一つの透過部が1サブ画素ずれるように傾けることで、縦の透過部は RGB 三色が交互に並ぶことになり、単色ラインが形成されないので、色モアレを軽減できる。なお、本実験では iPad ディスプレイを2枚の透過式ディスプレイに対して 38° 傾けたとき、Fig. 4.14 (c) のように色モアレが発生しないことが確認できた。

Fig. 4.15 に示すように、光線がレンチキュラーレンズによって屈折されてしまう。屈折しない場合と比べると、観察できる画素幅が異なる。例えば、レンズから透過式ディスプレイまでの距離は d_1 とするが、光線が屈折するため、観察できる画素幅は t' である。しかし、距離は d_1 で光線が屈折発生しない場合、観察できる画素幅は t となるため、光線の屈折が発生しても観察できる幅を t にするために、屈折を考慮したレンズから表示面までの距離 d_1' を算出する必要がある。

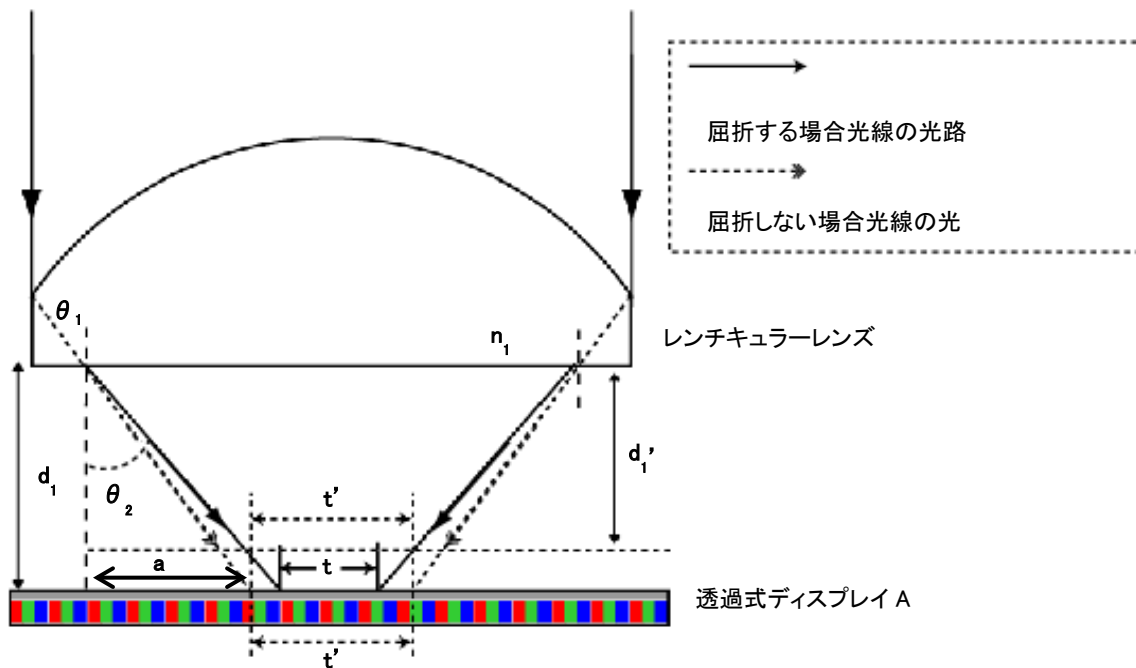


Fig. 4.15 屈折を考慮したレンズ・表示ディスプレイ間の距離計算

$\theta_1 = 14.3^\circ$ であり、Table 4.2 から $d_1 = 5 \text{ mm}$ であるため、次式を用いて a を求められる。

$$a = d_1 \times \tan \theta_1 \quad (4.12)$$

また、スネルの法則を用いて次式により θ_2 を求められる。

$$\theta_2 = \sin^{-1}(n_1 \times \sin \theta_1) \quad (4.13)$$

ここで、 n_1 はアクリルの屈折率 ($n_1 = 1.49$) である。

そして、以下の式により d_1' を求めることができる。

$$d_1' = \frac{a}{\tan \theta_2} \quad (4.14)$$

同様な方法で、屈折を考慮したレンズから透過式ディスプレイ B と iPad ディスプレイまでの距離 d_2' 、 d_3' も計算することができる。

d_1' 、 d_2' 、 d_3' を得られた後、これらの値を用いて 4.2.3 節で説明したようにレンズから表示ディスプレイまでの距離における光線のずれの誤差が 0 に近い領域を一つの領域画像として分割する。その際に、各領域画像において表示できる奥行き範囲が d_1' 、 d_2' 、 d_3' によって決まる。これらの結果を Table 4.4 に示す。なお、領域画像の切り出しは、深度画像を用いて行うため、奥行きに対応する深度の値（輝度値）も Table 4.4 に示す。

Table 4.4 領域の重なりがない場合の分割用値

屈折を考慮した距離(mm)	奥行き範囲(mm)	分割用輝度値
$d_1' = 3.22$	40~65	0~25
$d_2' = 7.08$	65~90	25~50
$d_3' = 9.40$	90~290	50~250

Table 4.4 の結果から、分割された奥行きの範囲における重なりが 65 mm と 90 mm のみであるため、4.2.4 節で述べたように左右に視点を移動して観察する際に、立体像が途切れて観察される可能性がある。

そこで、Table 4.5 に示したようなデータで表示できる奥行きの範囲が重なるようにした。

Table 4.5 領域の重なりがある場合の分割用値

分割領域	奥行き範囲(mm)	分割用輝度値
領域 1	40~75	0~35
領域 2	55~100	15~60
領域 3	80~290	40~250

これにより、領域 1 と領域 2 の間では、55 mm ~75 mm の範囲で重なるようになり、領域 2 と領域 3 の間では、80 mm ~100 mm の範囲で重なるようになった。

4.3.4 領域分割による立体表示

上記の計算結果により、作成した CG 画像に対して 3 領域に分割して立体表示の実験を行った。元画像と分割した各層の画像を Fig. 4.16 に示す。なお、分割した画像はグラデーション処理を行った画像である。

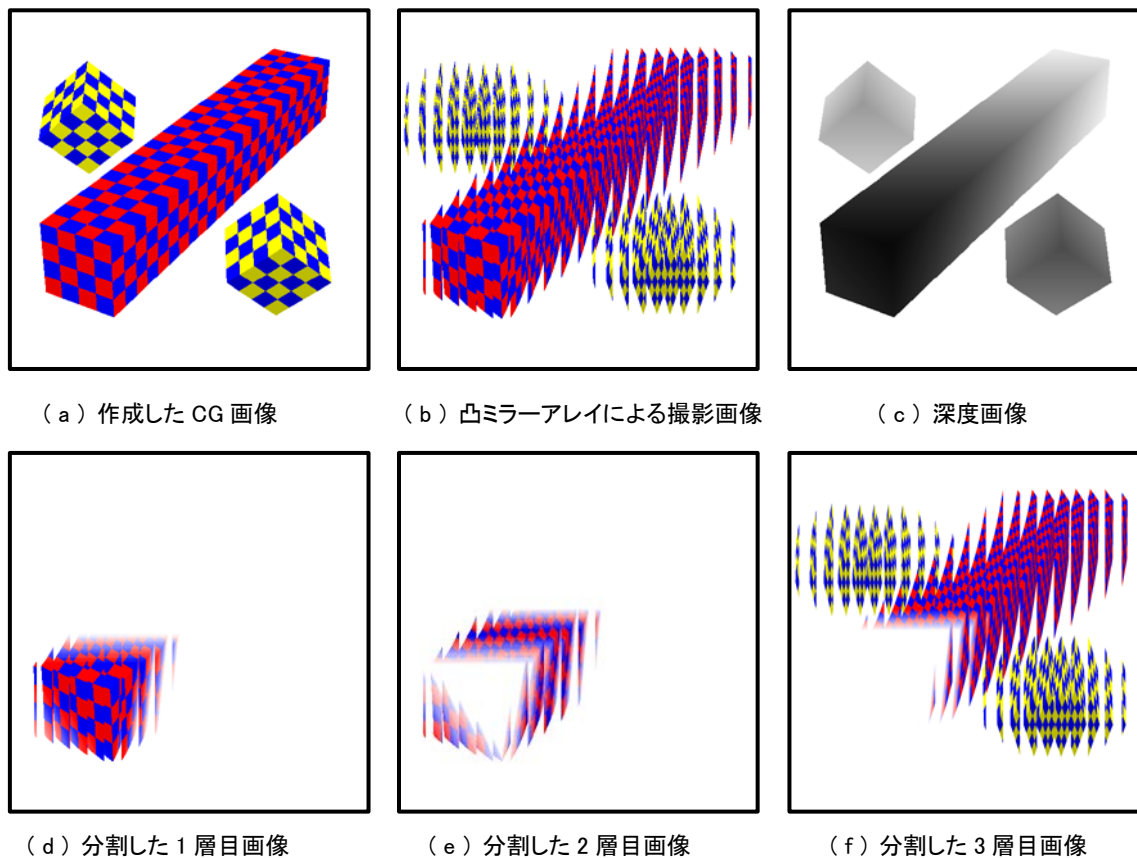


Fig. 4.16 検証実験用各画像

Fig. 4.16 (a) はオリジナル CG 画像であり、(b) は凸ミラーアレイによって撮影した画像であり、(b) の深度画像を (c) に示す。また、Table 4.5 に従って分割した 1 層目の領域画像を (d) に、2 層目の領域画像を (e) に、3 層目の領域画像を (f) に示す。

1 層目、2 層目、3 層目の領域画像を透過式ディスプレイ A、透過式ディスプレイ B と iPad ディスプレイによって表示する。各分割された領域画像から、各画像においてグラデーションが施されたことがわかる。また、1 層目と 2 層目、2 層目と 3 層目の間において表示領域が重なっていることも確認できる。なお、実際に観察された立体画像を Fig. 4.17 に示す。

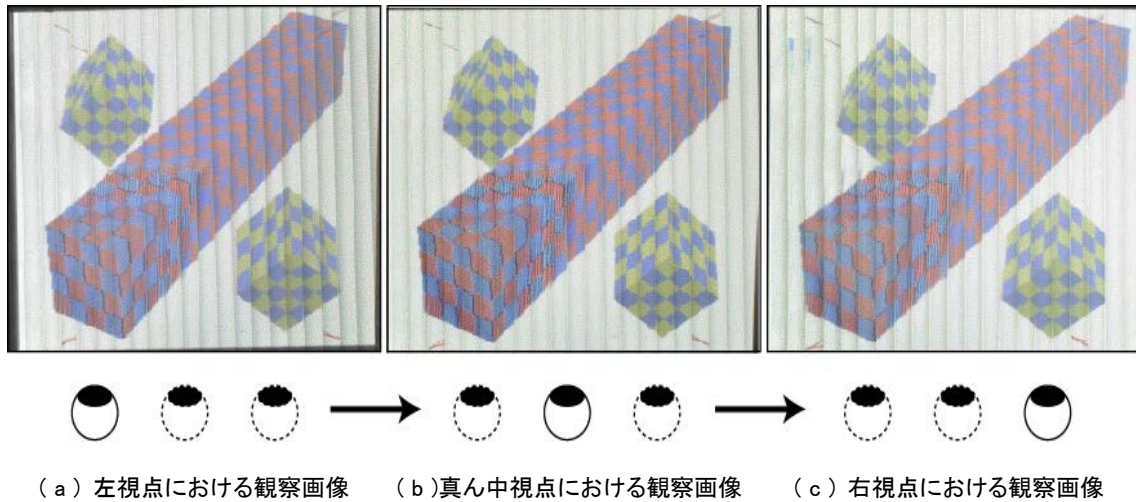


Fig. 4.17 提案手法による実験結果画像

Fig. 4.17 (a) は左の視点から観察した画像であり、(b) は真ん中の視点から観察した画像であり、(c) は右の視点から観察した画像である。表示した物体が観察視点の移動につれ徐々に変化していることが観察できたため、視差を有することが分かる。

比較するために、領域画像においてグラデーション処理を行わない場合の観察画像を Fig. 4.18 に示す。

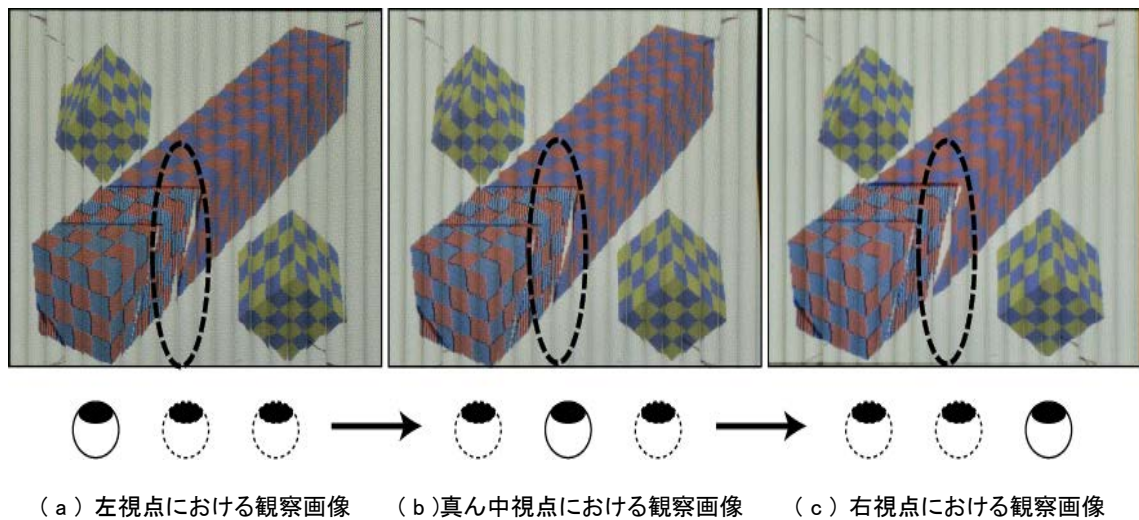


Fig. 4.18 グラデーションなしの場合の実験結果画像

Fig. 4.18 は表 Table 4.4 に示した奥行きデータに従って分割した画像である。分割の終了点と開始点 (Table 4.4 に示す 65 mm、90 mm) が重なるため、各ディスプレイで表示した

際に、同じ領域が表示され、色が濃くなってしまった。また、重なる領域がわずかであるため、左右に視点を移動した場合、各領域画像の接続する境目では、立体画像が途切れているように観察された。

これに対して、提案手法による結果画像における立体画像の色が滑らかに変化していることが観察できた。なお、左右に視点を動かした場合、各領域画像の境目では画像が途切れることなく、滑らかな立体表示ができることも確認された。

4.3.5 奥行きに関する考察

提案手法によって得られた結果画像と領域分割なしで得られた結果画像が表現できる奥行きを比較するために、領域分割なしの場合の立体表示実験を行い、実験結果を Fig. 4.19 に示す。

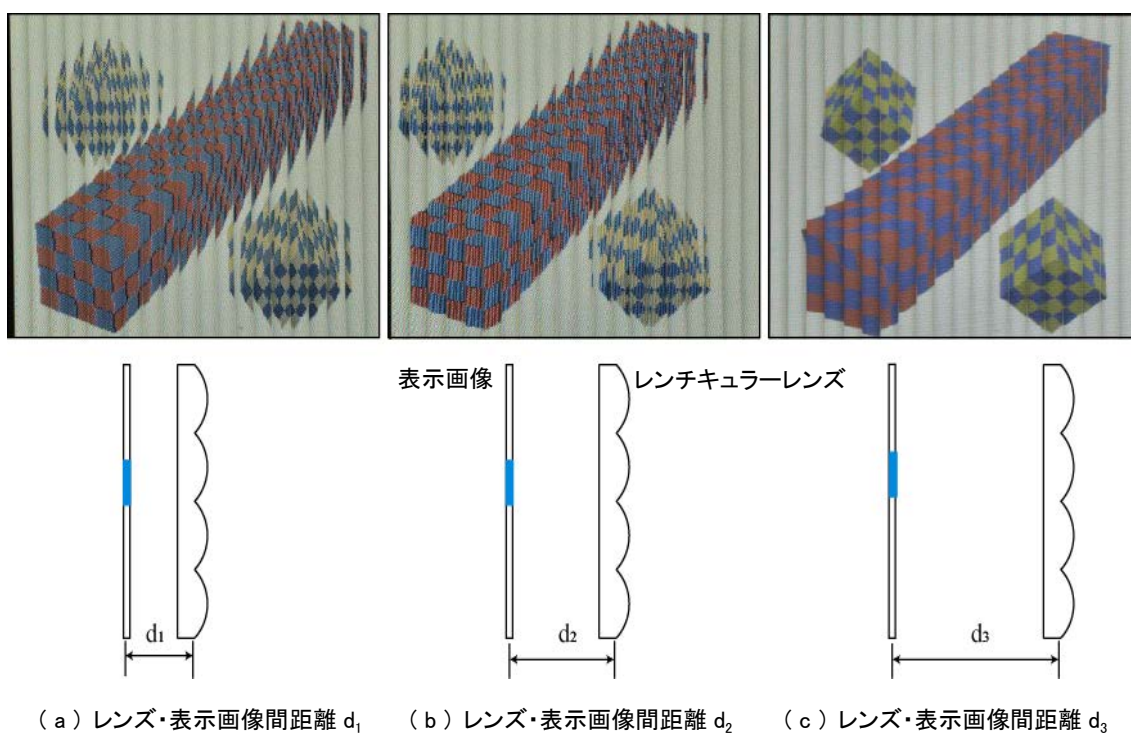


Fig. 4.19 領域分割なしの結果画像

Fig. 4.19 (a) はレンチキュラーレンズと表示画像間の距離 = d_1 における観察画像であり、(b) はレンチキュラーレンズと表示画像間の距離 = d_2 における観察画像であり、(c) はレンチキュラーレンズと表示画像間の距離 = d_3 における観察画像である。Fig. 4.19 のいずれの画像においても、虚像面は一つしかないため、対応した虚像面以外で表示された立体像が崩れてしまい、奥行きが深い立体表示ができない。

これに対して、提案手法を用いて立体表示を行った結果、Fig. 4.17 では手前、真ん中、奥の各領域において立体像が崩れることなく、滑らかな立体表示ができることが確認できる。なお、これらの結果画像が表現できる奥行きを Fig. 4.20 に示す。

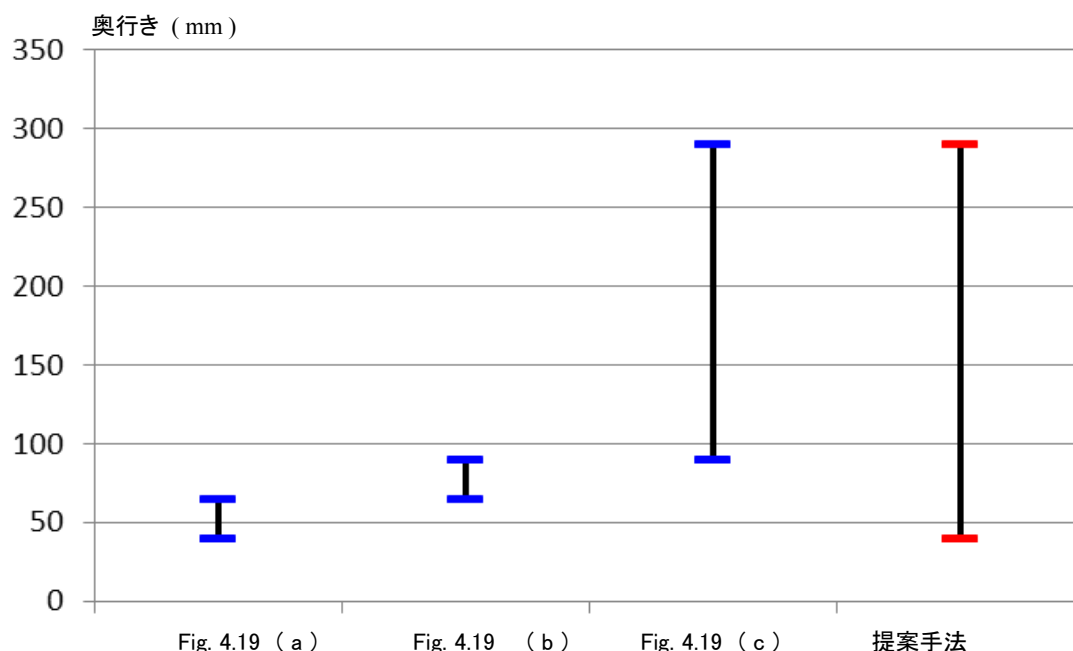


Fig. 4.20 奥行きに関する評価グラフ

Fig. 4.20 から、Fig. 4.19 (a) のようにレンズと表示画像間の距離は d_1 場合、奥行きが 40 mm ~ 65 mm において立体表示ができるが、それ以外の奥行きで表示される立体像が崩れてしまい、立体表示ができない。同様に Fig. 4.19 (b) では奥行きが 65 mm ~ 90 mm の間、Fig. 4.19 (c) では奥行きが 90 mm ~ 290 mm の間において立体表示ができるが、それ以外で表示される立体像が崩れてしまう。

これに対して、提案手法によって得られた結果画像では奥行きが 40 mm ~ 290 mm までであり、表示される立体像は崩れることなく、滑らかな立体表示ができるため、領域分割を行わない場合よりも深い奥行きの表現ができることが確認された。

本実験では、領域分割を 3 層にして検証実験を行ったが、3 層の場合における表現できる奥行きの範囲に関する検討が必要である。実験システムにおいて、レンチキュラーレンズから 3 層目の iPad ディスプレイまでの距離は $d_3 = 14.6$ mm であるため、次式を用いて理論的 $d_3 = 14.6$ mm の場合では表現できる立体像までの距離 L_i を求められる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{L_i} \quad (4.15)$$

ここで、 f はレンチキュラーレンズの焦点距離であり、 d はレンチキュラーレンズから表示物体までの距離であり、 L_i はレンチキュラーレンズから再生した立体像までの距離である。

そのため、理論上では $d_3 = 14.6 \text{ mm}$ の場合、 $L_i = 1080 \text{ mm}$ と求められる。すなわち、iPad ディスプレイで3層目を表示した際に、表現できる奥行きは 1080 mm である。そこで、Pov-Ray を用いて作成した CG 物体を 1080 mm に設置して観察実験を行った。実験結果を Fig. 4.21 (a) に示す。

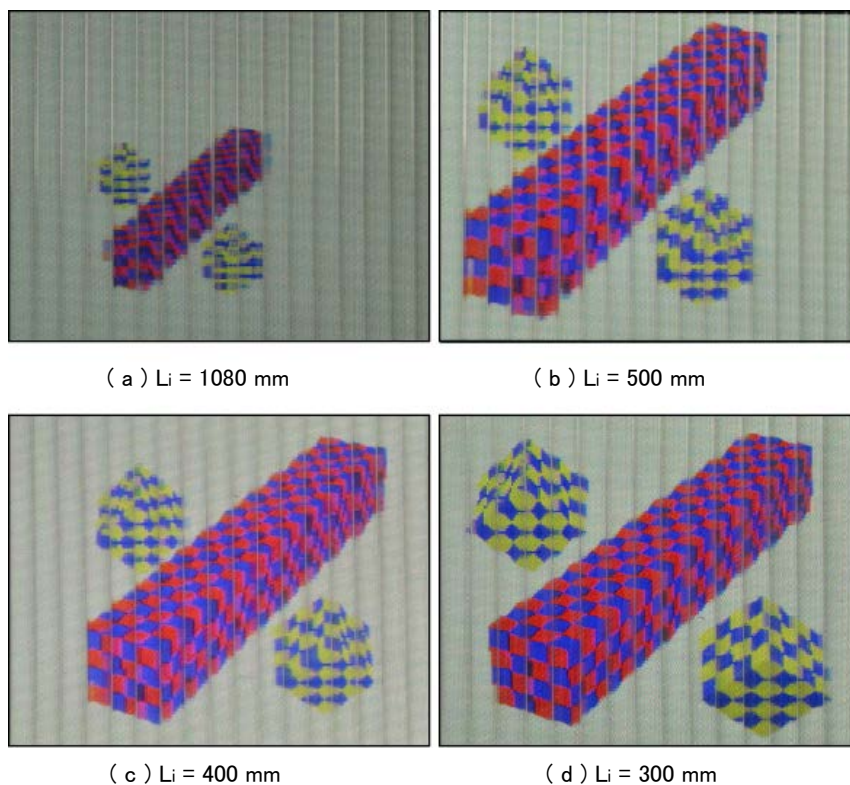


Fig. 4.21 表現できる奥行きの範囲に関する実験結果

Fig. 4.21 (a) の実験結果画像から、観察画像はぼけており、立体観察はできないことが確認された。その理由として、本実験で使用するレンチキュラーレンズのレンズピッチは 7.55 mm であり、使用する iPad ディスプレイの画素ピッチは 0.096 mm であるため、表示する立体像が遠いほどレンチキュラーレンズを通して観察される画素数が減っていく。よって、表示する画素数が少ないため、立体像がぼけて観察することができない。

また、 $L_i = 500 \text{ mm}$ から 100 mm 刻みで $L_i = 500 \text{ mm}$ 、 400 mm 、 300 mm の場合における観察実験を行い、観察した結果画像を Fig. 4.21 (b)、Fig. 4.21 (c)、Fig. 4.21 (d) に示す。実験結果画像から、 $L_i = 500 \text{ mm}$ と $L_i = 400 \text{ mm}$ において表示する画像による立体観察ができないことが確認された。それに対して、 $L_i = 300 \text{ mm}$ の場合、表示する立体像のエッジが滑らかで立体観察ができることから、提案システムを用いて3層による領域分割実験では、表現できる立体像の奥行きの範囲は $0 \sim 300 \text{ mm}$ であることが確認された。

4.4 結論

本章では、複数の透過式ディスプレイを用いた奥行きの高い裸眼立体表示システムを提案した。

提案手法では、異なる奥行きを持つ立体画像に対してそれぞれの奥行きに対応した距離で表示画像の領域を分割し、表示することによって、レンズ・表示画像間距離に対応した奥行き以外の立体像の崩れを軽減することができ、滑らかな立体表示を実現できた。また、透過式ディスプレイを用いてシステムを構築する際に生じるモアレについて、透過式ディスプレイを回転させ、2枚の透過式ディスプレイの画素ピッチを整数倍関係にすることによって除去することができた。領域分割を行う際に、表示する立体画像を滑らかにつなぐために、分割した各領域においてグラデーション処理を行うことも考案した。これにより表示する立体像が途切れないで観察することができた。

提案手法の有効性を確認するために、2枚の透過式ディスプレイと1枚のiPadディスプレイを用いて実験システムを試作した。検証実験では、表示する立体画像の領域を3層として分割させ、1層目と2層目の領域画像を透過式ディスプレイで表示し、3層目の領域画像をiPadディスプレイで表示した。実験の結果から、3層化の場合は、再生した立体像の崩れを軽減できることを確認した。また、領域分割を行わない場合との比較実験により、提案手法を用いることで表現できる奥行きが深くなることも確認できた。

第5章 本研究の総括

遠隔地の情景を、距離感を含めてまるで視覚的にユーザに提示する技術を求められている。遠隔地の風景や情報をユーザに提示する際に、まるでユーザ自身がその場所にいるかのような没入感覚を与える技術であるテレプレゼンスに関する研究が盛んに行われている。

ユーザは自由な見回しができるようにするために、遠隔地の情報を取得する際に、より広範囲の情報を取得する必要がある。距離感を伴った没入感覚を与えるために、立体視という要素も不可欠である。これらの要求は、全方位3次元自由視点画像の生成及び表示によって満たされる。

全方位自由視点画像を生成するために、様々手法が提案されているが、撮影システムが複雑である問題や生成した視点画像にオクルージョンが生じる問題があった。また、多視点の視差画像を用いて立体表示を行う際に、レンチキュラーレンズ方式が既存デバイスとの整合性が良く、最も実用化が進んでいるが、1つの虚像面で立体像を表示するため、対応する虚像面以外の立体像が劣化して奥行きが深い立体表示が困難である。

上記の問題を解決するために、本論文の第2章では、新たな全方位3次元自由視点立体画像を生成する方法を提案した上に、第3章においてより高精度な自由視点立体画像を生成するために、スケーリング補間を用いた方法を提案した。さらに、リアルな奥行き感を得るために、第4章では透過式ディスプレイを用いた裸眼立体表示システムを提案した。

第2章においては、1台のカメラと1枚の回転ミラーを用いて自由視点立体画像生成手法を提案した。提案手法は、以下の特徴を有する。

- 1台のカメラと1枚のミラーのみ使用するため、システムの構成がシンプルである。
- カメラを動かさず、回転ミラーのみを動かして画像撮影を行うため、カメラの振動による撮影画像間の誤差が生じない。
- 輻輳角が自由に変えることができるため、奥行きが深い自由視点画像の生成は可能である。

これにより、シンプルな構成で、かつずれやオクルージョンの少ない全方位自由視点立体画像の作成を可能にした。全方位画像撮影システムを用いて全方位自由視点立体画像の検証実験を行った結果、全方位のフレーム画像が得られ、得られた画像から自由視点立体画像を生成できることが確認された。さらに、得られた2枚の視差画像による立体視は可能であることも確認された。また、自由視点画像を生成する際に、輻輳角を考慮した画像処理アルゴリズムを考案して実装したことにより、忠実な奥行きを持つ自由視点画像を生成できた。

提案した1台のカメラと1枚の回転ミラーを用いた自由視点立体画像生成システムを用いて自由視点画像を作成する際に、異なる視点で撮影した画像列を用いるため、同一の斜

めエッジでも異なる画像列の中での傾きが異なる。このまま画像列を結合させると、斜めエッジが不連続になり、滑らかでない画像が生成される。

第3章では、上記の問題を解決するために、スケーリング補間を用いた方法を提案した。画像を一方方向に拡大、または縮小すると、画像中のエッジの傾きが変わることを利用して、画像列の中心から水平方向へスケーリングすることによって、エッジの傾きを変える。これにより画像列中にあるエッジの端点を上下方向に移動させ、異なる視点から撮影した画像列中のエッジをつなぎ、滑らかな自由視点画像の生成を可能にした。提案手法は以下のような特徴を有する。

- スケーリング処理だけで、画像列間におけるエッジの不連続の問題を解決でき、滑らかな自由視点画像を生成することができる。
- 撮影する仮想カメラで取得した光線情報に基づいて任意の自由視点画像を生成することができる。
- 生成する視点に応じて必要な画像列で視点画像を再構築するため、オクルージョンが生じない。

第2章と第3章の提案手法により、輻輳角を考慮したため、得られた自由視点立体画像は、ユーザに異なる奥行きを持つ自由視点立体画像を提示することができる。この異なる奥行きを持つ自由視点立体画像を表示するために、第4章においては透過式ディスプレイを用いた奥行きの深い裸眼立体表示システムを提案した。複数枚の透過式ディスプレイを用いて画像を表示することによって、レンズ・表示画像間の距離を複数作成し、それぞれの表示画像に対応した虚像面を生成することができる。これにより、異なる奥行きを持つ立体画像に対してそれぞれの奥行きに対応した虚像面で画像が正しく再生されるため、立体像が劣化せずに奥行きの深い立体表示を可能にした。提案手法は以下のような特徴を有する。

- レンズを動かす駆動部を必要としないため、振動や騒音などの問題が生じない。
- 複数枚の透過式ディスプレイを用いることで多層な立体画像を表示することができる。
- 疎なレンチキュラーレンズと組み合わせることで、奥行きの深い立体動画表示システムが実現可能である。

2枚の透過式ディスプレイと1枚のiPadディスプレイを用いて実験システムを試作した。表示する立体画像を3層として分割して立体表示を行った結果、表示する立体像が崩れることなく、滑らかに表示できることが確認された。定量評価の結果から、従来よりも奥行きの深い裸眼立体表示ができることが確認された。

これらのことから、本研究は、臨場感が豊かな全方位自由視点画像の生成及び奥行きの深い裸眼立体表示に関して独創的かつ実用性に富んだ方式を与えた。

謝辞

本論文は筆者が東京都市大学工学研究科システム情報工学専攻の博士課程前期及び後期課程（2009年～2014年）に在学中に、視覚メディア研究室にて行った研究についてもとめたものであります。

本論文をまとめるにあたり、終始懇切なる御指導御教示を賜りました東京都市大学工学研究科の包躍教授に心から深く感謝申し上げます。大学学部時代から含め6年間、画像処理に関する知識、原理をはじめ、動画表示や立体ディスプレイに関する知識など多岐に渡る分野において、厳しくも丁寧に御指導いただきました。また、研究を進めるにあたり、学術論文の作成や国際学会への参加など貴重な体験もさせていただいたことで、私の研究者としての心構えや考え方についても賜りました。

また、自由視点立体画像撮影に関する研究の機会をくださった富山県立大学工学部中田崇行先生に、日頃から心温かい御支援を賜り、数多くの御助言を頂き、ここに深く御礼申し上げます。

研究を進めるにあたり、東京都市大学メディア情報学部情報システム学科藤井哲郎教授、工学研究科システム情報工学専攻の金川秀也教授、山本尚生教授、森博彦教授には御多忙にもかかわらず御指導や有益な助言を頂き、深く御礼申し上げます。

大学院に進学後、生活のみならず様々な面で御支援して頂いた公益財団法人とうきゅう留学生奨学生財団の皆様にも心より感謝を申し上げます。

また、自由視点立体画像の撮影に関する研究をはじめ、画像処理、立体動画表示などに関する研究を共に、行ってきた視覚メディア研究室の皆様にも深く感謝いたします。毎週欠かさずのゼミにおける様々な意見を交換することで、新たな発見なども多く学ぶことができました。

最後に、今までずっと私を支えてきた家族に感謝の意を表します。本当に、ありがとうございました。

参考文献

- 1) S.Moezzi, Ed. : Special issue on immersive telepresence, IEEE MultiMedia, Vol.4, No.1, pp.17-56 (1997)
- 2) 山澤一誠, 尾上良雄, 横矢直和, 竹村治雄 : 全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.81, No.5, pp.880-887 (1998)
- 3) S. Ikeda, T. Sato, M. Kanbara, and N. Yokoya : Immersive telepresence system using high-resolution omnidirectional movies and a locomotion interface, Proc. SPIE Electronic Imaging, 5291 (2004)
- 4) 池田聖, 佐藤智和, 横矢直和 : 全方位型マルチカメラシステムを用いた高解像度な全天球パノラマ動画の生成とテレプレゼンスへの応用, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.443-450 (2003)
- 5) 山澤一誠, 石川智也, 中村豊, 藤川和利, 横矢直和, 砂原秀樹 : Web ブラウザと全方位動画をを用いたテレプレゼンスシステム, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.88, No.8, pp.1750-1753 (2005)
- 6) 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦 : 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサーHyperOmni Vision の提案, 電子情報通信学会論文誌, Vol.79-D-II, No.5, pp.698-707 (1996)
- 7) 森田真司, 山澤一誠, 横矢直和 : 全方位画像センサーによるネットワークを介したテレプレゼンスシステムと遠隔監視システム, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU 2202-83, WIT 2002-26, pp.19-24 (2002)
- 8) S. Baker and S.K. Nayar : A theory of single-viewpoint catadioptric image formation, Int. J. Comput. Vis., Vol.35, No.2, pp.1-99(1999)
- 9) S.K. Nayar and V. Peri : Folded catadioptric cameras, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition'99(CVPR'99), pp.217-223(1999)
- 10) 茶園篤, 山澤一誠, 横矢直和, 竹村治雄 : 全方位ステレオ視による 3次元情報の獲得, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.10, pp.1745-1753 (1997)
- 11) 山下敏行, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和 : 複数の全方位画像センサーを用いたステレオ視による 3次元モデルの作成, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU99-267(2000)
- 12) 姜偉, 杉本茂樹, 奥富正敏 : ミラー付き回転カメラによる全周三次元再構成, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-D-II, No.8, pp.1508-1520 (2002)
- 13) M. Okutomi, Y. Katayama, and S. Oka : A simple stereo algorithm to recover precise object boundaries and smooth surfaces, Vol.47, No.1-3, pp.261-274 (2002)
- 14) 富手要, 山澤一誠, 横矢直和 : 複数の全方位画像を用いた広範囲な任意視点画像の生成, 電子情報通信学会技術研究報告, IE2001-201 (2002)

- 15) Heung-Yeung Shum, Li-Wei He : Rendering with Concentric Mosaics, Proc. SIGGRAPH97, pp.299-306 (1997)
- 16) Y. Li, H.Y. Shum, C.K. Tang, and R. Szeliski : A Stereo reconstruction from mutiperspective panoramas, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.26, No.1, pp.45-62(2004)
- 17) 山口晃一郎, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和 : 全方位画像を用いた両眼ステレオ画像の実時間生成によるプレゼンス, 画像情報通信学会論文誌, Vol.84, No.9, pp.2048-2057 (2001)
- 18) 包躍, 東利英 : 自律移動ロボットにおけるランドマークの自動生成, 画像電子学会誌, Vol.32, No.6, pp.794-801 (2003)
- 19) 北川泰広, 濱口佳孝, 塚本明利, 宮崎敏彦 : 単眼動画画像からパノラマステレオ画像の生成, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.6, pp.1848-1856 (2000)
- 20) 斎藤英雄, 木村誠, 矢口悟志, 稲木奈穂 : 射影幾何に基づく多視点カメラの中間視点映像生成, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.11, pp.21-32 (2002)
- 21) 稲木奈穂, 斎藤英雄 : サッカーシーンにおける多視点映像からの中間映像生成, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU101(422), pp.87-94 (2001)
- 22) 矢口悟志, 木村誠, 斎藤英雄, 金出武雄 : 未校正多視点カメラシステムを用いた任意視点画像生成, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌, Vol.42, No.SIG6(CVIM2), pp.9-21 (2001)
- 23) 木村誠, 斎藤英雄 : 3カメラ間の射影幾何を用いた View Morphing, 情報処理学会研究報告, CVIM-135-16 (2002)
- 24) F. Gu, T. Nakata, Y. Bao : Making of Free Viewpoint 3D Images Using One Camera, ICCAS-SICE2009, pp.4629-4634(2009)
- 25) F. Gu, T. Nakata, Y. Bao : Arbitrary 3D Image Generation Using a Single Camera and a Spin Mirror, ICCAS-SICE2010, pp.2364-2370(2010)
- 26) F. Gu, T. Nakata, Y. Bao : A Method for Generating and Displaying a Free View 3D Image, ICCAS-SICE2011, pp.277-282(2011)
- 27) 顧飛, 中田崇行, 包躍 : 1台のカメラを用いた全方位自由視点立体画像の生成, 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.687-694 (2011)
- 28) H.C. Huang, C.C Kao, Y.P. Hung, and S.H. Nain : Generation of multiple perspective stereo videos, IEEE International Symposium on Consumer Electronics(ISCE'98):Digital Video and Multimedia Technology, pp.19-24(1998)
- 29) H. Ishiguro, M. Yamamoto, and S. Tsuji : Omnidirection stereo, IEEE Trans. Patern Anal. Mach. Intell., Vol.14, No.2, pp.257-262(1992)
- 30) P. Peer, F. Soline : Panoramic depth imaging: Single standard camera, Int. J. Comput. Vis., Vol.47, No.1-3, pp.149-160(2002)

- 31) 姜偉, 奥富正敏, 杉本茂樹 : ステレオマルチパースペクティブパノラマによる全方位 3次元再構成, 画像電子学会論文誌, Vol.33, No.4-B, pp.565-576 (2004)
- 32) ソニー株式会社 : デジタルスチルカメラ Cyber-shot, <http://www.sony.jp/cyber-shot/products/DSC-TX9/spec.html> (2012)
- 33) N.A. Dodgson, J.R. Moore, S.R. Lang, G. Martin, and P. Canepa : Time-sequential multi-projector autostereoscopic 3D display, Soc. for Information Display, Vol.8, No.2, pp.169-176(2000)
- 34) N.A. Dodgson : On the number of views required for head-tracked autostereoscopic display, Proc. SPIE, 6055, Stereoscopic Displays and Applications XVI, pp.16-19(2006)
- 35) R.R. Moseley, G.J. Woodgate : Parallax barrier and display, European Pat., EP0829744(1997)
- 36) 廣瀬通孝 : 全天周ディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol.55, No.8-9, pp.1076-1080 (2001)
- 37) 包躍, 平野陽一 : 臨界角を利用した立体ディスプレイ, 画像電子学会誌, Vol.30, No.5, pp.648-655 (2001)
- 38) 包躍, 喜名貞幸 : フロント光源反射型立体ディスプレイ, 画像電子学会誌, Vol.30, No.6, pp.723-730 (2001)
- 39) K. Perlin, C. Poultney, J. Kollin, D. Kristjansson, and S. Paxia : Recent advances in the NYU autostereoscopic display, Proc. SPIE, 4297, pp.22-24(2001)
- 40) D. sandin, T. Margolis, J. Ge, J. Girado, T. Peterka, and T. DeFanti : The varrier autostereoscopic virtual reality display, ACM Transactions on Graphics, Proc. ACM SIGGRAPH, Vol.24, No.3, pp.894-903(2005)
- 41) H. Nam et al. : Auto-stereoscopic swing 3D display, SID 2005 DIGEST(2005)
- 42) 包躍, 服部晋也 : 広視域複数者対応のバックライト分割式立体ディスプレイ, 画像電子学会誌, Vol.32, No.1, pp.29-37 (2003)
- 43) 阪本邦夫, 木村理恵子 : 解像度劣化のないパララックスバリア方式立体表示の一手法, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, No.1, pp.155-157 (2005)
- 44) 包躍, 服部晋也 : パララックスバリアを用いた複数観察者トラッキング型立体ディスプレイ, 画像電子学会誌, Vol.32, No.5, pp.667-673 (2003)
- 45) 包躍, 長崎圭太 : 可変奥行き感表示可能なモアレ立体画像表示システム, 画像電子学会誌, Vol.38, No.3, pp.290-295 (2009)
- 46) 山田千彦 : レンチキュラー板による立体像表示方法, 日本印刷学会誌, Vol.31, No.1, pp.15 (1994)
- 47) Y. Takaki : Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images, Proc. SPIE, 5664, pp.56(2005)
- 48) 大力孟司, 畑田豊彦, 高木康博 : VGA 解像度 72 指向性ディスプレイによる質感表現, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.12, pp.1795-1802 (2007)

- 49) 篠崎陽平, 名郷日陽, 高木康博 : 256 視点超多眼立体ディスプレイの表示性能の改善, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.34, No.43, pp.25-28 (2010)
- 50) 西川貴之, 包躍 : 遮光レンチキュラーによる広視野立体動画表示に関する研究, 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, 12-3-1 (2009)
- 51) B. Lee, S. Jung, and J.H. Park : Viewing-angle-enhanced integral imaging using lens switching, Optics Letters, Vol.27, No.10, pp.818-820(2002)
- 52) Y. Kim, J.H. Park, H. Choi, S. Jung, and B. Lee : Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens switching, Optics Express, Vol.12, No.3, pp.421-429(2004)
- 53) 掛谷英紀 : 粗インテグラルボリューム表示による 3 次元ディスプレイ, 画像ラボ, Vol.19, No.9, pp.45-48 (2008)
- 54) B. Lee, S. Jung, S.W. Min, and J.H. Park : Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes, Optics Letters, Vol.26, No.19, pp.1481-1482(2001)
- 55) H. Liao, M. Iwahara, Y. Katayama, N. Hata, and T. Dohi : Three-dimensional display with long viewing distance by use of integral photography, Optics Letters, Vol.30, No.6, pp.613-615(2005)
- 56) H. Liao, T. Dohi, and K. Nomura : Autostereoscopic 3D display with long visualization depth using referential viewing area-based integral photography, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.17, No.11, pp.1690-1701(2011)
- 57) 顧飛, 包躍, 中田崇行 : スケーリング補間を用いた全方位自由視点立体画像の生成, 画像電子学会誌, Vol.43, No.1 (2014)
- 58) F. Gu, T. Nakata, Y. Bao : Generation the 3D Image of the Free Viewpoint by Combination of Partial Image Sequences, IEEE-CIVS2010, pp.134-137(2010)
- 59) 中田崇行, 顧飛, 包躍 : 一台のカメラと回転ミラーを用いた自由三次元視点画像の生成, 画像電子学会第 240 回研究会, pp.31-36 (2008)
- 60) 顧飛, 中田崇行, 包躍 : 一台のカメラを用いた自由視点画像撮影法, アドバンティ 2008 シンポジウム講演概要集, 自動制御計測学会, pp.139-144 (2008)
- 61) 顧飛, 中田崇行, 包躍 : 自由視点生成のための画像合成, アドバンティ 2010 シンポジウム講演概要集, 自動制御計測学会, pp.75-80 (2010)
- 62) 渠源, 包躍, 顧飛, 古村晴紀 : 透過式ディスプレイを用いた深い奥行き 3D 動画の裸眼立体表示, 画像電子学会第 264 回研究会, pp.87-92 (2013)