

直交ミラーアレイを用いたマルチ
モーダル空中表示に関する研究

2017年3月

久次米亮介

目次

第 1 章 序論

1-1	研究背景	1
1-2	研究目的	2
1-3	マルチモーダル空中像とは	3
1-4	論文の構成	4

第 2 章 空中結像形成技術

2-1	屈折型結像素子	6
2-2	反射型結像素子	9
2-3	自発光空中表示	15
2-4	第 2 章まとめ	16

第 3 章 直交ミラーアレイによる空中像

3-1	直交ミラーアレイの構成	18
3-2	直交ミラーアレイによる空中像の形成原理	19
3-3	LED のための設計	21
3-4	実像による空中像	22
3-5	直交ミラーアレイのオクルージョンの矛盾	23
3-6	レンズを用いた直交ミラーアレイの結像位置の調整	24
3-7	直交ミラーアレイによって形成される空中像の角度依存性	27
3-8	直交ミラーアレイの視野角	33
3-9	シミュレーションを用いた直交ミラーアレイの設計	34
3-10	第 3 章まとめ	41

第 4 章 多方向表示のための直交ミラーアレイの配置

4-1	鏡面と非鏡面による反射	43
4-2	直交ミラーアレイによる 2 方向空中表示	44
4-3	4 方向への同時表示のための直交ミラーアレイの構成	50
4-4	単一光源による 2 方向空中表示のための光学系	53

4-5	第4章まとめ	56
第5章 直交ミラーアレイを用いた空中像による温感表示		
5-1	中空構造と赤外線反射	57
5-2	直交ミラーアレイの赤外領域における光線の収束シミュレーション	58
5-3	直交ミラーアレイを用いた熱の収束	61
5-4	肌で感じることでできる熱を持った空中像	66
5-5	複数熱源を用いた熱空中像と熱空中像の分解能の傾向	67
5-6	第5章のまとめ	72
第6章 直交ミラーアレイによる音波の収束		
6-1	音波を収束するための直交ミラーアレイの作製	73
6-2	音波用直交ミラーアレイによる音波の収束	74
6-3	収束された音波の波形	76
6-4	直交ミラーアレイの開口サイズより長い波長の音波の収束	78
6-5	第6章まとめ	81
第7章 光と熱と音によるマルチモーダル空中表示		
7-1	光と熱の空中像	83
7-2	光と音の同時収束	88
7-3	光と熱と音によるマルチモーダルな空中像の形成	89
7-4	第7章まとめ	92
第8章 結論		
8-1	まとめ	93
8-2	今後の展望	94
参考文献		95
謝辞		101

第 1 章 序論

1-1 研究背景

デジタルサイネージの新しい形として多感覚に対する刺激を内包した空中像を利用したものが期待されている。現在デジタルサイネージはいたるところに存在しており、ただの 2 次元表示では注目度も低くなっている。これに対する回答の 1 つとして空中像を利用したデジタルサイネージがある。空中像をデジタルサイネージに利用することで物理的な制約がなくなり、ぶつかる心配なく通り抜けることができようになる。これにより目の前に情報を提示しても通行の邪魔にならないため確実に情報を伝えることができるようになる。また、さらにサイネージの注目度を上げるための技術として触覚や聴覚といった視覚以外の感覚に刺激を与えることのできる表示技術がある[1-12]。これを利用し音や熱といった視覚以外の刺激を持つことでよそ見をしている人にもサイネージをアピールすることが可能になる。



Fig.1-1. Digital signage that is formed by multi-modal aerial image. When you go through the signs, warmth via skin and sound can be also perceived from the aerial image position.

デジタルサイネージに 3D 技術を利用するには観察者には特別な装置が必要ないこと、どのような人でも立体視ができること、表示装置がシンプルで大型化が容易であること、視野角が広いこと、低コストであることなどが求められる。立体視にとき別な装置を必要としない技術として空中表示技術[12-39]がある。3D 表示技術のほとんどが映像を浮かんでいるように見せるのに対して空中表示技術は実際に何も無い空間に映像

を映し出す技術である。実際に空間に映像を写しだすので裸眼で観察でき、違和感なく自然な状態で観察することができる。空中像形成技術の中には反射を利用して空中像を形成ものがある[35-54]。この技術はよって形成される空中像は光源の映像をそのまま空間に表示できるため、複雑なシステムを必要としない。

多感覚表示技術には視覚以外に刺激できる感覚のひとつとして温感があるが、現在の温感ディスプレイは何かに触ることが前提となっており、空中像との組み合わせを想定した技術が存在しない。触覚表示技術には振動や温度感覚などに作用がある。温感ディスプレイで主流なのがペルチェ素子を利用したものである。現行の温度感覚に作用する表示技術は基本的に何かに触ることが前提となっている。そのため物理的な接触の必要であり、空中像と組み合わせるのに向いていない。

ほかにも聴覚があり、こちらは空中像に対応した音響技術としてスピーカーアレイを利用した3次元空間における音場の再現を行う技術が存在している[55]。このシステムはマイクアレイで取得した音場をリアルタイムで音響変換処理をした情報を大量のスピーカーで出力することで音場を忠実に再現することができるシステムである。しかし、長時間の情報提示し続ける必要のあるサイネージに利用する為にはより簡単な構造でコストの安いシステムである必要がある。

1-2 研究目的

本論文では反射型の空中像形成技術をベースとして視覚、温感、聴覚に刺激を与えることが可能な多感覚(マルチモーダル)な空中像の形成を目指す。現在の温感の表示は何かに触れることを前提にしているため従来の温感表示技術では空中像と組み合わせることには向いていない。そのためマルチモーダル空中像の形成には非接触で温感を提示できる技術が必要である。また、音場に関してもデジタルサイネージに使用するためには現在発表されている手法よりも簡単な構造のシステムが求められる。これらの問題を解決するために反射型の空中像形成素子である直交ミラーアレイを利用して熱を持った空中像、音波によって構成された空中像の開発を行う。そして、これらの表示技術を組み合わせることで視覚、温感、聴覚の3つの感覚に刺激を与えることのできるマルチモーダル空中像の実現を目指す。

1-3 マルチモーダル空中像とは

マルチモーダル空中像とは目、耳、肌など視覚だけでなく複数の五感で感じることもできる空中表示像のことである。そもそも空中表示技術、空中像とは何もない空間に映像を映し出す技術及びそれによって形成される像のことである。空中像は実像として空間に形成される。現在実用化されている立体表示技術にある空間に飛び出して見えるもののような見かけだけの物ではなく実際に空間に映像が存在している。そのため、視差や輻輳、目の焦点距離といった人間が奥行を知覚する生理的要因を自然と満たしている。そのため、自然に空中に映像が浮かんでいる様子を観察することが可能である。

そして、空中像には大きな利点がある。それは「実物体とともに情報を実空間に表示できること」、「突然空間に飛び出したり、消したりできること」、「映像を通り抜けられること」、「映像に直接触ることができること」などである。

任意の空間に映像を表示することが可能であるため、実物体がある場所やその近くに映像を表示することが容易であり、互いを補完するように情報を提示することが可能である。例えば、サンプル品の実物に対して注釈等の情報を映像によって表示したりすることが可能である。これにより、表現の自由度を広げることができエンターテインメントや会議など幅広い場での活躍が期待できる。

空中像は何もない空間に直接映像を表示することのできる技術であるため表示を行っていない場合は何もない空間となる。そして、表示の ON/OFF の切り替えによって映像が何もない空間に現れたり消えたりする。これにより、必要に応じて情報を提示したり邪魔な時は何もない通常の空間に戻したりなどの操作を簡単に行うことができるようになる。

空中像は物理的な制約がないため映像をと売り抜けることが可能である。これはただ映像にぶつかる心配がないということではなく、従来のディスプレイでは壊れてしまう乱暴な操作にも対応できるということである。例えば、従来であればディスプレイを破壊してしまう映像を殴るといった動作も可能ということである。これにより、インタラクティブな表示技術の幅を広げることが可能である。

映像に直接触ることができるというのは触れて直接操作を行うことができるということである。そして、触れているが触れていない状態であるため操作する側もディス

レイ側も触れて操作することで汚れる心配がない。そのため医療現場や飲食店などの衛生管理が必要な場での利用が期待できる。以上のような利点を空中像は持っている。

マルチモーダル表示とは人間の複数感覚に刺激を与えることのできる表示技術のことである。例えば、静電気を利用した映し出された映像の質感を表示することができるディスプレイやペルチェ素子とプロジェクターを使用したお絵かきのできるインタラクティブな温感表示ディスプレイ、3D プロジェクターとスピーカーアレイによる 3D 映像音響システムなどがある。

本論文でこれらを合わせた、複数の感覚に刺激を与えることが可能な空中像の表示を目的として研究を行っている。

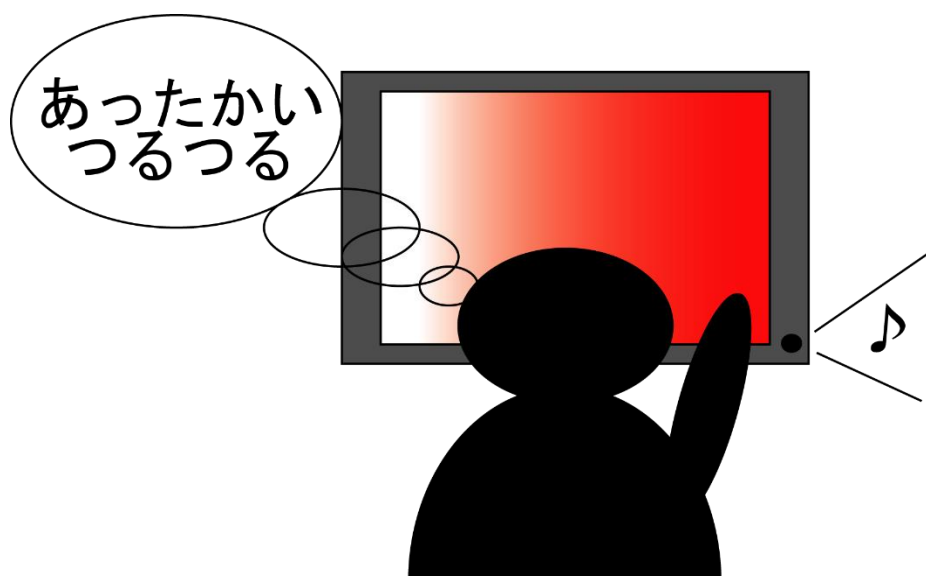


Fig. 1-2. Example of multimodal system. This system stimulates visual, auditory, tactile, and thermal sense.

1-4 論文の構成

本論文は直交ミラーアレイを用いたマルチモーダル空中像の表示技術をまとめたものである。本論文は全 8 章によって構成されている。

第 1 章で序論として、研究背景、研究目的および本研究で目指しているマルチモーダル空中像がどのようなものなのかについて述べている。

第 2 章においては既存の空中像形成術について述べている。そしてその空中像形成術の特性を述べることで今回の目的であるデジタルサイネージへの利用が可能なマルチモーダル空中像の実現に友好的な素子を比較検討する。

第 3 章では本研究におけるキーデバイスとなる素子直交ミラーアレイの構造, 原理とそれによって形成される空中像の特性について記述している.

第 4 章では直交ミラーアレイを用いた複数方向への空中像の同時表示技術について論じる. 直交ミラーアレイはもともと 1 方向へ向けて空中像を表示することを目的として設計されているため, 複数方向への表示には向いていない. その欠点を克服する手法についてなどを第 4 章では記述している.

第 5 章では直交ミラーアレイを用いた熱空中像の形成についての技術を記述している. 熱空中像とは赤外線を収束することによって形成した熱による空中像である.

第 6 章では音波による空中像の形成について述べる. 音波は光との波長帯域の差から空中像形成用の直交ミラーアレイを使用することができない. そのため, 音波用の直交ミラーアレイを新たに製作し, 製作された直交ミラーアレイが音波に対して有効であるかをこの章では論じている.

第 7 章ではこれまで紹介してきた光, 熱, 音波の空中像形成技術を合わせてそれらの刺激を持ったマルチモーダル空中像の形成を行う.

第 8 章では結論としてこれまでの章での研究成果のまとめと今後の研究に対する展望を述べる.

以上が本学位論文における構成となっている.

第2章 空中像形成技術

現在空中像を形成する技術には屈折による結像を利用したものと反射により光を収束する物, 空間を直接発光させることで空中に像を表示するものなどがある. 本章では, それらの空中像形成技術を紹介しそれぞれの特徴を比較する. これにより, デジタルサイネージへの利用に向いている空中像形成技術について検討する.

2-1 屈折型結像素子

ここでは, 屈折を利用した結像素子を紹介する. 屈折とは異なる媒質に光などの波が入射したときに発生する媒質ごとに異なる波の伝搬速度の違いによって進行方向が変化する現象である. 屈折を利用した結像ではこの進行方向の変化によって任意の位置に光を収束することで結像を行う.

屈折を使用し結像を行うものとして凸レンズという光学素子がある. 凸レンズは中央部が厚く, ふちに行くほど厚さが薄くなっているレンズである. レンズは屈折を利用して光線を収束, 拡散することのできる素子であり, 凸レンズはその中でも実像を形成することが可能なレンズである. 正確には平行光を焦点に収束し, 焦点から出た光を平行光にする働きがあり, 焦点距離より離れた位置に物体を置くとレンズの基本原理により空中に実像を形成する. この時の結像位置はレンズの焦点距離とレンズと光源の距離によって決まる.

レンズの焦点距離を f , レンズと光源の距離を a , レンズからの結像距離を b としたとき,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad \dots (1)$$

の関係になる. また, 形成される像の倍率 r は,

$$r = \frac{b}{a} \quad \dots (2)$$

となる. この時形成される空中像は上下左右が反転した実像である.

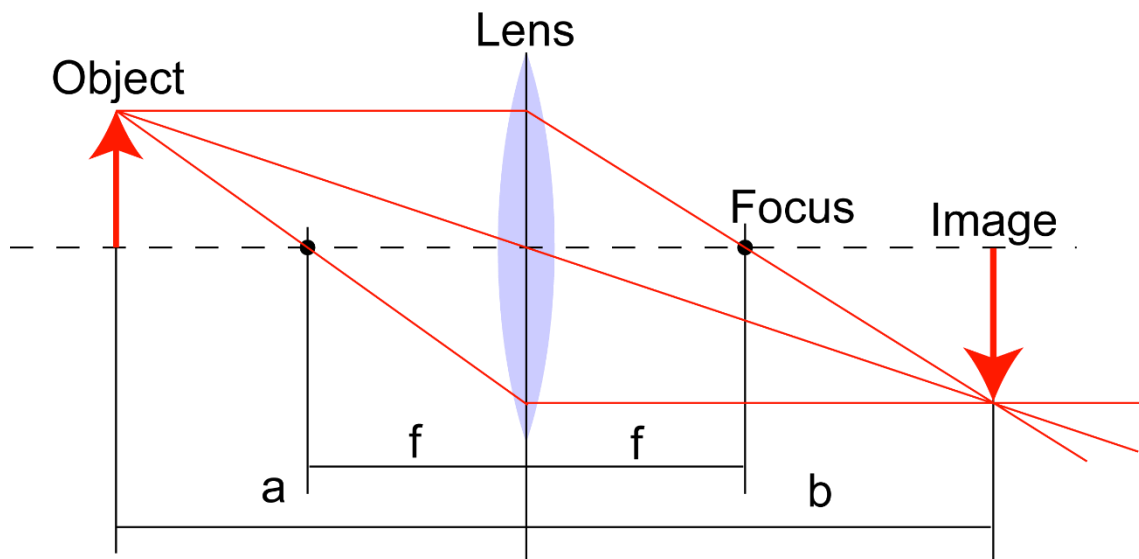


Fig.2-1 The imaging with convex lens.

また、レンズは2枚のレンズを使用することで1枚のレンズで結像を行うよりも結像の性能を上げることが可能である。まず、同じ光軸上に2枚のレンズを並べ1枚目のレンズの焦点距離の位置に光源を置く。焦点距離に光源が有るため1枚目のレンズに入射した光線は平行光となる。そして2枚目のレンズにすることで光線が2枚目のレンズの焦点距離で収束、結像される。1度平行光にした光線を収束させるため本来のレンズとしての機能から結像制度が上昇する。この時形成される像の倍率は2枚のレンズの焦点距離の比によって決まる。

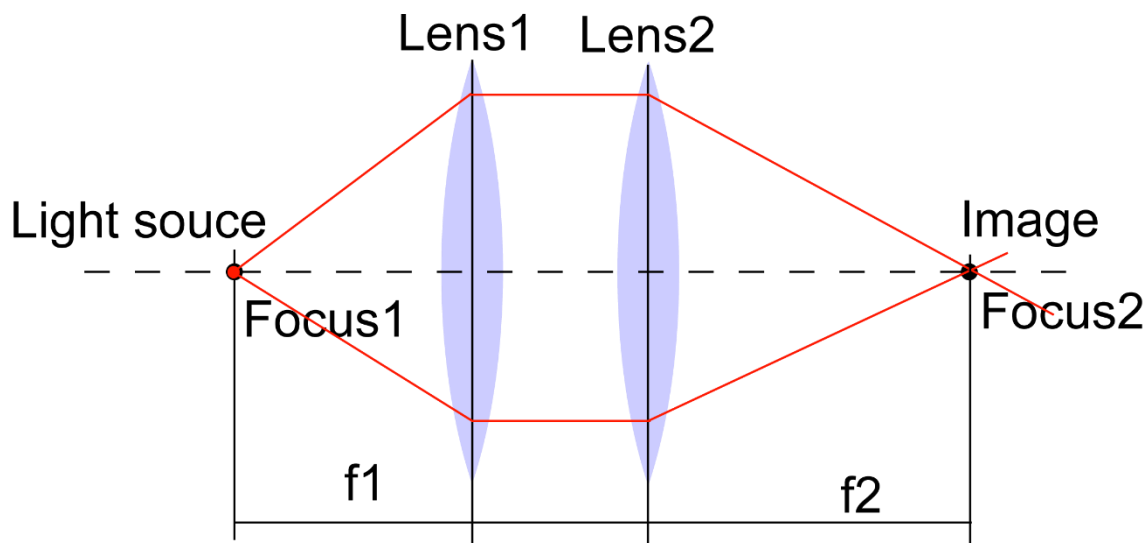


Fig. 2-2. The imaging with two convex lens.

凸レンズと同様の働きをするものとしてフレネルレンズというものがある。これは、

通常のレンズを同心円で分割し、のこぎり状にすることで厚みを減らしたレンズのことである。このレンズは通常のレンズと比べてレンズの厚みが薄く軽量である利点を持っているが、分割数が多くなるほど回折の影響を受けやすくなり結像性を低下させてしまうという欠点を持っている。主に薄型である利点があり働くカメラや、通常では厚みが有りすぎて使用の難しい大型のレンズが必要な場などで使用されている。

Planoconvex lens



Fresnel lens



Fig. 2-3 Structure of the Fresnel lens.

また、レンズの中にはマイクロレンズアレイというものがある。マイクロレンズアレイとは径の小さなレンズを同一平面上に多数配置し、アレイ状にした素子である [15-29]。マイクロレンズアレイを利用した空中表示ディスプレイはメーカーにより実用化され市販されている [27、28]。また、液晶プロジェクターや光通信用レーザーなど幅広い場で使用され、インテグラルイメージングのような立体映像技術の分野でもよく使用される素子である。

ほかにも、Gradient-index Lens というものがある。Gradient-index Lens とは半径方向に屈折率分布を持つ円筒状のレンズである。両端が平面でもレンズの特性を持っており光通信の部品などに使用される。素子の長さを選ぶことで様々な位置に焦点を結ぶレンズを作成でき、レンズの端面に倒立実像を結ばせることも可能である。このレンズでアレイを組むことでリアルタイムでの 3 次元インテグラルフォトグラフィの取得に利用することも可能である。この素子の 2 次元アレイを 2 つ使用した 3 次元的な空中像の表示技術なども発表されている。

これらの屈折を利用した結像を行う光学素子は高精細な像を形成することが可能である。しかし、基本的に視野角が狭く大きな像を表示するためにはその分だけ大きな素子を用意する必要がある。そのため、広い視野角と大型化が必要であるデジタルサイネ

ージにはむいていない。

2-2 反射型結像素子

ここでは、反射を利用した結像技術の紹介を行う。反射を使った結像を行うものの1つとして凹面鏡がある。凹面鏡とは湾曲した曲面の内側が鏡面になっているものである。凹面鏡の曲面が球面状であるとき反射光は、曲率半径の半分の値を焦点距離とした結像が行われるようになる。結像位置、像の倍率は凸レンズと同様の式によって求めることができる。凹面鏡によって結像された像にはゆがみが発生する場合がある上に大きな球面上の曲面を用意することは難しい。サイネージへの利用は難しい。

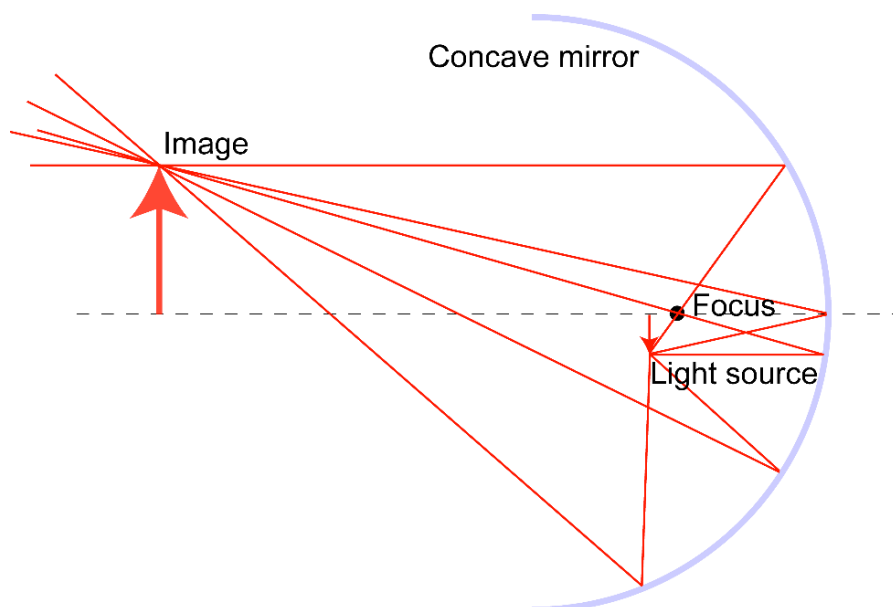


Fig. 2-4. The imaging with concave mirror.

また、2枚の凹面鏡を組み合わせることで360度全周囲から見る事が可能な空中像を形成することができる。この空中表示では同じ大きさの凹面鏡を2枚使用し、うち一枚の中心には穴が開いている。穴が開いていない方の凹面鏡を下側にし、鏡面が向かい合う様に重ね合わせ、空中像にしたい物体を下側の凹面鏡の上に置く。物体に反射した光は上側の凹面鏡で反射する。この時反射した光がほぼ平行な光線になり、下側の凹面鏡に入射する。凹面鏡は平行光を焦点に収束することが可能であるためこれにより、上側の凹面鏡の穴の上に全周囲の空中像が形成される。形成される空中像は高い立体感や臨場感を持っているが、装置に対して形成できる空中像の大きさがとても小さい。その

ため大型表示が必要とされるデジタルサイネージには向いていない。

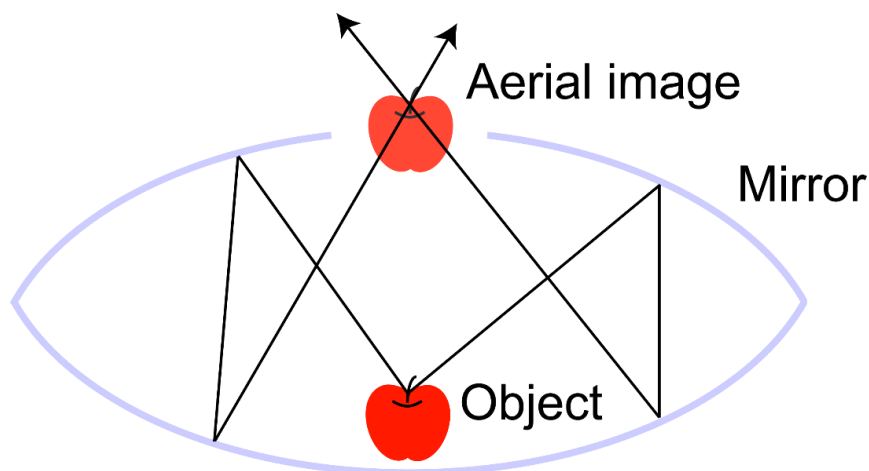


Fig. 2-5. Aerial imaging system by using concave mirror.

最近の研究では 2 面コーナーリフレクターによる再帰反射を利用した空中像形成素子が発表されている。再帰反射とは通常の光の反射では入射角と反射角が等しくなるのに対して、物体に入射した光線が入社してきた方向に戻っていく反射のことをいう。コーナーリフレクターの反射を利用した結像技術はもともと x 線イメージングの分野での利用を目的として開発された。名前をロブスターアイオプティクスといい、ザリガニの目の形状を参考に開発された素子である[43]。ザリガニの目は屈折率に差のある空気中、水中どちらにも対応できるように屈折ではなく反射によって結像を行う構造をしている。ロブスターアイオプティクスは入射してきた X 線を内部壁で 2 回反射させ球状焦点面上に集光させることができる。視野がほとんど無制限で将来の X 線天体物理学の任務や分析において大きな期待が寄せられている。

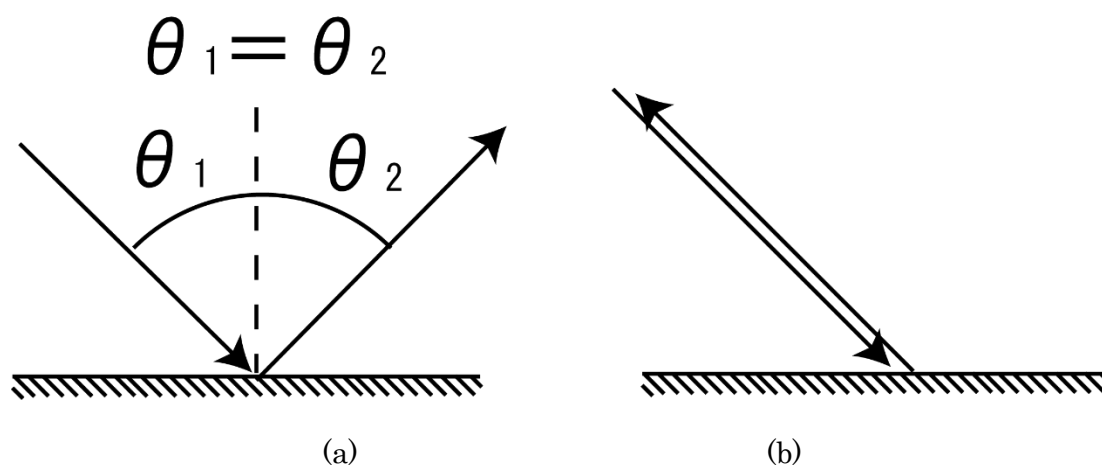


Fig. 2-6. (a) Normal reflection. (b) Retro reflection.

そして、ロブスターアイオプティクスにも使用されている 2 面コーナリフレクターの原理を利用して開発された空中像形成を目的とした最初の光学素子が DCRA(Dihedral Corner Reflector Array)である[35-38,44-49]。この素子は、ピラー状のマイクロオーダーの微細なミラーが無数に形成されており、ピラー状のミラー1本1本が 2 面コーナリフレクターとして作用する。これにより DCRA に入射した光は 2 回反射ののち光源と面対称の位置に集光し、幾何光学的に結像を行う。DCRA は液晶ディスプレイの映像を空中に表示することを目的とする素子であり、微細なミラーを使用しているため高精細な画像の表示が可能である。しかし、微細なピラー状のミラーを集積した素子であるため技術的にもコスト的にもサインージに利用できるような大型表示には向いていない。

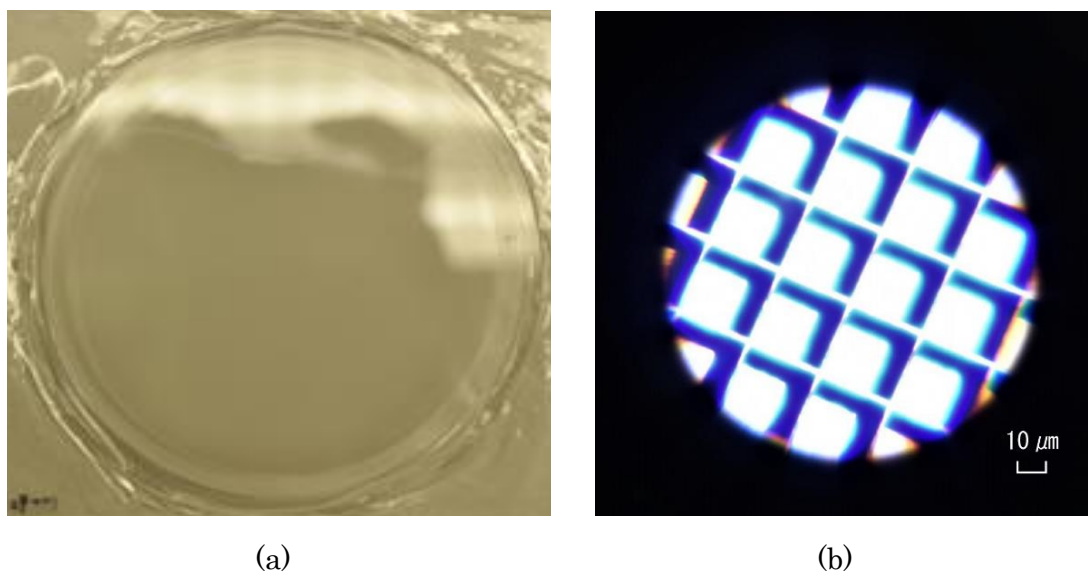


Fig. 2-7. (a)Dihedral Corner Reflector Array. (b) Enlarged image of DCRA.

DCRA を用いた空中立体ディスプレイシステムとしてマイクロミラーアレイ結像素子を用いた体積走査型 3 次元ディスプレイ[35-36]がある。体積走査型 3 次元表示とは、複数の画像を高速で表示しながら各画像に合わせて表示位置を変更することで 2 次元画像を積層させて 3 次元画像を表現する手法である[34]。本ディスプレイでは空中表示用の素子として DCRA を利用しミラースキャナーによって画像の表示位置を切り替えている。ミラースキャナーによってスクリーンに表示された映像が DCRA に入射するまでの光路が変化する。これにより DCRA によって表示される映像が表示される空間を切り替えることが可能となり体積型の空中 3 次元表示を実現している。

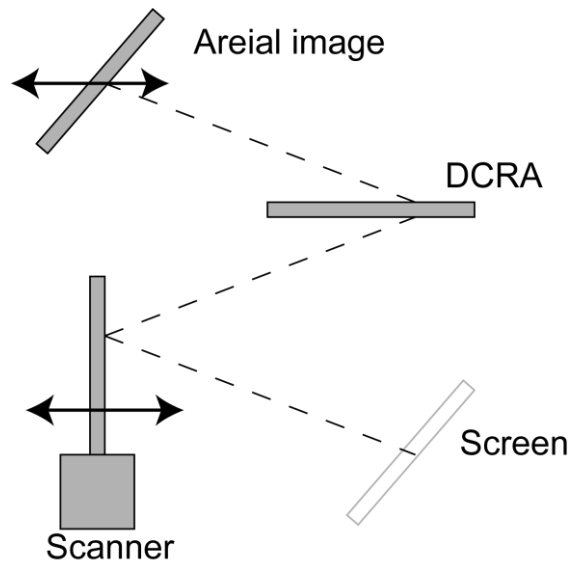


Fig. 2-8. Volumetric display system using transmissive mirror device.

また、同様の原理を利用した空中像形成素子に AI プレートというものがある。AI プレートは 2 層のスリット上のミラーアレイを垂直配置した構造を持った素子である。この垂直配置された 2 層のスリットミラーが 2 面コーナリフレクターとして機能するため空中像を形成することが可能である。2 層構造にすることで入射光が 2 回反射される割合が多くなり、空中像形成への光の利用効率が向上され環境光に負けない輝度を持つ空中像の形成が可能である。AI プレートも DCRA 同様高精細な空中像を形成することが可能である。AI プレートは VR(Virtual reality)や AR(Augmented Reality)などの分野でも注目されており、車載やセキュリティ、飲食店用ディスプレイといった広い分野での実用化が期待されている。AI プレートも DCRA 同様高精細な画像を空中表示できるようにスリットミラーが微細な間隔で積層されているため大きなプレートを用意するためにはコストがかかるため難しく大型化には向いていない。

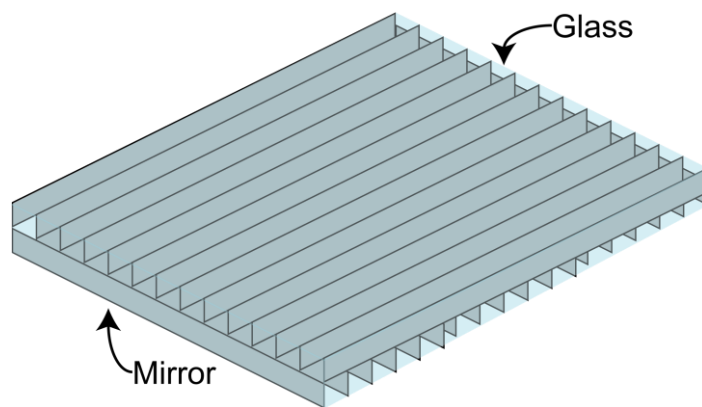


Fig. 2-9. Configuration of aerial imaging pleat.

ほかにも 2 面コーナリフレクターの原理による再帰反射を利用した空中像形成素子には、LED アレイによる空中像形成のために開発された空中像形成素子として直交ミラーアレイ(Crossed Mirror Array)がある[53-57]. 直交ミラーアレイは大型の LED ディスプレイを光源とする空中像形成するために設計された反射型の空中像形成素子である. これまで紹介した結像素子はミラーがマイクロオーダーのサイズであるのに対して直交ミラーアレイはミリオーダーのサイズをしている. そのため形成される空中像は低く, 液晶ディスプレイを光源として使用できるほどの性能は持っていない. しかし, もともと LED アレイを光源として使用することを想定しており, それには十分な解像度を持っている. 利点としては, ほかの 2 面コーナリフレクターの原理を利用した空中像形成素子に比べて構造が単純であるためコストの面で優れており数を用意しやすい. そして, 直交ミラーアレイはタイリングして使用することが可能であるため, 大型化が容易である. また, 光源に LED アレイを使用することを想定しているため, 既存の LED サイネージをそのまま光源として使用することができ, 輝度の高い空中像を表示することが可能になる. そして, 反射を利用した結像技術であるため反射可能なものならば収束, 結像が可能であるという利点がある. そのうえ表面反射を利用しているため反射できるものの幅も広い.

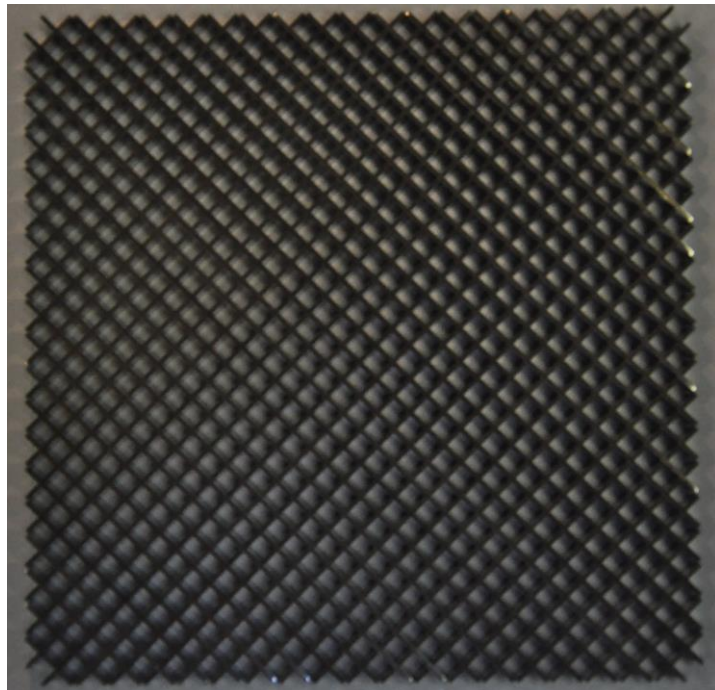


Fig.2-10. Crossed-Mirror Array.

また、Roof Mirror Array という素子がある。Roof Mirror Array は横方向の断面が V 字型の Roof Mirror を平行に多数配置した素子である。反射面と反射面の角度が 90 度であり、長い 2 面コーナリフレクターを 1 方向に対してあれ以上にした構成になっている。1 枚の Roof Mirror Array によって空中像を形成したとき両目が Roof Mirror の溝と垂直なら実像が見え、それ以外の角度から見た場合は虚像が見える。つまり Roof Mirror Array は実像と虚像を同時に結像する素子である。

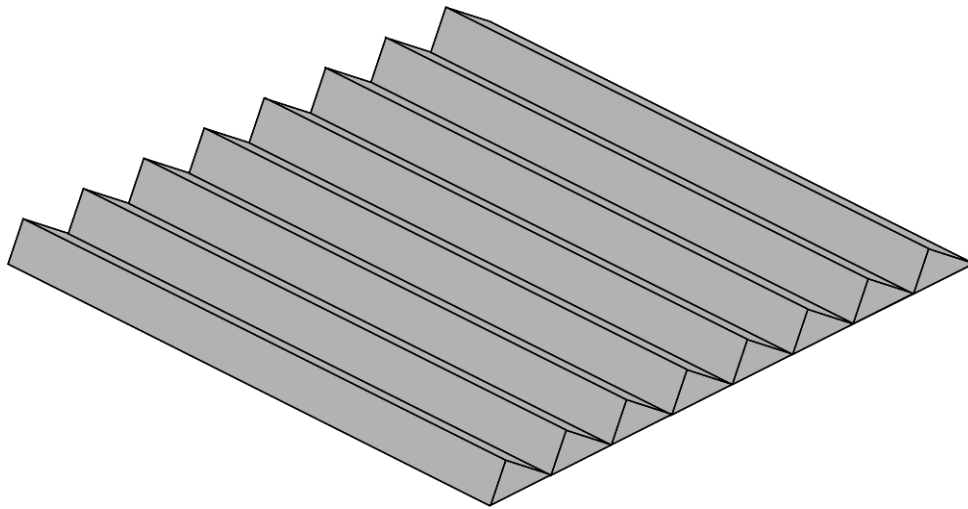


Fig. 2-11. Roof Mirror Array.

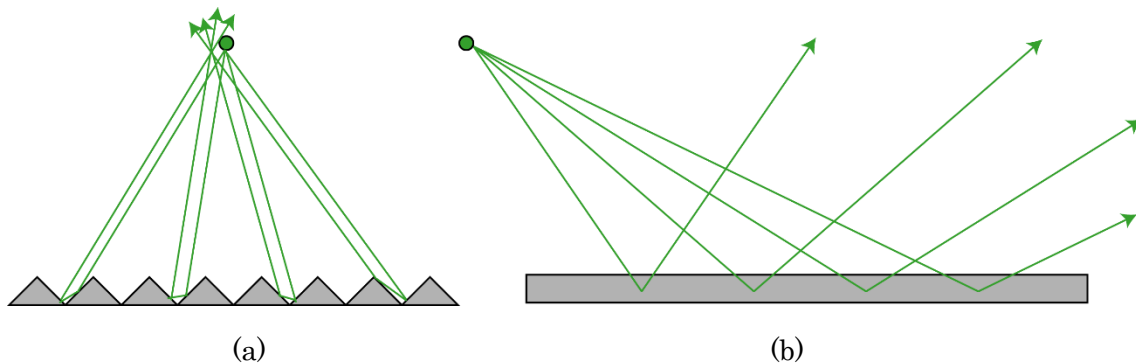


Fig.2-12. Image formed by roof mirror array. (a) Front view. (b) side view.

再帰反射を利用した別の空中像形成技術として AIRR(Aerial Imaging by Retro-Reflector)がある[59-70]. AIRR は Fig. 2-13 に示してあるように主に再帰反シート、ディスプレイ、ビームスプリッターによって構成された空中像形成システムである。ディスプレイから出た光はビームスプリッターによって反射され再帰反射シートに入射する。そして、再帰反射シートに入射した光線は再帰性の反射を行う。この再帰反射され

た光線がビームスプリッターを透過した場合、ビームスプリッターに対して光源より面
対称の位置に空中像が形成される。形成される空中像は視野域が広く空中像として認識
しやすいといった利点がある。

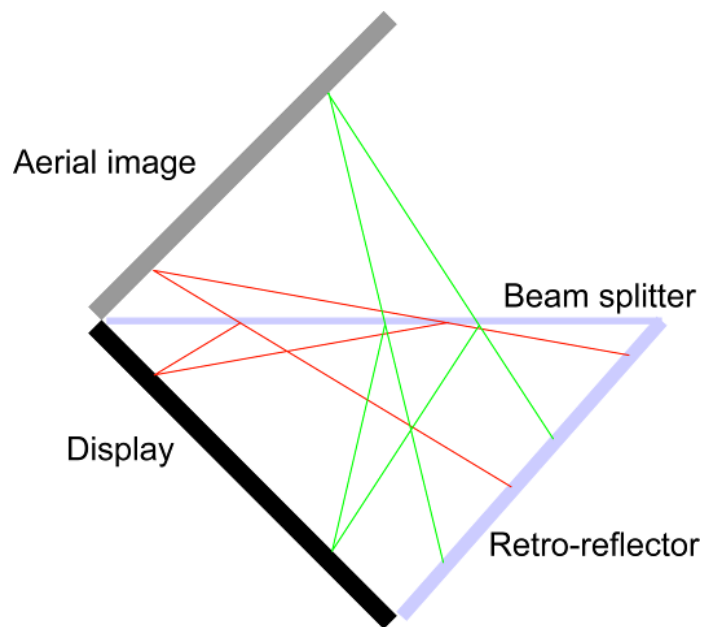


Fig. 2-13. Configuration of AIRR. AIRR is consisted of a display, a beam splitter, and a Retro-reflector.



Fig. 2-14. Aerial image formed by AIRR.

2-3 自発光空中表示

空中像形成技術には屈折や反射を使って結像を行うものだけでなく、直接空間を発光

させる自発光方式の技術も存在する[40-42]。その中でも代表的なのがプラズマ発光を用いた空中表示技術である。プラズマとは、気体を攻勢している分子が電離することで陽イオンと電子に分かれて運動している状態のことをいう。プラズマ気体中の放電によって生成され、発光を行う性質がある。人工的にレーザーやマイクロ波の照射によって気体を電離させることで発生させることができる。本方式ではレーザービームを空間中にフォーカスすることで空気をプラズマ化させることで発光を引き起こす。それを利用して空間に情報を提示する技術である。集光レーザーによって空間の1点にレーザーを集光させるとレーザブレイクダウンを起こし空気中の分子が電離する。その後分子が再結合するとき発光する。これを利用し、レーザーの集光ポイントを三次元的に高速で操作することによって任意の空間を光らせドットアレイによる映像を空中に表示する。

この手法はレーザービームによりプラズマを発生させるため大量のエネルギーを必要とし、稼働の際に激しい騒音発生する。また、発行体が白色のみであるためカラー表示ができない。そして映像を表示できる空中像の大きさの何倍ものサイズの表示装置が必要になる。そのためデジタルサイネージへの利用は難しい。

最近の研究ではプラズマ発光による空中表示の中にはプラズマを利用していながら人の手で触れることができるようになったものが発表されている。「Fairy Lights in Femtoseconds」と呼ばれるものである。このシステムは光源にフェムト秒レーザーを使用しており、非常に短いパルスレーザーによって瞬間的かつ連続的にプラズマ発光させているため触っても安全な表示を可能にしている。また、この表示は空中像に触れると触覚を感じることができる。これは視覚と触覚で感じることでできる表示技術であり、本研究での目的であるマルチモーダルな表示技術の1つといえる。しかし、現在は表示領域が指先程度であること、従来のプラズマ発光方式の表示領域に対して大きな光学系が必要なことからデジタルサイネージには向いているとは言えないためこの技術を利用することはできない。

2-4 第2章まとめ

本章では、空中像を形成する技術を紹介しそれぞれの特徴を比較することでデジタルサイネージへの利用に向いている空中像形成技術についての検討を行った。デジタルサ

イメージへの利用のために必要な空中像形成技術の要素として、表示装置がシンプルで大型化が容易であること、視野角が広いこと、低コストであることが挙げられる。

空中像を形成する結像素子にはレンズのような屈折型やロブスターの目からヒントを得た反射型のものなどさまざまなものが存在する。その中でも本論文では、デジタルサインージ実現のために反射型の空中像形成素子である直交ミラーアレイについて研究を行う。直交ミラーアレイは大型表示に向いておりかつ反射によって収束を行うため光線以外のものも収束することができる可能性が在る。これを利用することでマルチモーダルな空中像の実現を目指す。

第3章 直交ミラーアレイによる空中像

我々は, 空中像によるマルチモーダルなデジタルサイネージ実現のために直交ミラーアレイによる空中像の形成の研究を行っている. 本章では研究のキーデバイスとなる直交ミラーアレイがどのようなものなのかについて論じる. 主に, 直交ミラーアレイの特徴及び形成される空中像の性質についての紹介を行う.

3-1 直交ミラーアレイの構成

我々は, マルチモーダルな空中像を形成するための技術のキーデバイスとして反射によって空中像を形成することが可能な素子, 直交ミラーアレイ(Crossed Mirror Array)を使用して研究を行っている. 直交ミラーアレイは楕形のステンレスミラーを組み合わせて格子状にした素子である. これにより各開口が2面コーナリフレクターとして機能し, 空中像の形成が可能になる. 楕形のミラーは Fig.3-1 のようにステンレスミラーの板より切り出すことで形成している. いたから切り出しにはワイヤー放電加工機を使用している. ワイヤー放電加工機により楕形の直角を高い精度で作り出すことが可能になり格子状に組み合わせるとき隙間なく噛み合わせることが可能になっている. また, 直交ミラーアレイの素材にはステンレスミラーを使用している. これはワイヤー放電加工機による加工の際の劣化が少ないためである.

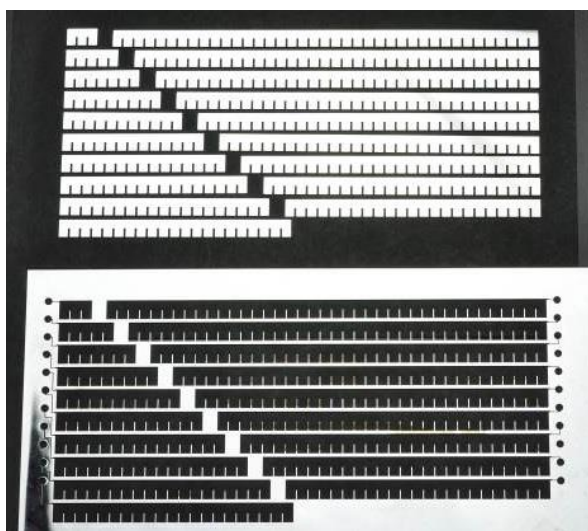


Fig. 3-1. Stainless steel mirror that was cut out to comb-shaped by wire-electrical discharge machine.

楕形のミラーを Fig.3-2 のように組み合わせることで格子状にしている。これにより各開口は中空構造となっている。また、直交ミラーアレイは片面ミラーによって構成されているため格子の各開口壁面 4 面のうち 2 面が鏡面であり他の 2 面は片面ステンレミラーの裏面(非鏡面)である。通常の場合、直交ミラーアレイは空中像を形成するとき鏡面 2 面による反射によって結像が行えるように鏡面の方向をそろえて格子状に組み立てられている。

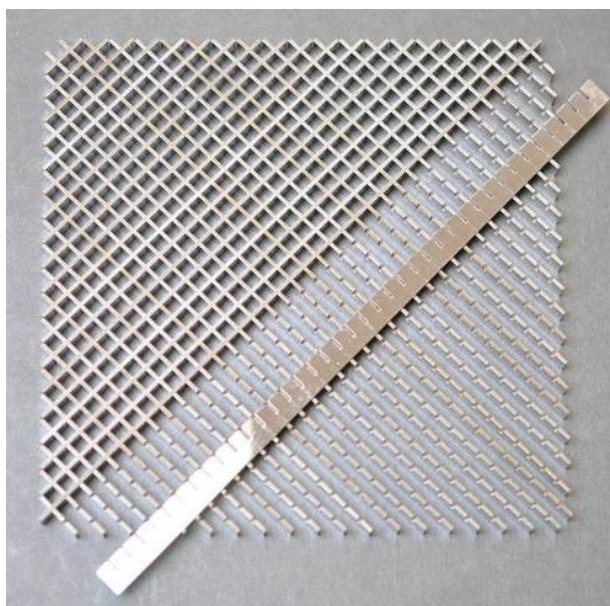


Fig. 3-2. Crossed-Mirror Array is formed by comb-shaped mirror.

3-2 直交ミラーアレイによる空中像の形成原理

直交ミラーアレイは格子状の素子であり開口壁面が鏡面になっている。そのため各開口が 2 面コーナリフレクターとして機能する。コーナーミラーとは 2 枚または 3 枚の平面鏡を直角に組み合わせた光学素子のことである。コーナーミラーの内側に入射した光線は鏡の枚数と同じ回数反射をして入射してきた方向と同じ方向に出ていく。2 面コーナリフレクターの場合、1 枚目の鏡への入射角を θ とすると反射の法則より反射角も θ となる。次に 1 枚目の鏡と 2 枚目の鏡は直角に組み合わされているので 2 枚面の鏡での入射角が $90^\circ - \theta$ となり、反射角も $90^\circ - \theta$ となる。すべての入射角と反射角の合計が

$$\theta + \theta + (90 - \theta) + (90 - \theta) = 180$$

となる。つまり、光は 180° 曲がったことになり入射してきた方向と同じ方向に出て行ったことになる。以上のように直交ミラーアレイの開口に入射した光線は2面コーナリフレクターの機能により再帰性を持つ。

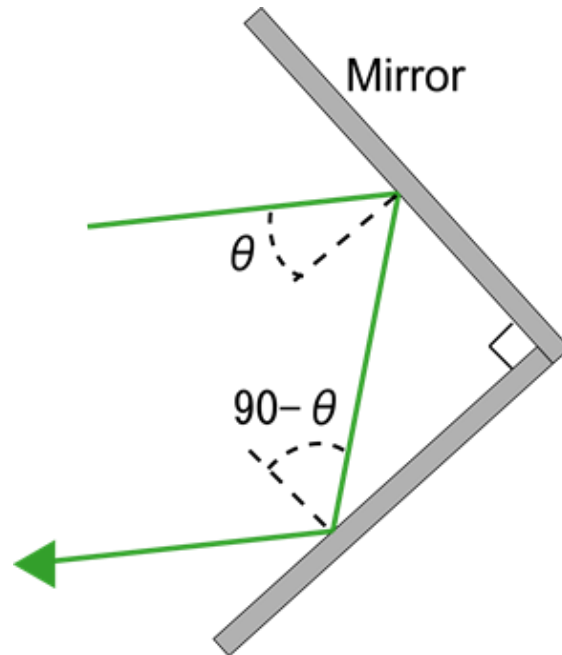


Fig. 3-3. The principle of a corner mirror.

直交ミラーアレイによる空中像の形成の原理を Fig. 3-4 に示す。光源から直交ミラーアレイに入射した光線を各開口で2回反射させた光線は再帰性を持つ。これにより、2回反射した光線は直交ミラーアレイに対して面对称位置に収束される。これにより直交ミラーアレイは空中に実像を形成する。また反射によって収束を行うため原理上、波長や波の種類に関係なく反射が可能であるものであれば収束させることが可能である。

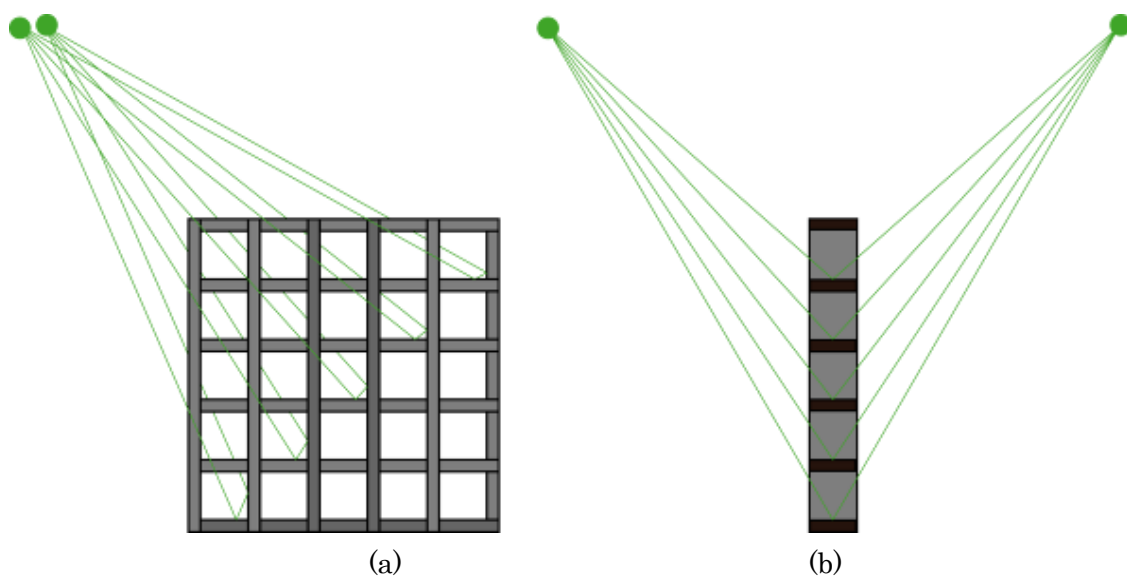


Fig. 3-4. Image forming by use of CMA.(a) Front view. (b) Side view.

3-3 LEDのための設計

直交ミラーレイはもともとLEDアレイを光源とした大型ディスプレイの空中像を形成することを目的として設計開発された反射型の空中像形成素子である。そのためLEDアレイ用の機能として結像素子であると同時に拡散素子としての機能を持っている。これは、形成される空中像をより滑らかに表示するための機能である。LEDアレイは発光点と発光点の間に隙間があり光を発しない黒領域が存在するためLEDの粒がはっきりと見え色が混ざり合わないといった欠点を持っている。この欠点はデフォーカスを行うことにより解消することが可能である。拡散素子としての機能は直交ミラーアレイの開口の大きさを調整することでもたせることができる。また、直交ミラーアレイは楕状の片面ステンレスミラーを組み合わせて構成されているのでその組み合わせ方を工夫するだけで容易に大型化が可能である。また、タイリングを行っても問題なく機能することが分かっている。現在、直交ミラーアレイの最大サイズは通常の方法では工作機械の工作可能サイズによって制限される。しかし、上記のようにタイリングを行ったり、組み立て方を工夫したりすることで大型の直交ミラーアレイを製作することは十分に可能である。

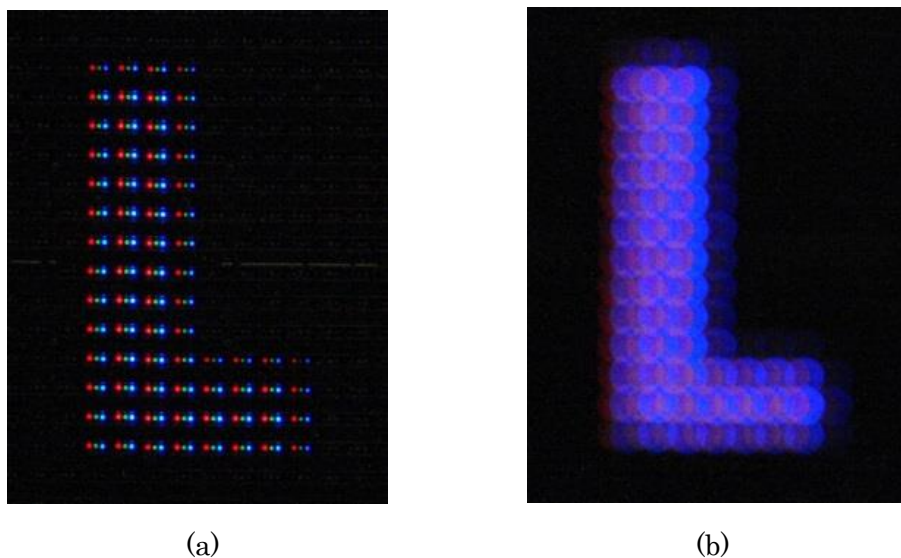


Fig.3-5. The complement of the black

以上のように直交ミラーアレイは LED アレイの欠点を補う機能を持ち、大型化が容易に可能である。そして高輝度の LED を光源に使用した場合、自然光下で肉眼によりお認識可能な空中像を形成することが可能である。そのため、デジタルサイネージやアミューズメントの分野での活躍が期待できる。

3-4 実像による空中像

直交ミラーアレイは反射によって空中像の形成を行うため形成される空中像のイメージは光源に依存する。直交ミラーアレイと光源の間にレンズなどの素子が全くない場合、直交ミラーアレイに対して面对称の位置に等倍のイメージが形成される。また、直交ミラーアレイによって形成される空中像は実像である。それを示すために、形成した空中像の結像点とその前後にスクリーンを当てることで直交ミラーアレイによる集光の様子を観察する。結果を Fig.3-6 に示す。結像点においてきれいな「LED」という文字が評されている。しかしその前後では像がぼやけ何を表示しているのかわからない。つまり、結像点において実像が結像されているということである。これにより、直交ミラーアレイによって形成される空中像は見かけだけのものではなく実際に空間中に映像が形成されているものであることが分かる。

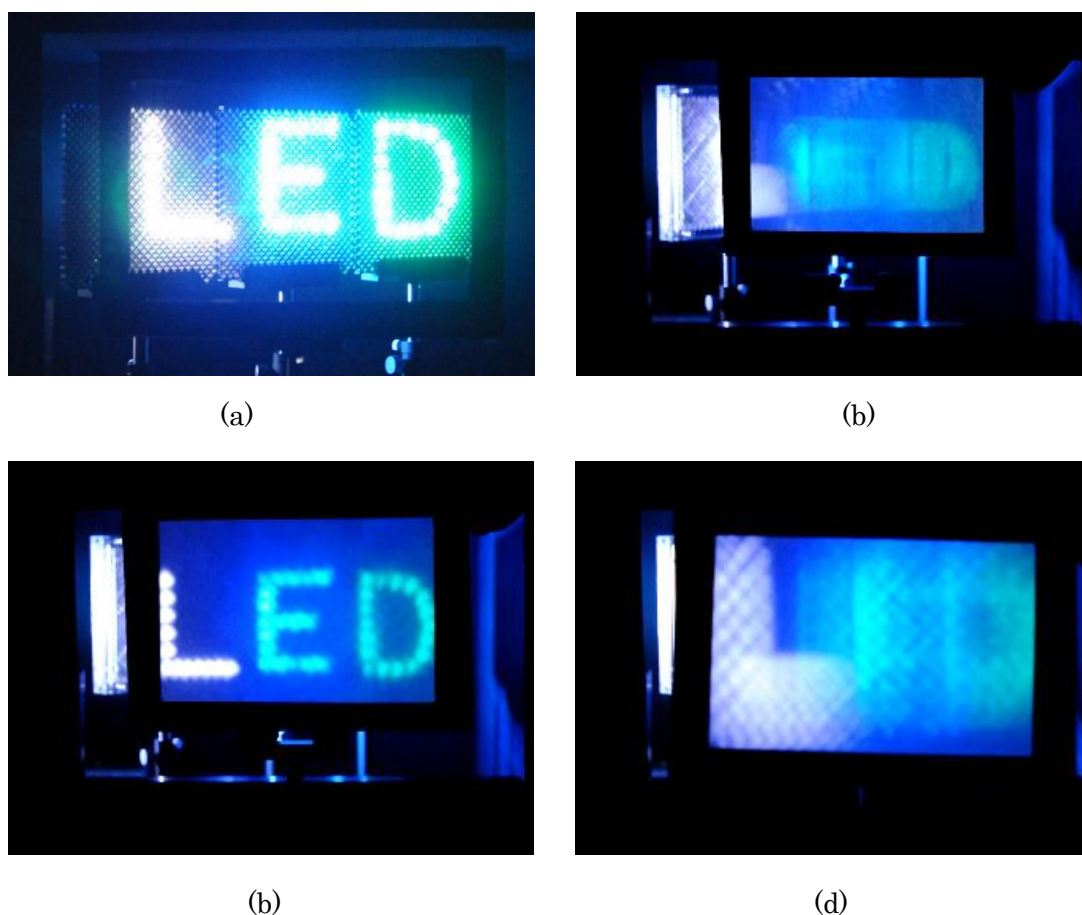


Fig. 3-6. Aerial image of CMA(a). We put screen at (b) near position from CMA (c) imaging position (d) far position form CMA. At imaging position, image is clearly.

3-5 直交ミラーアレイのオクルージョンの矛盾

直交ミラーアレイは素子に対して光源から面对称の位置に空中像を形成するため、オクルージョンの矛盾が発生してしまうことが有る。オクルージョンとは、奥行近くの手掛かりとなるものの1つで、物体が重なり合ったときに前にあるものが後ろにあるものを隠すことをいい、オクルージョンの矛盾とはそれが破綻している状態のことである。直交ミラーアレイによって結像位置の違う空中像を同時に表示する場合、形成される空中像の位置は直交ミラーアレイが光源から遠いほうが手前に、近い方が奥側に表示される。この時光源の一部が重なり合っている場合、形成される空中像は観察者から見ておくにある空中像が手前にある空中像を隠している状況になる。

この問題を解決する手法の1つとして直交ミラーアレイによって形成される空中像を光源として直交ミラーアレイによる空中像を形成するというものがある[]。つまり直

交ミラーアレイによる空中像の形成を 2 回行うということである。この時、形成される空中像の位置関係を Fig.3-7 に示す。1 度目の直交ミラーアレイによる空中像の形成によって奥行が反転する。2 度目の空中像の形成で奥行の関係がもう 1 度反転し、元の状態に戻る。これによってオクルージョンの矛盾を解消することができる。

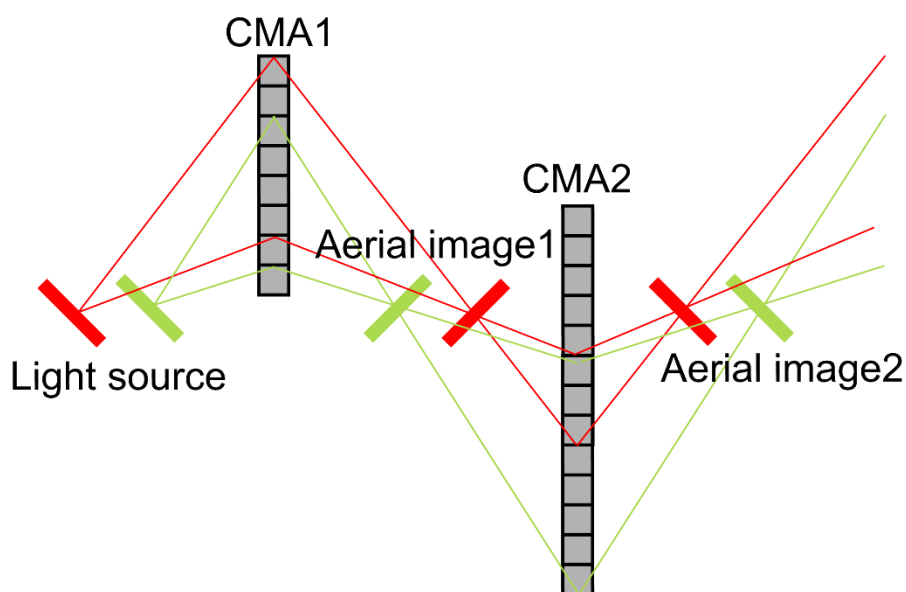


Fig. 3-7. Optical setup for solving the contradiction of occlusion

3-6 レンズを用いた直交ミラーアレイの結像位置の調整

CMA は面対称の位置に空中像を形成するため、1 つのディスプレイを光源とした場合、結像距離を部分的に変更することができない。また、結像位置をより遠くに設定したい場合、多くのスペースを必要とする問題がある。この問題の解消を目的としレンズによる結像位置の調整を行う。原理としては凸レンズを用いて虚像を形成し、その虚像を光源とする。虚像は光源が本来ある位置よりも直交ミラーアレイより遠い位置に形成されるため結像距離が延びることとなる。

光源と CMA の距離を固定し、レンズの位置を動かすことで結像位置の変化を測定した。実験系を Fig.3-8 に示す。使用した CMA は 14cm×14cm、厚さは 8mm で、各開口の大きさが 4mm×4mm となるように配置された直交ミラーで構成されている。光源の虚像を形成するレンズの焦点距離は 150mm、直径は 50mm である。光源には緑色 LED を使い、CMA への入射角を 35 度、距離を 30cm とする。

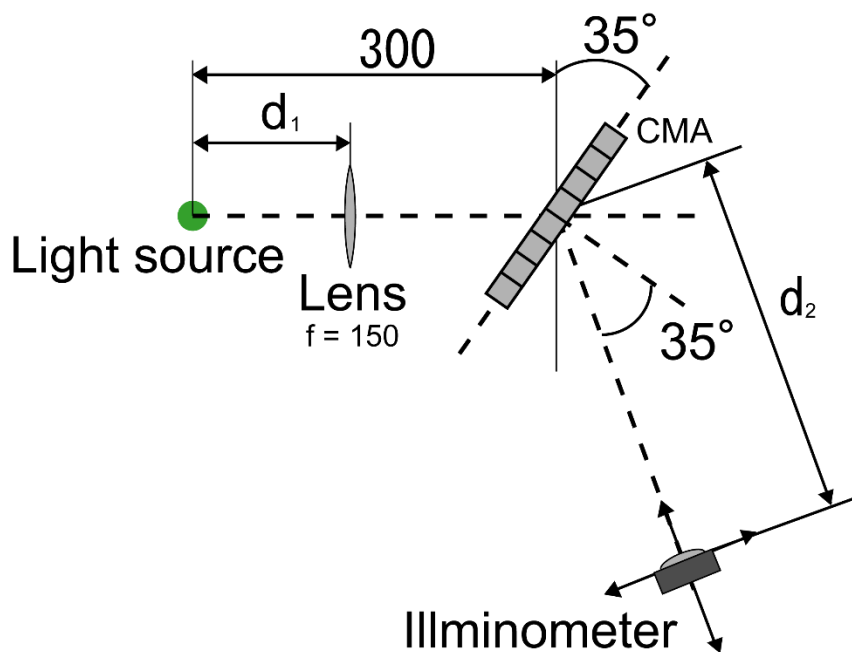


Fig. 3-8. Experimental setups to observe convergence of light.

CMA からの距離ごとの照度の変化を Fig.3-9 に示す. 光源とレンズの距離が焦点距離に近づくほど空中像の結像位置は遠くなった. しかし, それと同時に FWHM も広がる. これはレンズによって形成される虚像の位置が無限遠に近づくほど光線が平行に近づくため, 3 次元的に局在した空中像の形成が難しくなるためである. また, 光線が平行光に近づくため通常の直交ミラーアレイのみで結像を行った倍よりも視野域が狭くなる傾向にある.

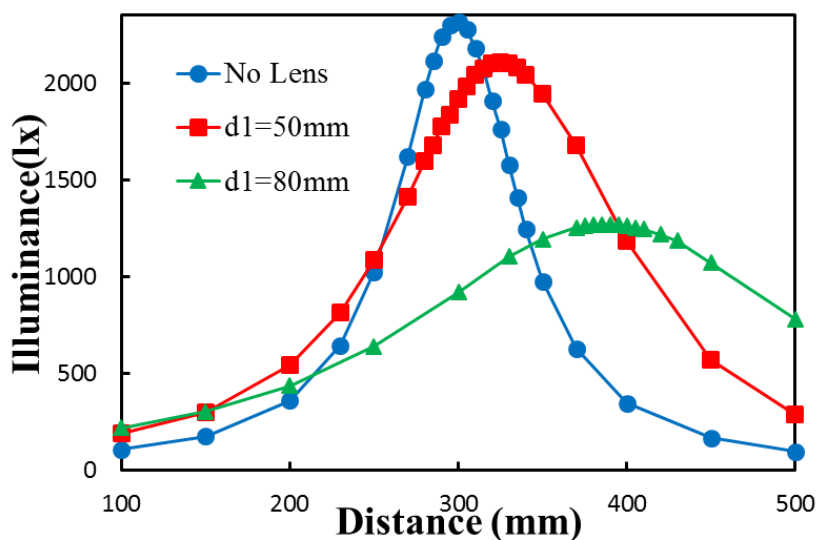


Fig. 3-9. Dependences of illuminance of the aerial image upon the distance. Focal length of the lens is 150 mm.

また、虚像を光源としているため形成される空中像の光強度や像の大きさも変化する。そこでレンズを移動させた場合の空中像の形成距離と光強度の関係、空中像の形成距離と空中像の大きさの関係を測定した。空中像の形成距離と光強度の関係を Fig. 3-10 に、空中像の形成距離と空中像の大きさの関係 Fig. 3-11 に示す。横軸はレンズと光源の距離を縦軸は結像距離および照度、像の大きさを示している。これにより、結像距離が長くなるほど、光強度が弱くなり、像の大きさが大きくなっていることが分かる。以上より、レンズによって結像位置の調整は可能であるが大幅に結像位置を変化させた場合、空中像の質に影響を与えることになる。

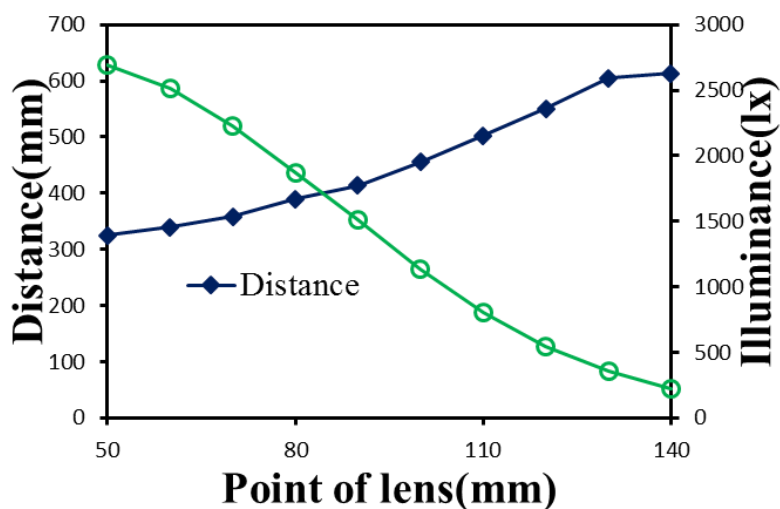


Fig. 3-10. Dependences of illuminance of the aerial image formed distance. Focal length of the lens is 150 mm.

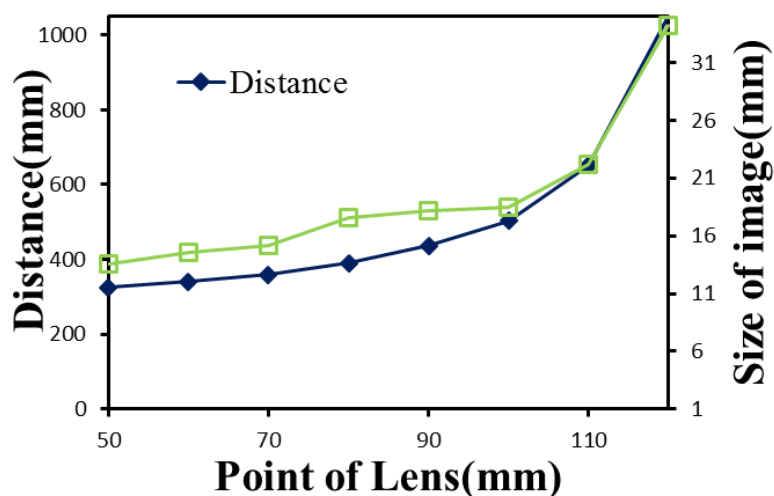


Fig. 3-11. Dependences of size of the aerial image upon the distance. Focal length of the lens is 150 mm.

このレンズによる結像位置の調整を行った場合の空中像形成位置は計算によって求めることができる。直交ミラーアレイと光源の距離を d_1 、レンズと光源の距離を a 、レンズとレンズによる像の距離を b とすると、直交ミラーアレイからレンズの結像位置 d_2 は、

$$d_2 = d_1 - a - b \quad \dots (1)$$

である。この時レンズの焦点距離を f とするとレンズの公式より

$$d_2 = d_1 - a - \frac{af}{a-f} \quad \dots (2)$$

となり、直交ミラーアレイから d_2 の距離の位置に空中像は形成される。

3-7 直交ミラーアレイによって形成される空中像の角度依存性

直交ミラーアレイは開口壁面の2回反射によって空中像を形成する。そのため、光源からの光が直交ミラーアレイに入射する光の角度によって2回反射される光の量が変わることにより形成される空中像の光強度に変化が生じると考えられる。本段落では直交ミラーアレイによって形成される空中像の角度依存性について述べる。

測定に使用した光学系を Fig.3-12 に示す。光源から直交ミラーアレイの距離を 50cm とし、光源には緑色 LED を使用した。直交ミラーアレイは大きさ 142 mm × 142 mm、開口の大きさ 4mm × 4mm、厚さ 8mm のものを1枚使用した。スクリーンは直交ミラーアレイに対して光源と面対象となる位置に置く。このスクリーンは空中像を観測しやすくするためのものでもなくとも空中像を確認することはできる。光源と直交ミラーアレイと空中像が水平面内に位置する配置において直交ミラーアレイを垂直軸に対して回転させる。光の入射角を θ とし時計回りの方向を正、逆方向を負とする。使用した直交ミラーアレイが片面の金属ミラーによって構成されているため、 θ が正の時直交ミラーアレイは鏡面により結像を行い、 θ が負の時非鏡面によって結像を行う。

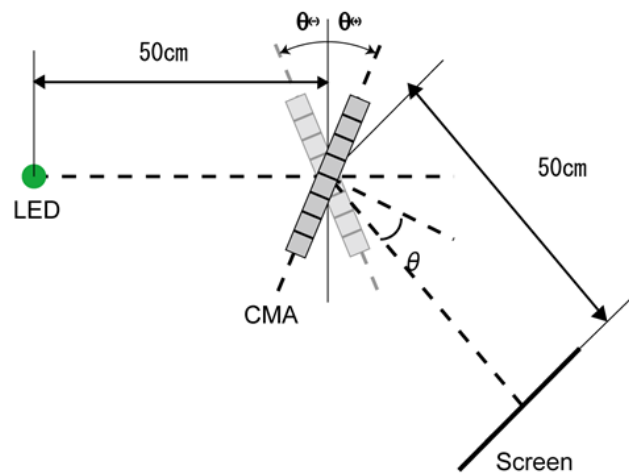


Fig. 3-12. Experimental setup to investigate reflection angle limit to form aerial image of an LED by use of CMA.

Fig.3-13 に光の入射角の変化による直交ミラーアレイによって形成される空中像の光強度の変化を示す. 最大値は θ が正(鏡面)の 때가 35 度で θ が負(裏面)の 때가 25 度となり鏡面による結像と非鏡面による結像では最適な角度が変化する. 反値全幅はそれぞれ 25 度と 40 度である. 光の入射角の変化によって形成される空中像の光強度が変化するのに入射角の変化に伴い直交ミラーアレイの開口内で 2 回反射および散乱される光の量が変わるためであると考えられる. また, 散乱の影響により非鏡面での結像は鏡面での結像に比べ光強度は弱くなっている. 非鏡面による結像では散乱が原因と思われる空中像の一定方向への広がりが確認されている.

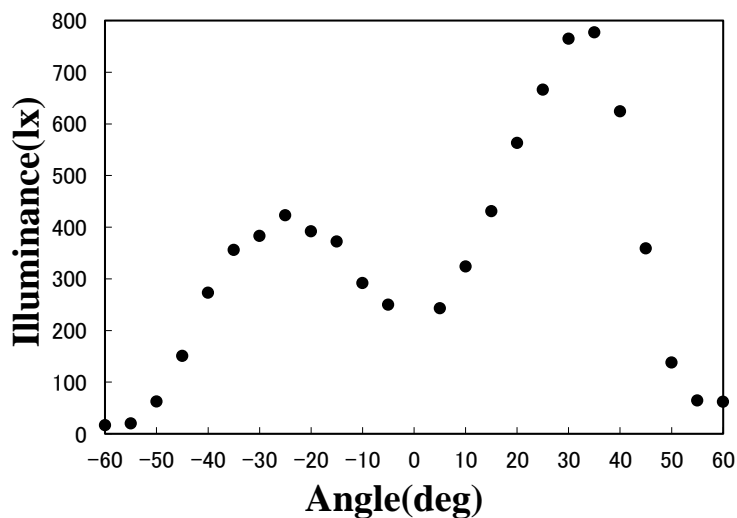


Fig. 3-13. Relationships between reflection angle and illuminance of the aerial LED image.

次に Fig.3-14 に光の入射角の変化による直交ミラーアレイによって形成される空中像の広がりの変化を示す。水平方向は θ の正負にかかわらず、ほぼ一定の値であった。垂直方向については、 θ が正の場合には一定値であったのに対して、負の場合は角度が大きくなると像が急激に広がる結果が得られた。この広がりには裏面による散乱によるものであると考えられる。垂直方向にのみ広がったのは、直交ミラーアレイの非鏡面(裏面)に垂直方向に強く散乱する様な細かい傷がみられたのでそのためであると思われる。また、垂直方向の像の広がりピークは-50度である。-50度以上の入射角で像の広がりが小さくなるのは散乱により広がりが大きくなりすぎて空中像として認識できないほど光強度が小さくなるためであると考えられる。

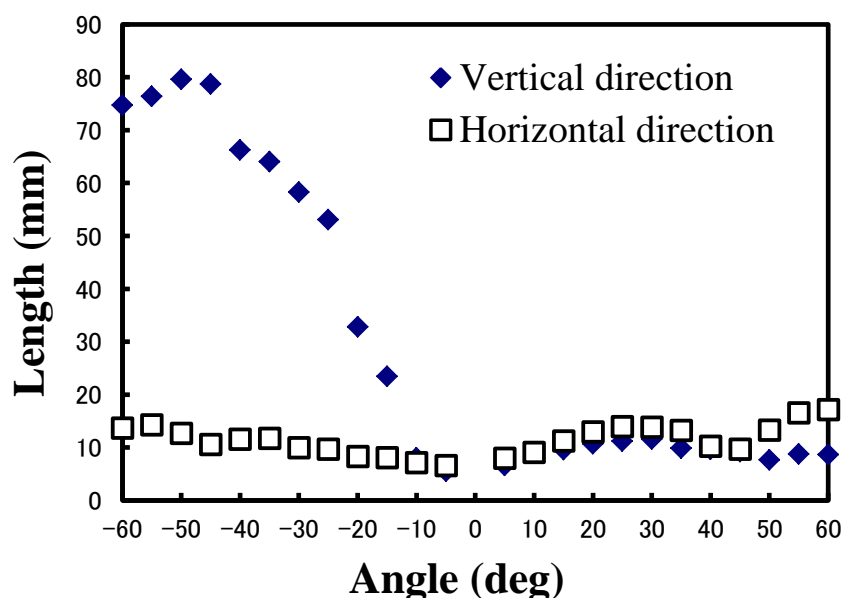


Fig. 3-14. Relationships between reflection angle and the height and width of the aerial LED image.

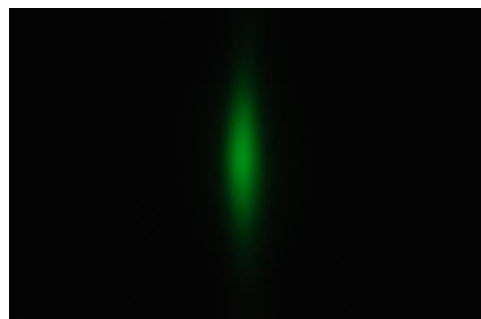
Fig.3-15 にスクリーンに映した各入射角での CMA による空中像の画像を示す。鏡面によって結像を行っているとき、形成される空中像に像の広がりはない。非鏡面によって形成された空中像は垂直方向に像の広がりが発生している。この像の広がりは入射角が浅い方が小さくなっている。入射角が浅い場合空中像が形成されている点を中心にバツ印のように光が広がっている。これは 1 回反射光と 2 回反射光が十分分離されていないために 1 回反射光がスクリーンに映し出されたものである。

以上より、直交ミラーアレイによる空中像の光強度は直交ミラーアレイへの光線の入射角によって変化することが分かった。また、非鏡面でも結像が可能であることから画

質に劣化は生じるが、直交ミラーアレイの結像において必ずしも鏡面で光線を反射させる必要はないことが明らかになった。



$\theta = -60$



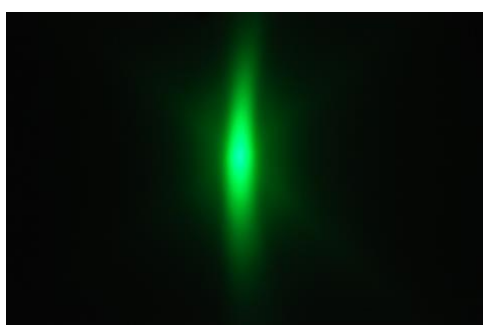
$\theta = -50$



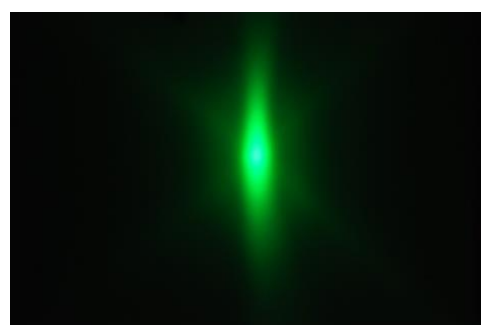
$\theta = -50$



$\theta = -45$



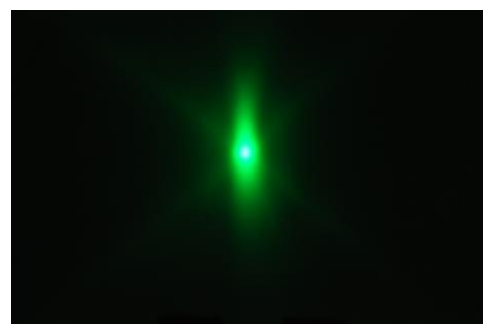
$\theta = -40$



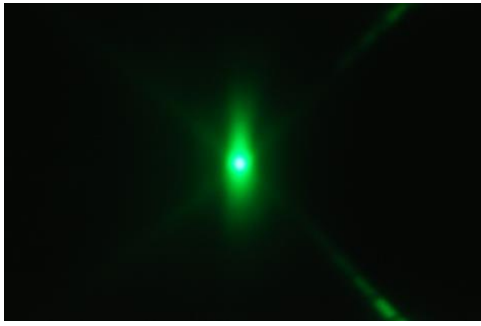
$\theta = -35$



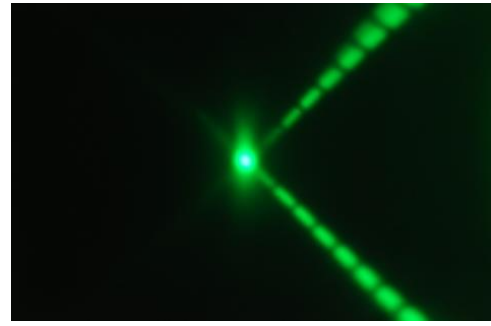
$\theta = -30$



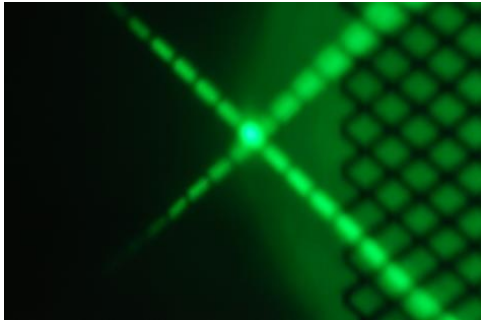
$\theta = -25$



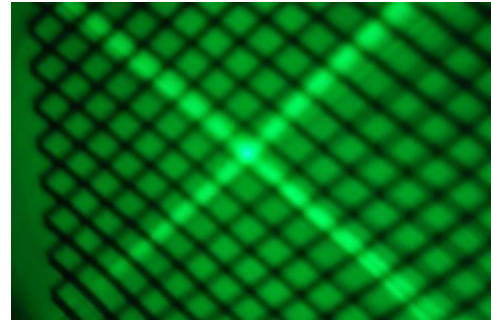
$\theta = -20$



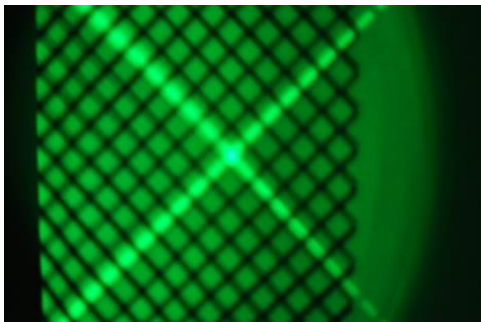
$\theta = -15$



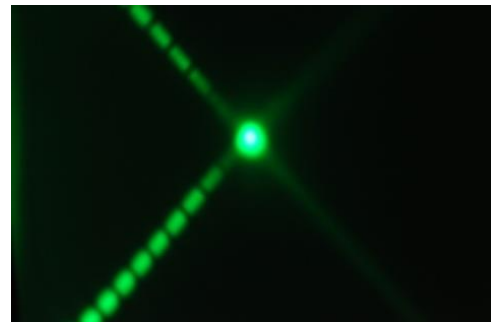
$\theta = -10$



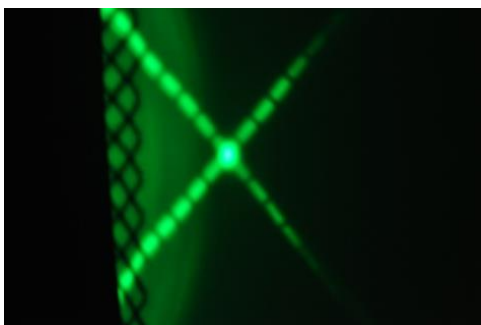
$\theta = -5$



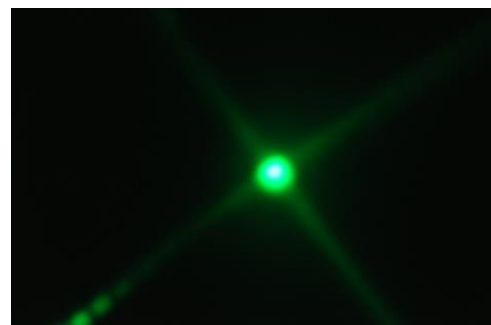
$\theta = 5$



$\theta = 10$



$\theta = 15$



$\theta = 20$

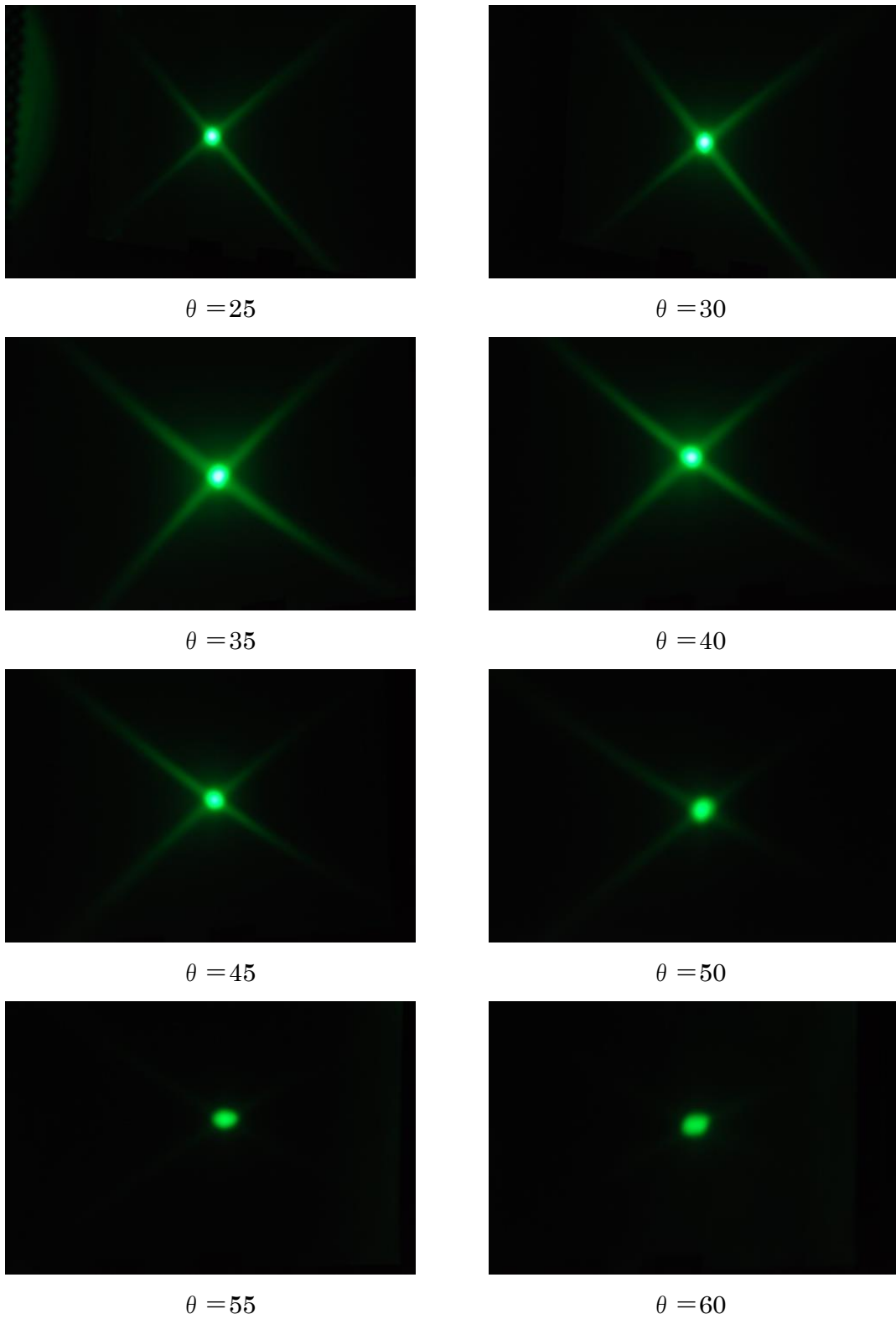


Fig. 3-15. Aerial LED image that is formed crossed-mirror array.

3-8 直交ミラーアレイの視野角

直交ミラーアレイの視野角は直交ミラーアレイの大きさ、光源と直交ミラーアレイの距離、直交ミラーアレイへの光の入射角および光源の照射角の広さから求めることができる。直交ミラーアレイの結像における光線のうごきは面対称であることから、直交ミラーアレイと光源の距離を d 、直交ミラーアレイへの入射角を ϕ 、直交ミラーアレイの光軸から端までの距離をそれぞれ a 、 b とすると視野角 θ は、

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1}\left(\frac{a \sin \phi}{d + a \cos \phi}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{b \sin \phi}{d - b \cos \phi}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{d(a+b) \sin \phi}{d^2 + d(a-b) \cos \phi - ab}\right) \quad \dots (1)\end{aligned}$$

この時の視野角は光源の照射角より大きくなることはない。そのため、 $\theta \leq \theta'$ の時

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d(a+b) \sin \phi}{d^2 + d(a-b) \cos \phi - ab}\right) \quad \dots (2)$$

$\theta \geq \theta'$ の時

$$\theta = \theta' \quad \dots (3)$$

となる。

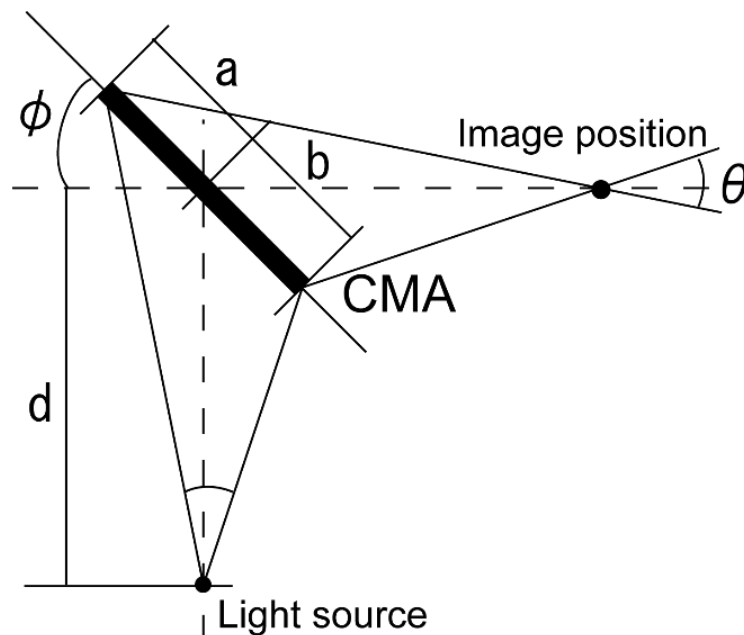


Fig. 3-16. Schematic illustration of forming aerial image by CMA.

ただし、この計算によって出すことができるのは理想的な厚さの直交ミラーアレイを使った場合の最大の視野角である。理論上の視野角が十分に広いとき視野角を最大にしたい場合、直交ミラーアレイの厚みを場所ごとに変える必要がある。

光源と直交ミラーアレイの距離の変化における視野角の変化を測定した。光源には LED を使用した。LED の照射角は 24 度である。使用した直交ミラーアレイの大きさは 142×142 mm である。光軸は直交ミラーアレイの中心をとる。測定結果と理論値を Fig.3-17.に示す。測定値は理論値に近い値をとった。これより理論式は十分に有効であると考えられる。

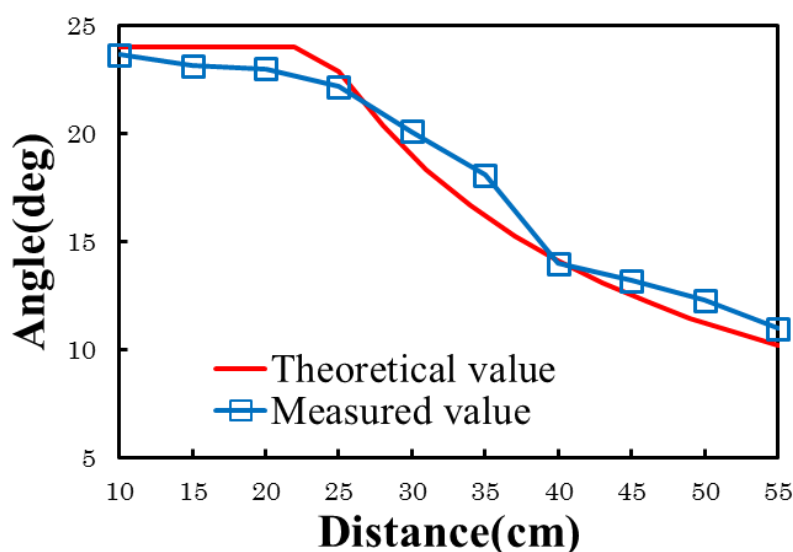


Fig. 3-17. Relationships between viewing angle and distance between CMA and light source. Red line is theoretical value, and blue line is measured value.

3-9 シミュレーションを用いた直交ミラーアレイの設計

光線の直交ミラーアレイへの入射角の変化により 2 回反射する確率が変化することで形成される空中像の光強度が変化することが分かっている。また、入射角ごとの直交ミラー開口壁面で 2 回反射する確率は直交ミラーアレイの厚みや開口の大きさによって変化する。直交ミラーアレイをより効率的に利用する為の指標として、開口の大きさと厚さおよび光源と直交ミラーアレイの距離と、入射角の変化による形成される空中像の光強度の関係についてシミュレーションによって調査した。シミュレーションには Light Tools を使用した。

まず、直交ミラーアレイの開口と厚さの比の違いによる最適な入射角の変化を明らか

にする。厚さの異なる直交ミラーアレイそれぞれで入射角の変化における空中像の光強度の変化を測定した。シミュレーションによって各厚さの直交ミラーアレイを使用した場合の空中像の入射角変化による光強度の変化を明らかにした。シミュレーションに使用した光学系の構成を Fig.3-18 に示す。直交ミラーアレイの厚さが 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm の場合をシミュレーションした。直交ミラーアレイの開口の大きさは 4×4 に統一し、鏡面の厚みは 1 mm, 全体の大きさは 142 mm とした。光源と直交ミラーアレイの距離は 300 mm とし、光源は波長 550 nm の単色光源とする。

各厚さの直交ミラーアレイにおける入射角変化による光強度変化を Fig.3-19 に示す。厚さによって光強度が最大になる光線の入射角が変化していることが分かる。直交ミラーアレイの厚さが厚いほど強度がピークを取る直交ミラーアレイへの入射角が小さくなっている。入射角が小さい場合、直交ミラーアレイが薄いと 1 回しか反射が行われな光線の割合が多くなるため直交ミラーアレイの厚みが厚いほど光線の利用効率は高くなる。入射角が大きい場合、直交ミラーアレイが厚いと 3 回以上の反射がおきてしまうため 2 回反射される光線の割合が減ってしまうので直交ミラーアレイが薄い方が空中像の光強度が高くなる。以上の理由により直交ミラーアレイの厚さによって光強度が最大になる光線の入射角は変化する。

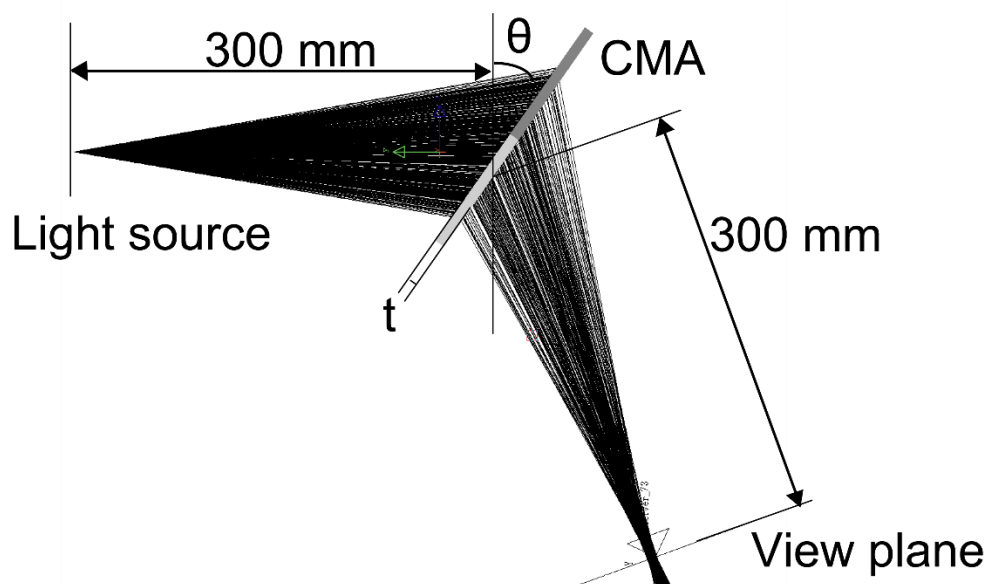


Fig. 3-18. Simulation setups to determine the best incident angle for different thickness of CMAs. Using CMA aperture size of CMA is $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$. Thickness of CMA are 4 mm, 8 mm and 12 mm.

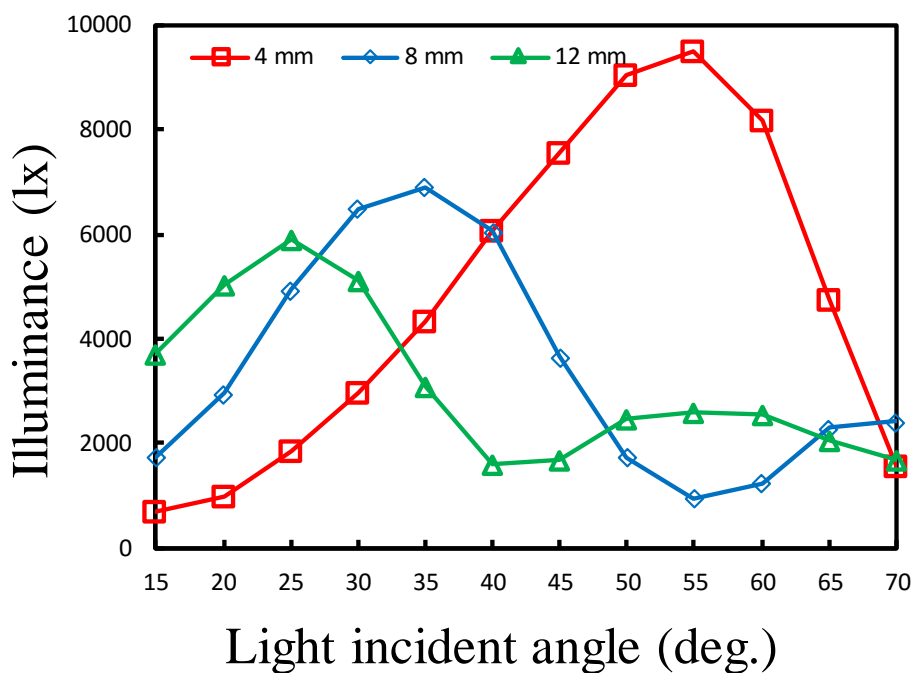


Fig. 3-19. Relationships between illuminance and incident angle for different thickness of crossed-mirror arrays.

Thickness of CMA are 4 mm, 8 mm and 12 mm.

各厚さの直交ミラーアレイの最適な入射角で結像を行ったときの結像点での光強度分布を Fig.3-20 に示す。各最適な光線入射角において直交ミラーアレイによって形成される空中像の大きさが直交ミラーアレイの厚さが厚くなると少しずつ大きくなっていくことが分かる。このことから形成される空中像の大きさは開口の厚さの比によって変化する可能性が在ることが示された。

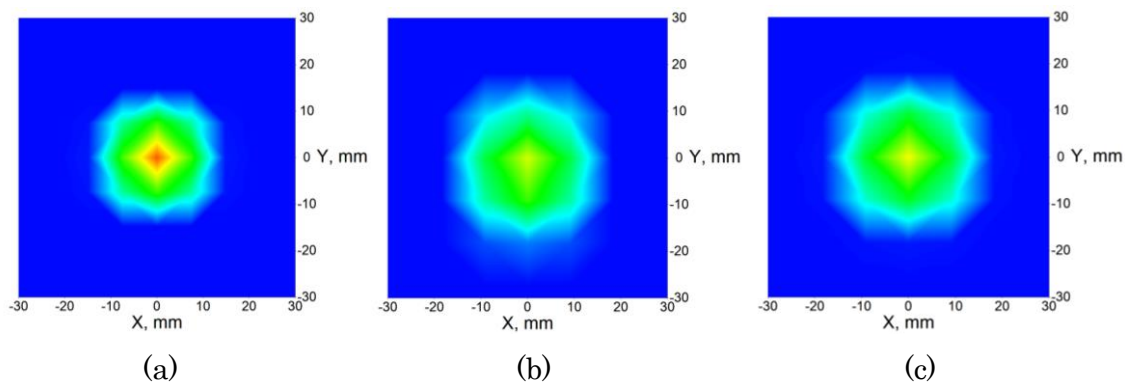


Fig. 3-20. Light distribution at formed position of aerial image by using CMA.

Thickness of CMA are (a) 4 mm, (b) 8 mm and (c) 12 mm.

次に直交ミラーアレイの開口の大きさの違いによる空中像の光強度の変化を明らかにする。開口の大きさと厚さの比が一定の場合における開口大きさの変化による光線の入射角と形成される空中像の光強度の変化をシミュレーションにより測定した。シミュレーションに使用した光学系の構成を Fig.3-21 に示す。3 パターンの開口の大きさにおける入射角の変化における光強度の変化をシミュレーションした。直交ミラーアレイの開口の大きさは $4 \times 4 \text{ mm}$, $9 \times 9 \text{ mm}$, $14 \times 14 \text{ mm}$ とし、開口の大きさと厚さの比が 1 : 1 になるように直交ミラーアレイの厚さをそれぞれ 4 mm, 9 mm, 14 mm に設定した。全体の大きさは 142 mm である。光源と直交ミラーアレイの距離は 300 mm とし、光源は波長 550 nm の単色光源を使用した。

各開口の大きさにおける入射角変化による光強度変化を Fig.3-22 に示す。開口の大きさが 4 mm, 9 mm とともに入射角が 55 度の時に光強度がピークを取っているが 14 mm の時は 50 度でピークを取っている。これにより、開口が大きくなるほど最適な入射角は小さくなるがその影響は開口比による変化に比べて小さいものと考えられる。また、シミュレーションにより測定した範囲においては開口の大きさが小さいほど光強度が強くなるのが分かった。これは開口のサイズが小さいほど結像に使用できる鏡面の数が増えるためであると考えられる。

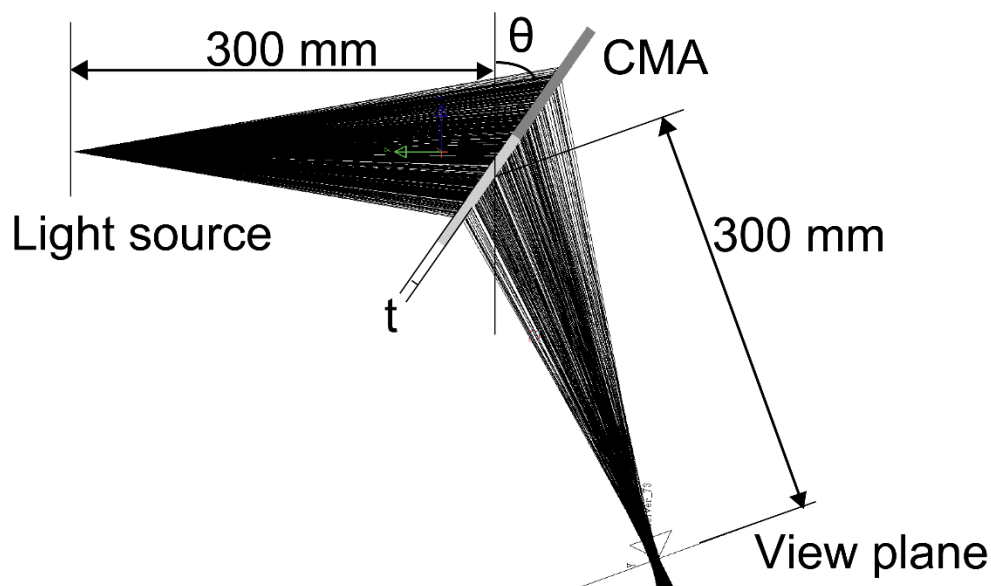


Fig. 3-21. Simulation setups to determine the best incident angle for different aperture size of CMAs. Using CMA aperture size of CMA are $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, $9 \times 9 \text{ mm}$ and $13 \times 13 \text{ mm}$.

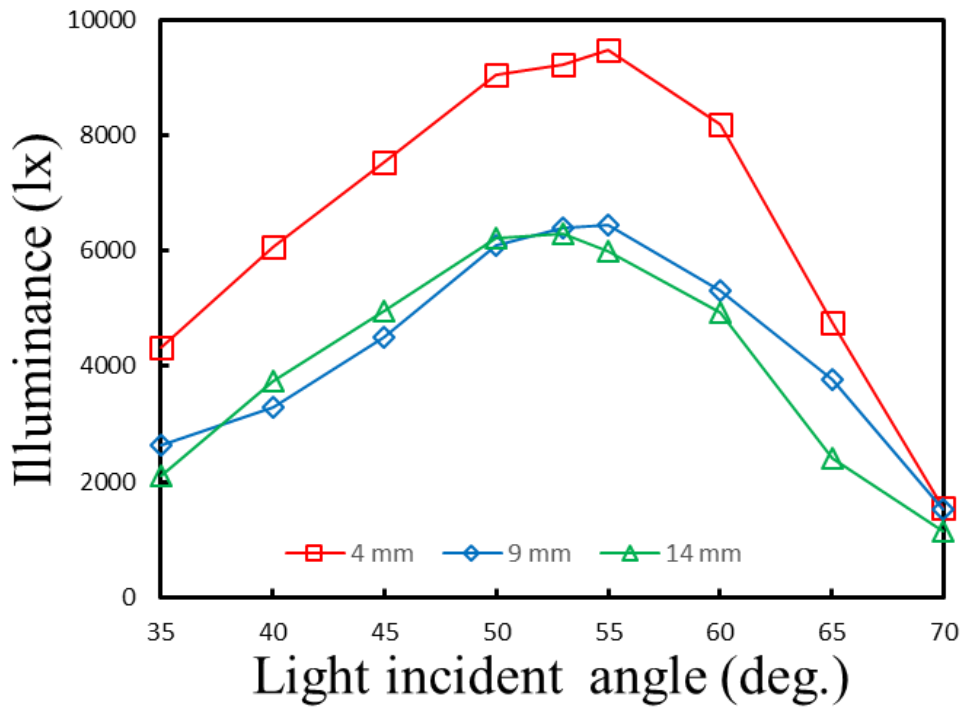


Fig. 3-22. Relationships between illuminance and incident angle for different aperture size of CMAs. Using CMA aperture size of CMA are 4 mm × 4 mm, 9 × 9 mm and 13 × 13 mm.

開口の大きさの異なる直交ミラーレイの最適な入射角で結像を行ったときの結像点での光強度分布をそれぞれ Fig.3-23 に示す. 直交ミラーレイの厚さが変化した場合と同様開口のおおき差が大きくなるにつれて形成される像が大きくなっていることが分かる. これにより開口大きさと厚さが形成される空中像の大きさを決める要因になっていることが分かる.

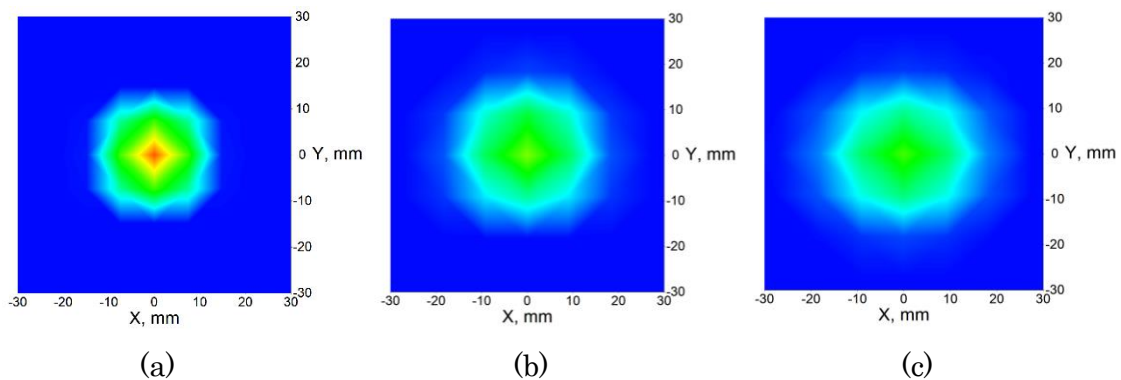


Fig. 3-23. Light distribution at formed position of aerial image by using CMA. Using CMA aperture size of CMA are (a) 4 mm × 4 mm, (b) 9 × 9 mm and (c) 13 × 13 mm.

直交ミラーアレイと光源の距離を変化させた場合光線の入射角の変化の空中像の光強度の変化をあきらかにする。直交ミラーアレイの開口のサイズおよび厚さは一定とし、光源から直交ミラーアレイまでの距離を変化させた場合の光線の入射角と空中像の光強度の変化をシミュレーションにより測定した。シミュレーションに使用した光学系の構成を Fig.3-24 に示す。4 パターンの開口の大きさおける入射角の変化における光強度の変化をシミュレーションした。直交ミラーアレイと光源の距離は 200 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm でシミュレーションを行った。直交ミラーアレイは大きさ 142 mm × 142 mm, 開口の大きさ 4mm×4mm, 厚さ 8mm に設定した。

各距離における入射角変化による光強度変化を Fig.3-25 に示す。光源と直交ミラーアレイの距離が 200 mm, 300 mm とともに入射角が 55 度の時に光強度がピークを取っているが 500 mm, 700 mm の時は 50 度でピークを取っている。変化量としては少ないが、光源と直交ミラーアレイの距離が遠くなるほど最適な入射角は小さくなっていることが分かる。光源と直交ミラーアレイの距離も開口の大きさ同様開口と厚さの比に比べれば大きな影響はないが、直交ミラーアレイを最適化するためには必要な項目であると考えられる。

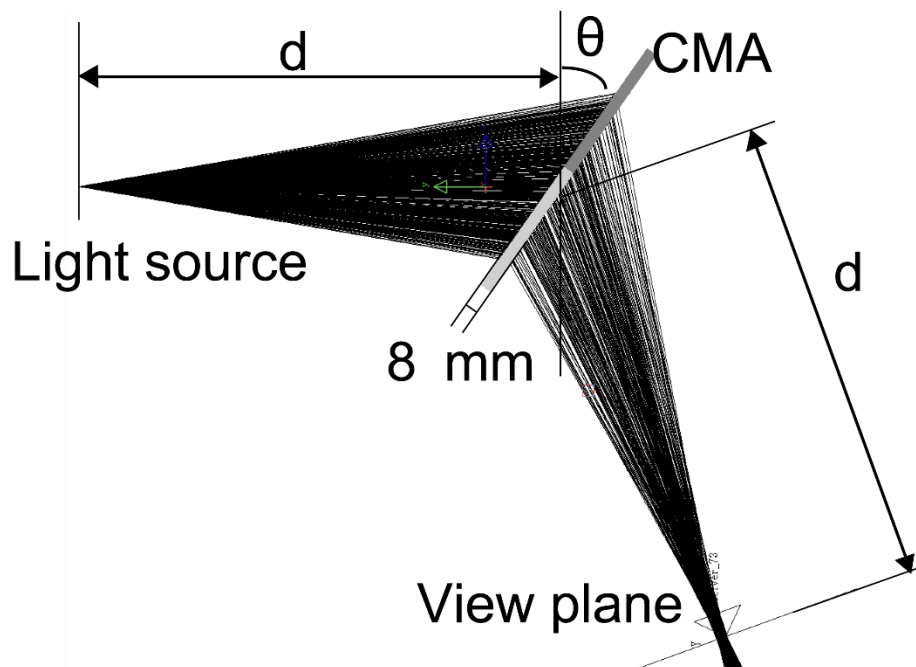


Fig. 3-24. Simulation setup to determine the best incident angle for different distance between crossed-mirror array and light source. Distance of Simulated distance were 200, 300, 500 and 700 mm.

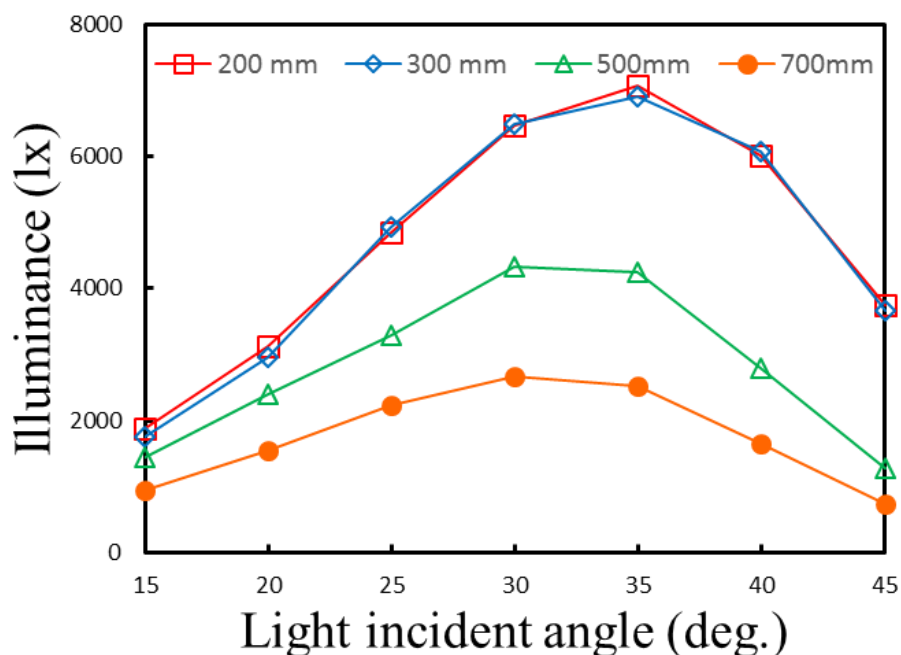


Fig. 3-25. Relationships between illuminance and incident angle for different distance between crossed-mirror array and light source. Distance of Simulated distance were 200, 300, 500 and 700 mm.

結像距離を変化させ場合の直交ミラーアレイの最適な入射角で結像を行ったときの結像点での光強度分布を Fig.3-26 に示す。結像距離の変化では像の大きさに目立った変化は見られない。このことから直交ミラーアレイによる空中像の形成距離は形成される空中像の大きさには影響を与えないことが分かる。つまり、形成される空中像の大きさは主に直交ミラーアレイの厚さと開口の大きさによって決定されることが一連のシミュレーションによってわかった。

以上より、直交ミラーアレイの最適な光線の入射角は開口と厚さの比や開口の大きさ、光源と直交ミラーアレイの距離などによって変化することが分かった。またそれに合わせて形成される像の広がり量も変化していることが分かった。これより、より直交ミラーアレイを効率的に運用するためには使用状況に合わせた直交ミラーアレイの設計とフィッティングが必要になると考えられる。

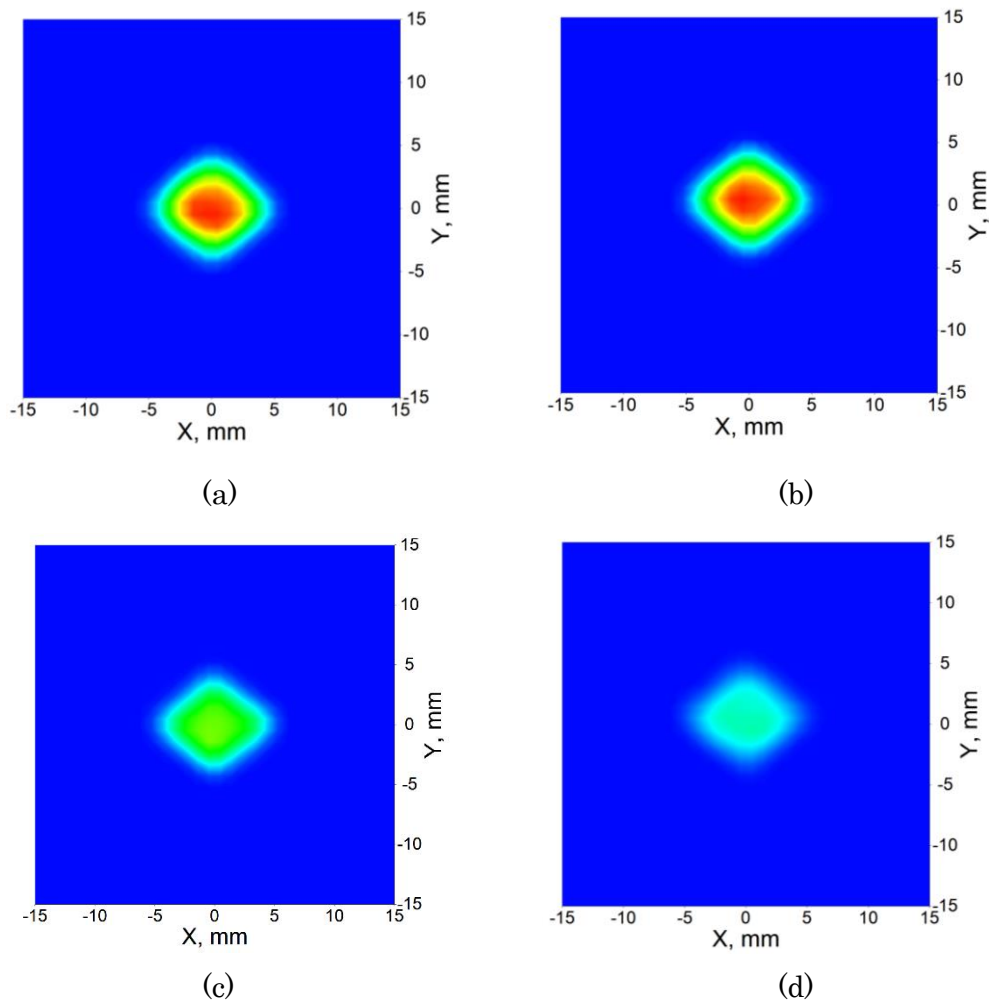


Fig. 3-26. Light distribution at formed position of aerial image by using CMA.
Distance of Simulated distance were (a) 200, (b) 300, (c) 500 and (d) 700 mm.

3-10 第3章まとめ

本章では研究におけるキーデバイスである直交ミラーアレイおよびそれによって形成される空中像について述べた。直交ミラーアレイは2面コーナリフレクターの原理により開口壁面で2回反射した光線を収束することで空中像を形成する。そして、形成される空中像は実像であり、距離が反転するため光源が重なり合っている場合クルージョンの矛盾が発生する。これは直交ミラーアレイによる結像を2回行うことで解消することが可能である。また、光線が直交ミラーアレイに入射する角度によって光強度が変化することが分かっている。光強度が最大となる最適な入射角は直交ミラーアレイの開口の大きさ、厚み直交ミラーアレイから光源までの距離によって変化するので使用する状

況にあわせてフィッティングを行う必要があることがシミュレーションによってわかっている。

そして、直交ミラーアレイは2面コーナリフレクターの原理を用いて反射によって結像を行うため反射で来るものであれば原理上収束、結像が可能ということである。この特性を利移用して本論文ではマルチモーダルな空中像の形成を行う。

第4章 多方向表示のための直交ミラーアレイの配置

多くの場で使用するためには複数の場に柔軟に空中像を表示できる必要がある。しかし、直交ミラーアレイは片面ミラーによって構成されているため、光の入射方向により結像に使用できる鏡面の数が増減する。それにより、前章で述べたように形成される空中像の光強度や大きさなどが変化することが分かっている。本章では複数方向に同時に空中像を形成する場合の直交ミラーアレイの構成、手法について検討する。

4-1 鏡面と非鏡面による反射

直交ミラーアレイは空中像の形成に鏡面を使用した場合と非鏡面を使用した場合で形成される空中像の質に差が生じることが分かっている。そこで、直交ミラーアレイに使用されているステンレスミラーの鏡面と非鏡面によって反射された光線の観察を行う。スクリーンに投影された鏡面および非鏡面の反射光を Fig. 4-1 に示す。光源にはレーザーポインターを使用している。鏡面による反射光は特に光線が広がることもなく通常の反射が行われていることが分かる。対して非鏡面による反射光は、垂直方向に対して大きく広がっている。これは散乱によるものである。つまり非鏡面における反射では反射だけでなく散乱も起きているということが分かる。この散乱がいて一定方向に対して大きく起きているのはこの散乱の原因が直交ミラーアレイの製作過程で起きる一定のパターンを持ったキズによって起きているのではないかと考えている。そして非鏡面によって形成される空中像に像の広がりが発生する原因はこの非鏡面での反射の際に起きる散乱が原因であると考えられる。

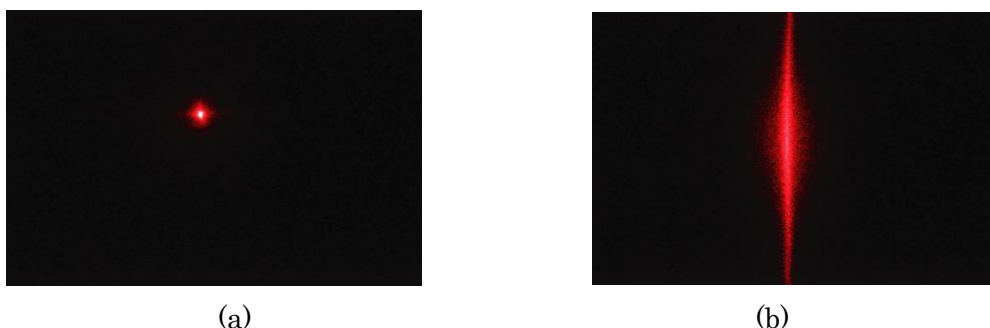


Fig. 4-1 Light is reflected by Stainless steel mirror with (a) mirror side (b) backside of mirror.

4-2 直交ミラーアレイによる 2 方向空中表示

通常直交ミラーアレイは 1 方向に向けて結像する場合、鏡面 2 面のみを使用して結像を行う。しかし直交ミラーアレイは片面ミラーによって構成されている。そのため 2 方向に同時に空中像を形成する場合、Fig.4-2 に示されているように片方へは鏡面 2 面を使って結像した空中像を表示できるが、2 つ目の方向へは非鏡面 2 面で結像を行うことになり空中像の画質が著しく劣化する。これにより、形成される 2 つの空中像の質に明確な差ができてしまう。

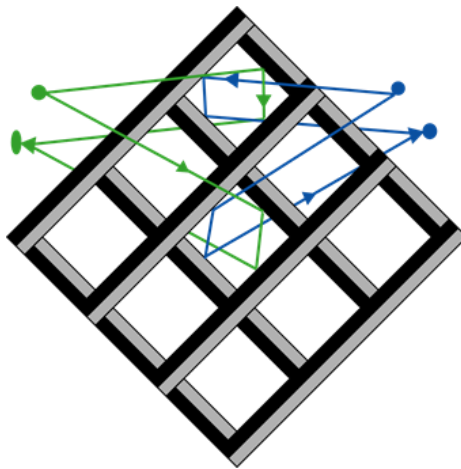


Fig. 4-2. Configurations of CMA. Mirror surface and backside are indicated in gray and black, respectively.

これを解消するために Fig. 4-3 のように直交ミラーアレイを 90 度回転させて配置することを提案する。この配置の場合ならば左右どちらの方向から光が入射したとしても鏡面 1 面と非鏡面 1 面を使用した結像になるため画質は等しくなる。

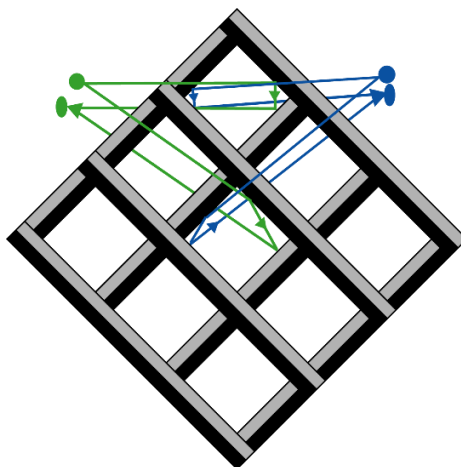


Fig. 4-3. Configurations of CMA. Mirror surface and backside are indicated in gray and black, respectively.

この配置が有効であるかを実際に 2 方向へ空中像を表示するための配置で直交ミラーアレイを使用した場合の空中像の角度依存性を測定した。測定に用いた光学系を Fig.4-4 に示す。光源から直交ミラーアレイの距離を 50cm とし、光源には緑色 LED を使用した。直交ミラーアレイは大きさ 142 mm×142 mm, 開口の大きさ 4mm×4mm, 厚さ 8mm のものを 1 枚使用した。スクリーンは直交ミラーアレイに対して光源と面対象となる位置に置く。このスクリーンはあくまで空中像を観測しやすくするためのものであり、スクリーンがなくても空中像を確認することは可能である。光源と直交ミラーアレイと空中像が水平面内に位置する配置において直交ミラーアレイを垂直軸に対して回転さる。入射角が正の場合も負の場合も直交ミラーアレイは鏡面と非鏡面を 1 面ずつ使用して空中像を形成している。

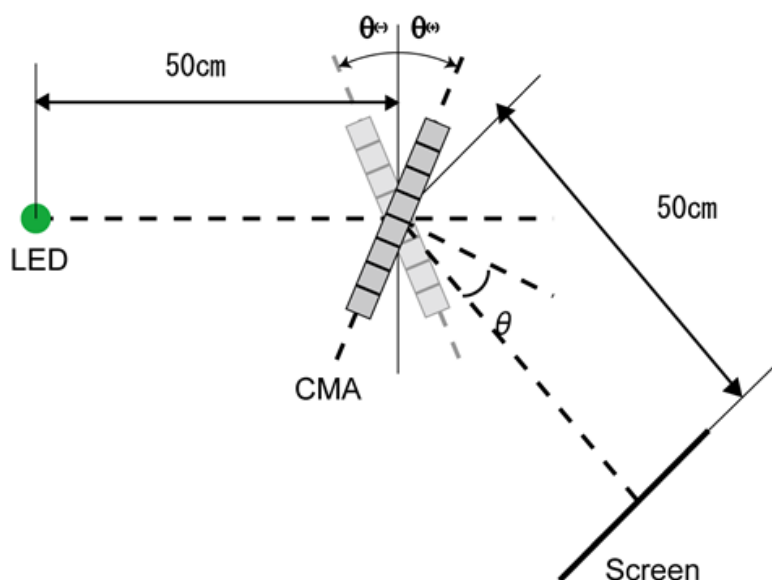


Fig.4-4. Experimental setup to investigate reflection angle limit to form aerial image of an LED by use of CMA in configuration for dual-view aerial LED image.

Fig.4-5 に 2 方向表示のための配置を行った直交ミラーアレイにより形成される空中像の光強度の角度依存性を示す。光強度は入射角の正負に関わらず入射角 30 度でピークをとり、強さも同程度であった。また、半値全幅も共に 40 度であり縦軸(入射角 0 度)に対して左右で対称であった。光強度は鏡面 2 回によって形成される空中像よりも弱い。光源に使用する LED が高輝度であるため何の問題もなく視認できるだけの光強度を保っている。以上より 2 方向表示のための配置を使用した場合どちらの方向に空中像を表示しても同様の光強度を持った空中像を形成することが可能であることが判明した。

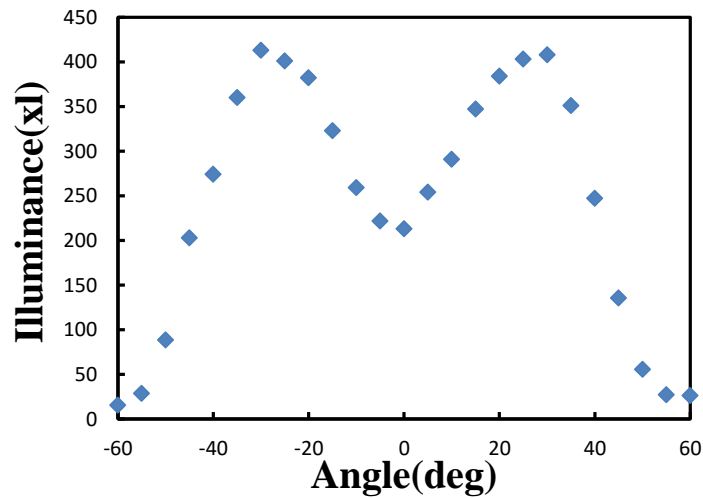


Fig. 4-5. Relationships between reflection angle and luminance intensity of the aerial LED image in configuration for dual-view aerial LED image.

Fig.4-6 に 2 方向表示のための配置を行った直交ミラーアレイにより形成される空中像の広がり角度依存性を示す. 水平方向は通常配置と同じく正負に関係なく一定の値である. 垂直方向において像の広がり発生するが, 光強度の角度依存性同様に縦軸に対して左右対称である. そして, 非鏡面 2 面のみで結像を行った場合よりも像の広がり弱くなっている. 以上より 2 方向表示のための配置を使用することで左右どちらの方向に空中像を表示したとしても同程度の画質を表示することが可能であることが判明した. また, 非鏡面 2 面による結像に比べて像の広がりが少ない.

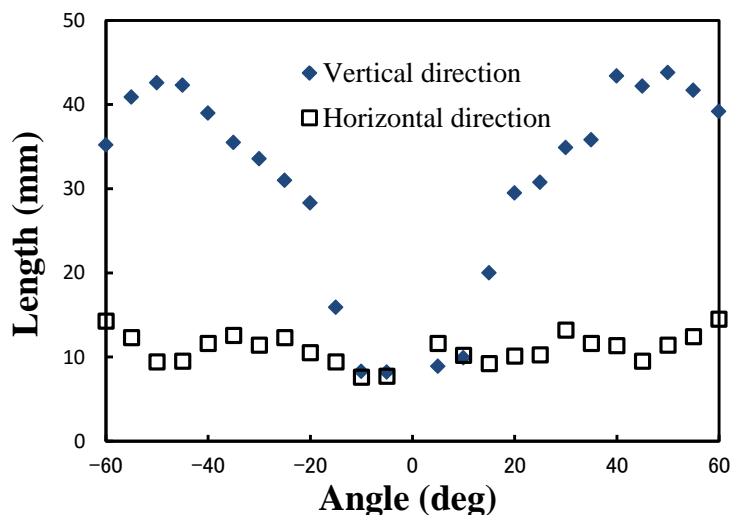
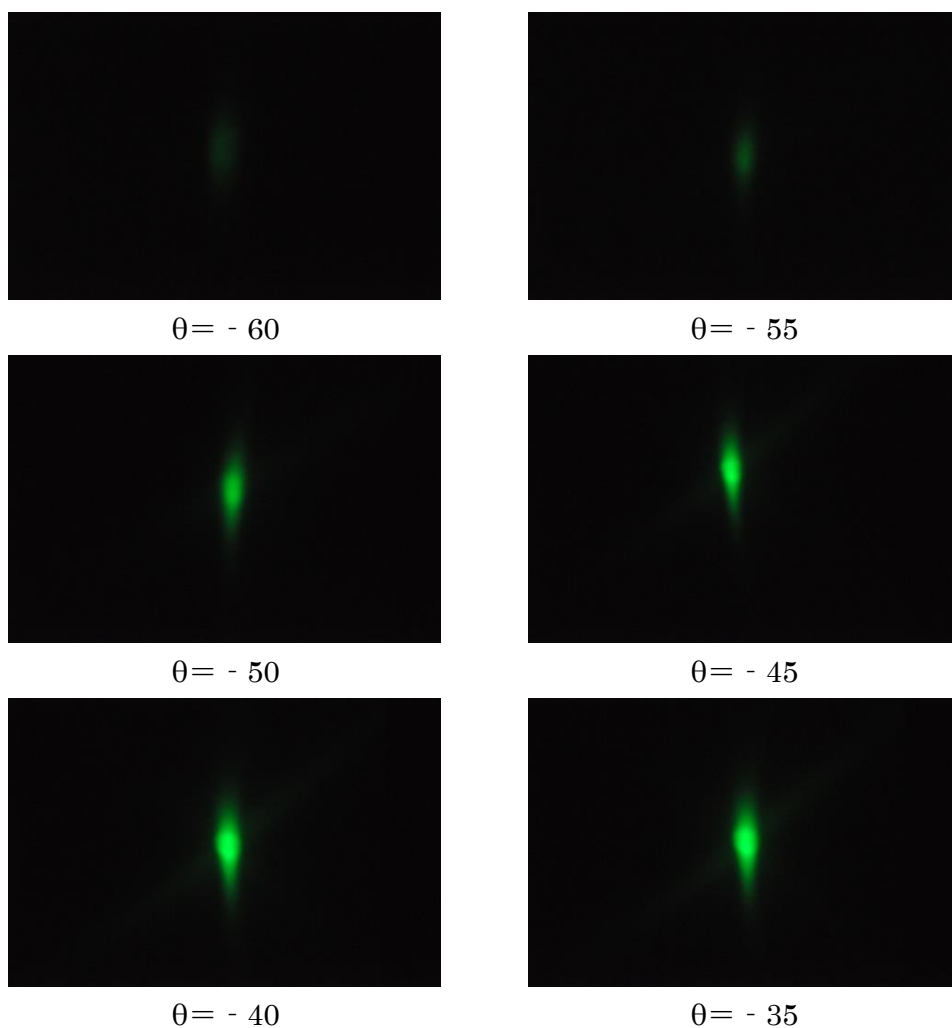
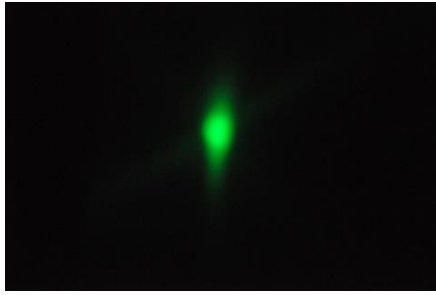


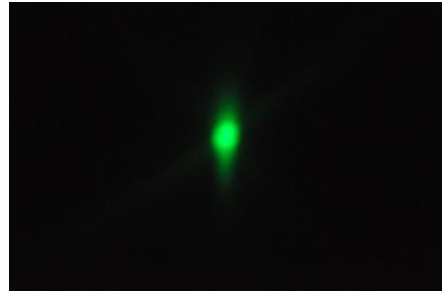
Fig. 4-6. Relationships between reflection angle and the height and width of the aerial LED image in configuration for dual-view aerial LED image

各入射角での空中像の画像を Fig.4-7 に示す. どの角度においても垂直方向に像の広がりがあるが, 入射角の正負に関わらず角度が同じであれば同様の画像を取得することに成功している. 事前に像に広がりが発生することが分かっていれば事前に補正が可能である上に LED を光源に使用する場合は LED の欠点を補完するのにも使用できる. そのため, どちらの方向にも同程度の広がりを持つ空中像を形成できる構成は 2 方向表示に向いているといえる. 入射角 0 度周辺で発生する斜め方向への光は直交ミラーアレイによる空中像形成時に発生する 1 回反射成分の光線である. 入射角が小さい場合空中像の観察位置から視野に入るため邪魔になるが, 入射角が十分に大きい場合像が形成される位置の関係から結像成分と 1 回反射成分は分解されるため問題はない.

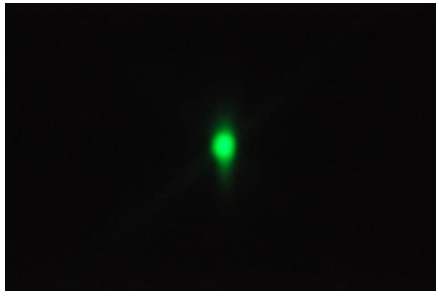




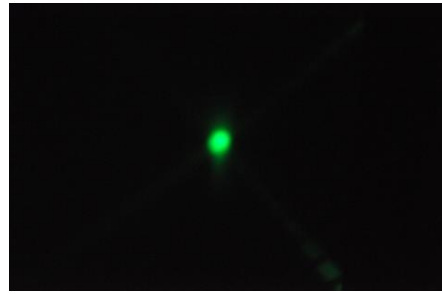
$\theta = -30$



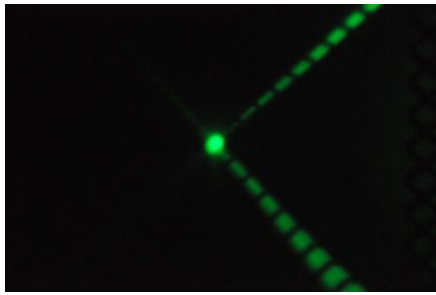
$\theta = -25$



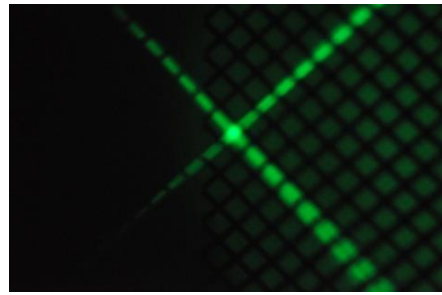
$\theta = -20$



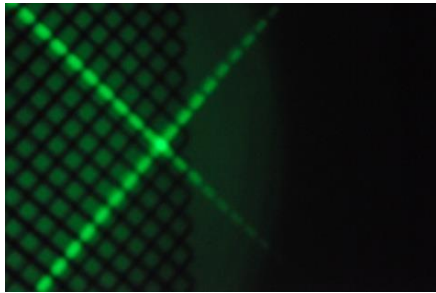
$\theta = -15$



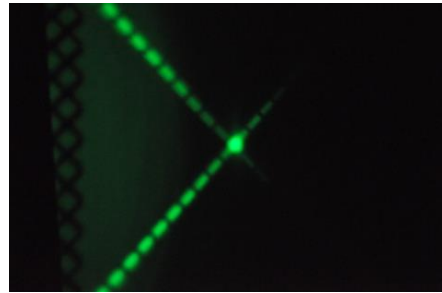
$\theta = -10$



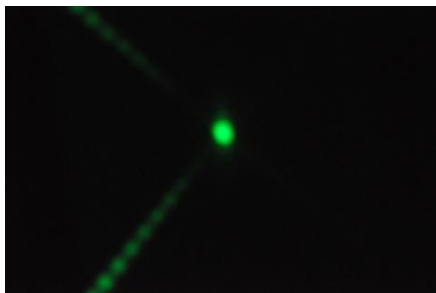
$\theta = -5$



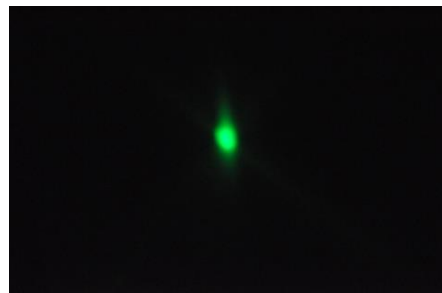
$\theta = 5$



$\theta = 10$



$\theta = 15$



$\theta = 20$

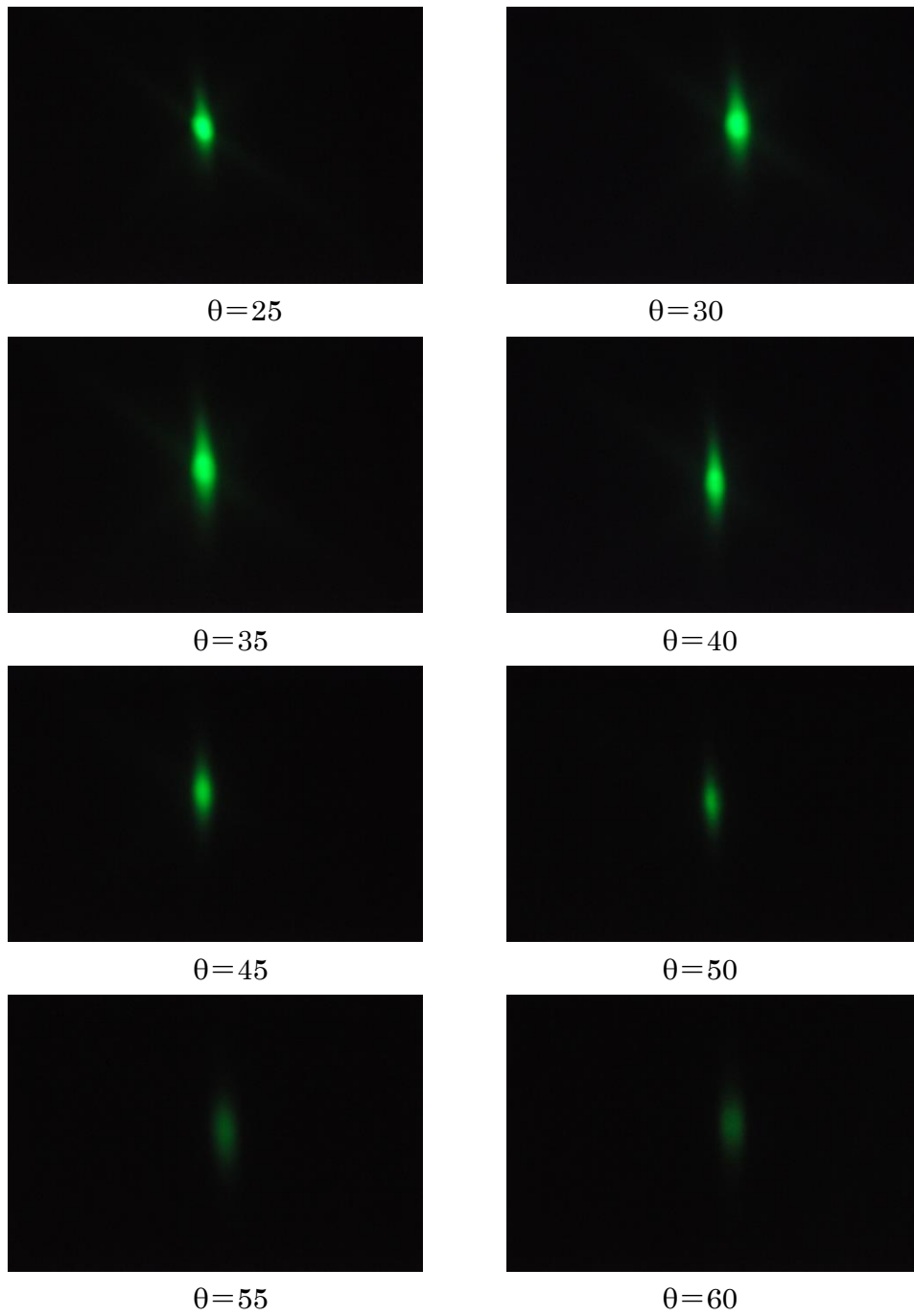


Fig. 4-7. Aerial LED image in configuration for dual-view aerial LED image.

4-3 4方向への同時表示のための直交ミラーアレイの構成

2方向への表示のための直交ミラーアレイの構成はあくまで従来の直交ミラーアレイを2方向表示に合わせて使用するための手法であり、2方向以上の方向に同時に表示しようとした場合には対応していない。そもそも2方向表示のための直交ミラーアレイの構成は厳密には使用する直交ミラーアレイの設置角度を本来とは違う角度に配置しているだけであるため従来の直交ミラーアレイと変わらない。従来の直交ミラーアレイを使って4方向に同時に空中像を表示しようとした場合の様子を Fig.4-8 に示す。従来の直交ミラーアレイは鏡面が一定の方向を向くように組み合わせられている。これにより1方向のみにではあるが最も質の良い空中像を形成できるように構成されている。そのため、鏡面のみで結像される空中像、非鏡面のみで結像される空中像、鏡面と非鏡面を1度ずつ使って結像される空中像の3種類の画質の空中像が形成されることになる。これでは4方向に表示を行った場合形成される空中像の質に明らかな差ができてしまう。そのため従来の構成の直交ミラーアレイでは4方向表示に向いていない。

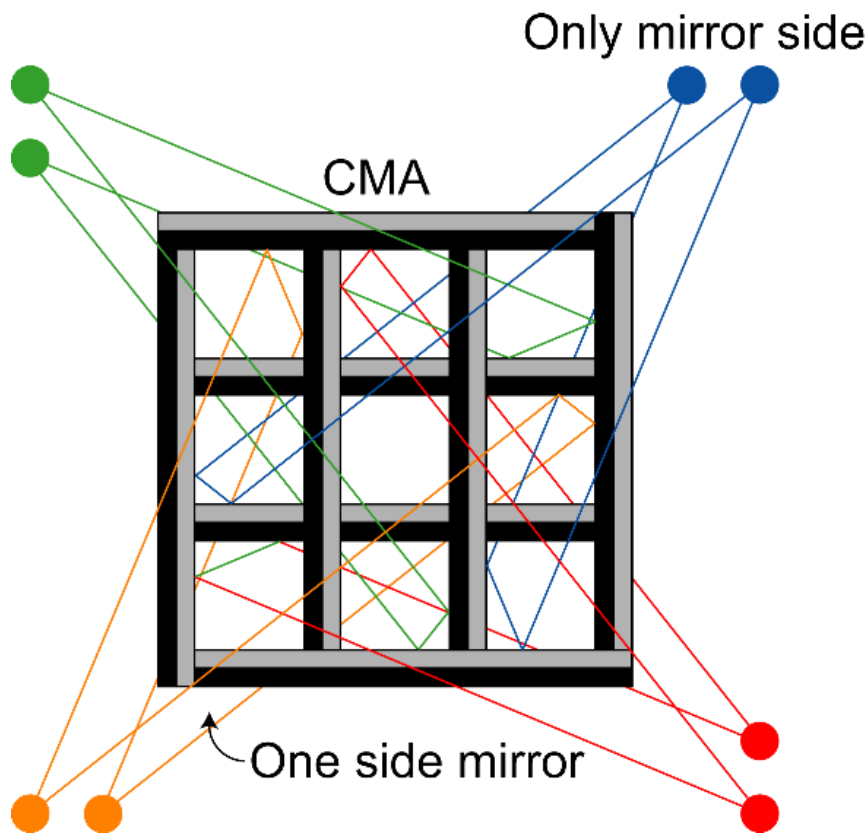


Fig. 4-6. Configurations of conventional CMA made of one-side mirrors. Mirror surface and backside are indicated in gray and black, respectively.

そのため4方向に空中像を表示する場合、結像に使用される鏡面、非鏡面の条件が4つの方向で等しくなるように直交ミラーアレイを組み替える必要がある。4方向表示のために組み替えた直交ミラーアレイを Fig.4-9 に示す。4方向への同時表示をするための直交ミラーアレイの構成として鏡面がすべて直交ミラーアレイの中心を向くように鏡面の方向を組み替えた。これにより、4方向のどの方向へ向けて空中像を形成しても、鏡面2面による結像、非鏡面2面による結像、鏡面と非鏡面を使用した結像の3パターンすべてを使用して空中像を形成するようになる。

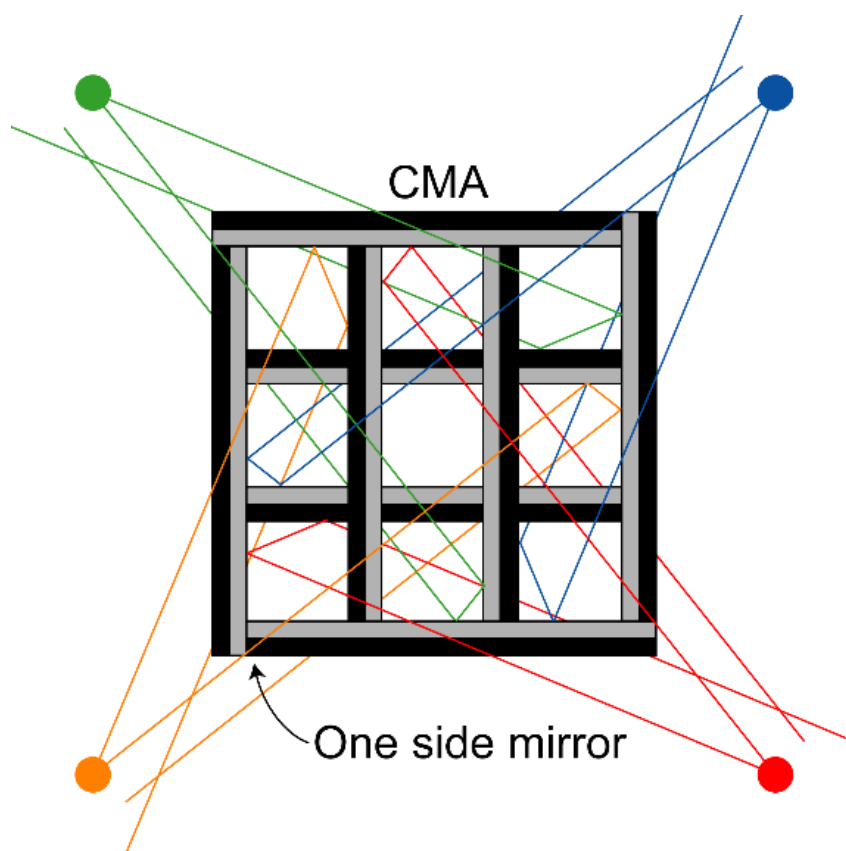


Fig. 4-9. Configurations of CMA for four direction view made of one-side mirrors.
Mirror surface and backside are indicated in gray and black, respectively.

この4方向のための構成の直交ミラーアレイによって形成される空中像の光強度の角度依存性の測定を行った。直交ミラーアレイの角度を水平方向に変化させた場合と垂直方向に変化させた場合の光強度の変化を測定した。測定に使用した光学系を Fig.4-10 に示す。光源から直交ミラーアレイの距離を 300 mm とし、光源には緑色 LED を使用した。直交ミラーアレイは大きさ 142 mm×142 mm、開口の大きさ 4 mm×4 mm、厚さ 8 mm のものをそれぞれの構成で 1 枚ずつ使用した。

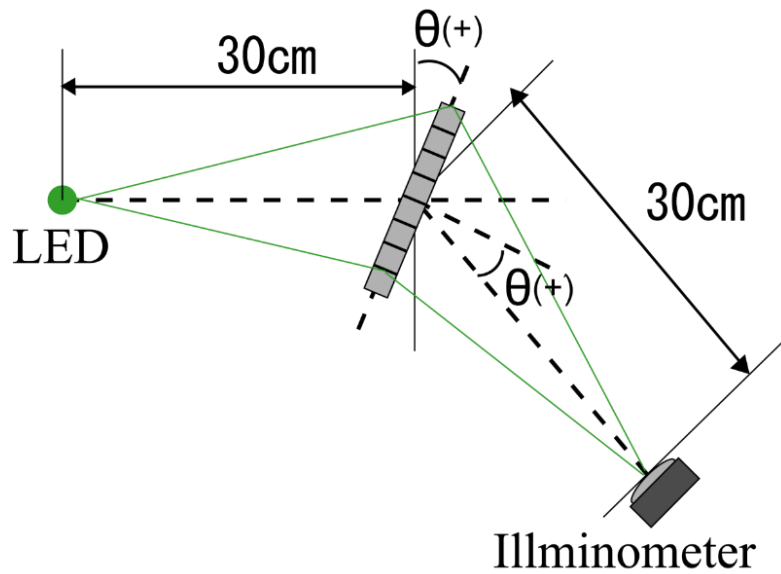


Fig. 4-10. Experimental setup to investigate reflection angle limit to form aerial image of an LED by use of CMA in configuration for four-view aerial LED image.

4 方向表示のための構成の直交ミラーアレイの角度を水平方向に変化させた場合と垂直方向に変化させた場合の光強度の変化をそれぞれ Fig.4-10 に示す. 垂直, 水平方向の正負ともに同じ角度で光強度のピークを取り同様の光強度を取っている. また, 各角度での変化も同様の変化をしている. このことより 4 方向表示のための光強度を均等にすることに成功している.

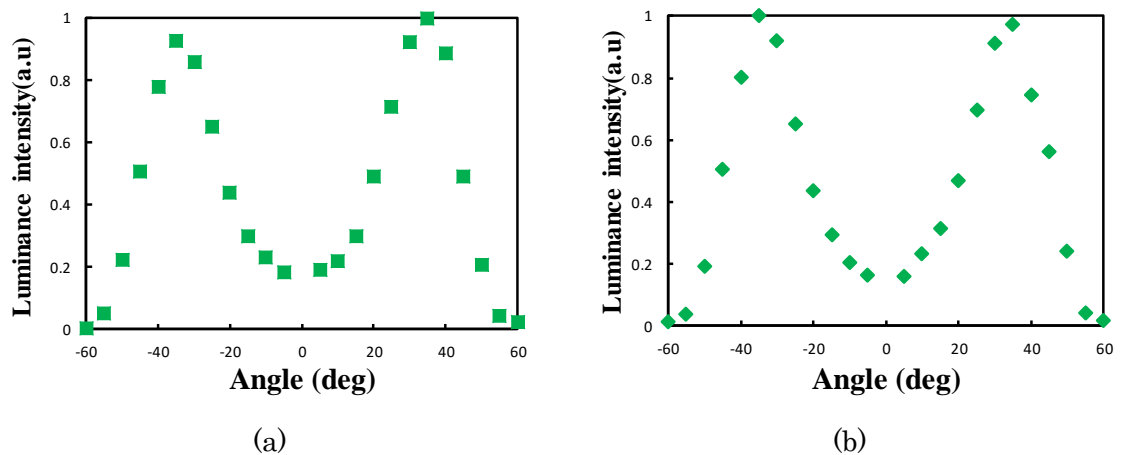


Fig. 4-10. Relationships between reflection angle and luminance intensity of the aerial LED image at (a) vertical direction (b) horizontal direction.

次に実際に 4 方向にそれぞれ別々の空中像を同時に表示する. 表示された空中像を Fig 4-11 に示す. それぞれの方向に LED を光源とした「L」「E」「D」「T」の文字が表示さ

れている. 表示されている空中像はどれか一つに偏った像の広がりがあるわけでもなく同様の空中像の表示に成功している. 以上のより 4 方向用の構成の直交ミラーアレイを使用することで, 4 方向への表示を同じ画質で行うことが可能になる.

直交ミラーアレイは片面ミラーにより構成されており本来 1 方向に空中像を形成することを前提に設計されているため多方向に表示を行うためには構成を再検討する必要がある. これに対して少し構成を変更するだけで十分な対応が可能であることを証明した.

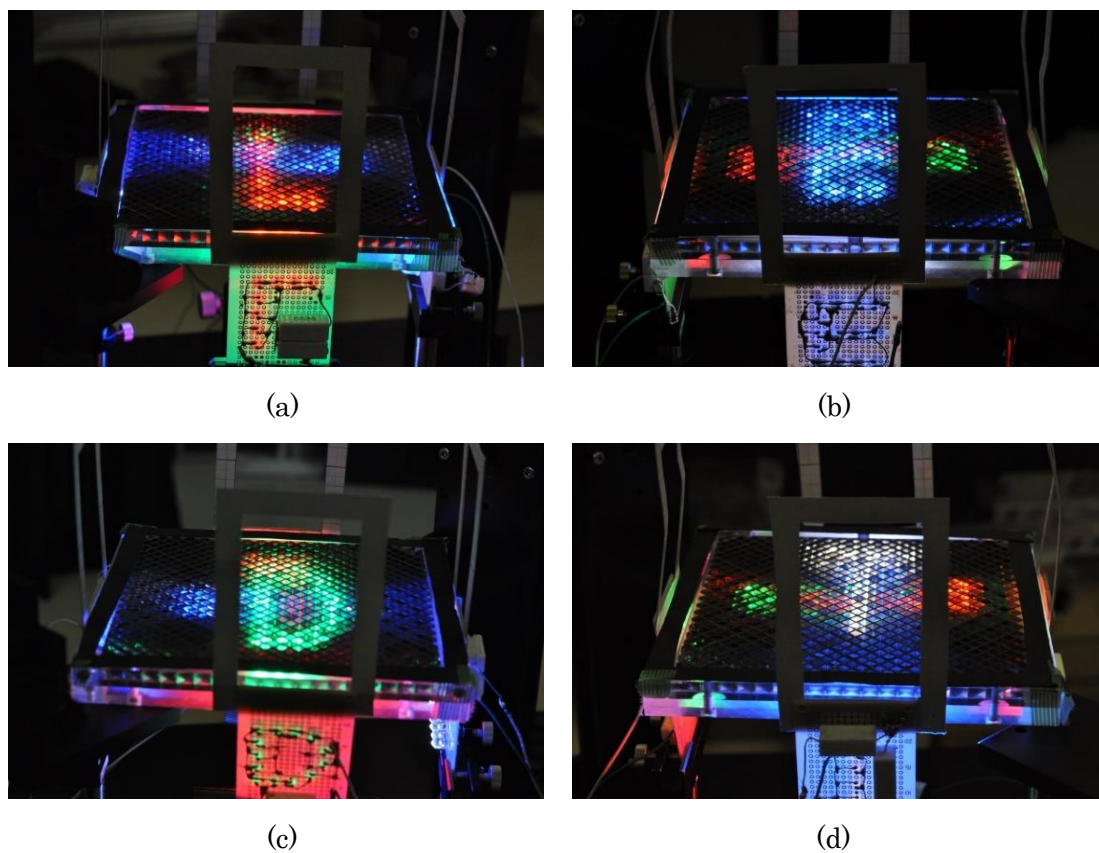


Fig. 4-11. Aerial image that is formed by proposed CMA for four direction view.

4-4 単一光源による 2 方向空中表示のための光学系

これまでの多方向表示は表示方向 1 つに対して必ず 1 つの光源が必要であり, 空中像を表示する方向の数だけ光源を用意する必要がある. また, 直交ミラーアレイは 2 回反射された光のみを空中像の形成に利用することができるため, 0 回反射光など 2 回反射成分の光以外は無駄になっていた. そこで従来結像に使用されない 0 回反射成分

(透過成分)を利用して単一の光源で2つの空中像を同時に表示するための手法を提案する. 具体的にはミラーによって直交ミラーアレイを透過した0回反射成分を反射することでもう一度直交ミラーアレイに入射させることで従来では無駄になっていた0回反射成分の光で結像を行うというものである.

鏡面により0回反射光を利用することで1つの光源から2つの空中像を形成し,光強度分布の測定を行った. 実験系を Fig. 4-12 に示す. 光源にはLEDによる点光源を使用した. 直交ミラーアレイから光源の距離は10cmで, 光の直交ミラーアレイへの入射角は20度である. ミラーは直交ミラーアレイに対して光源と逆方向に10cm離れた場所に光源と向かい合う様に設置した. 直交ミラーアレイからの距離方向および理論上の結像点における横方向の光強度分布を測定した.

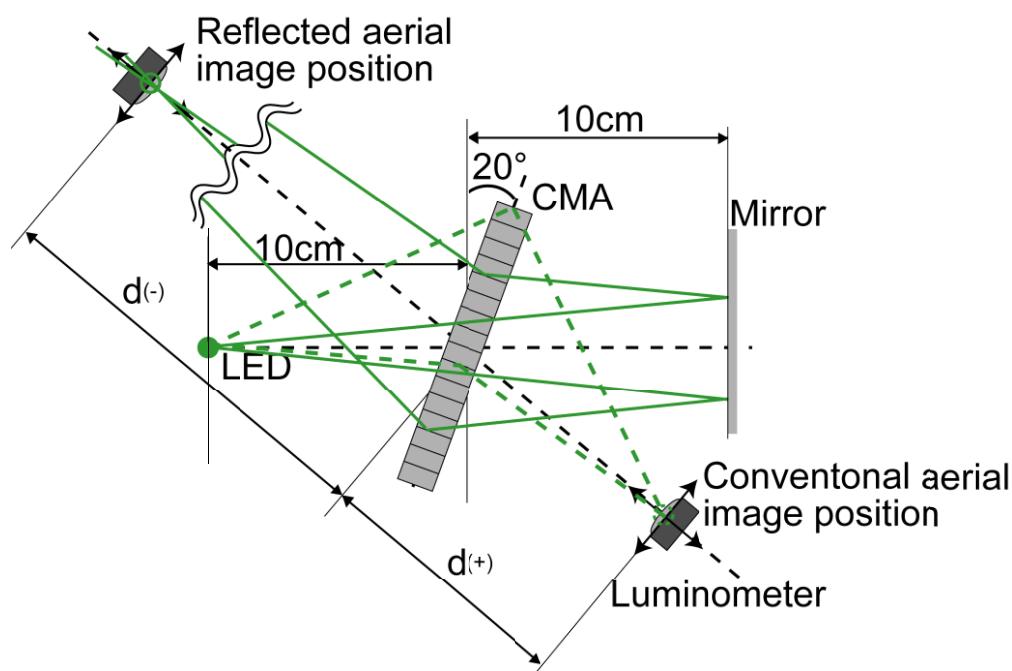


Fig.4-12. Experimental setups to two aerial image by using CMA and mirror.

直交ミラーアレイとミラーによって形成された2つの空中像の光強度分布を Fig. 4-13 に示す. 距離方向, 横方向の光強度は共に理論上の収束点において光強度がピークを持っている. これにより2つの空中像がそれぞれの方向に形成されていることがわかる. 2つの空中像の光強度に大きな差があるが, 光源から直交ミラーアレイに入射した光の中で2回反射した光と1度も反射しなかった光の割合に差によるものであると考ええる.

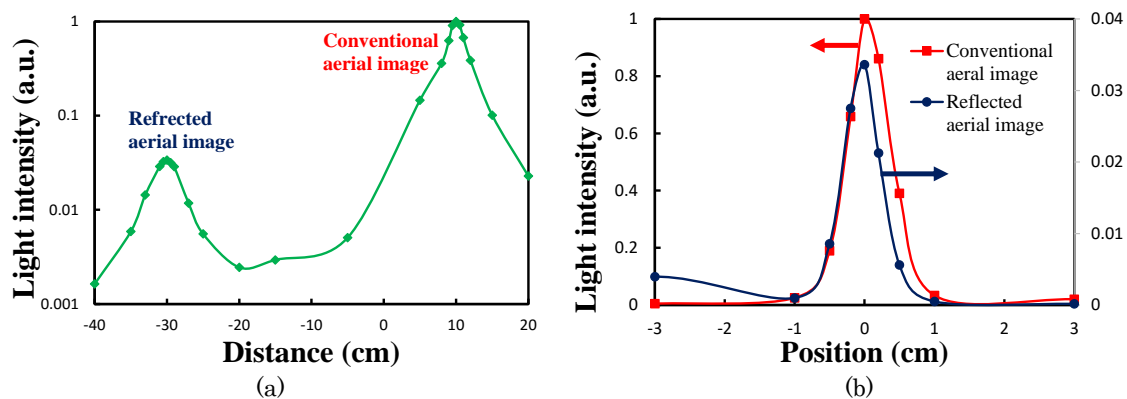


Fig. 4-13. Dependences of light intensity of aerial images upon (a) distance and (b) lateral position. At lateral position, scale of conventional image is at right side. Scale of reflected image is at left side.

次に、直交ミラーアレイとミラーを使用して2つの空中像を表示した場合と直交ミラーアレイのみで従来の空中表示を行った場合の空中像を Fig.4-14 に示す。直交ミラーアレイとミラーを使用することで2つの空中像を表示することに成功していることが分かる。光強度分からもわかる通り、形成される空中像の明るさには差があるが、どちらも問題なく空中像を認識できるだけの輝度を持っている。また、従来手法の場合の空中像と提案手法で形成される。

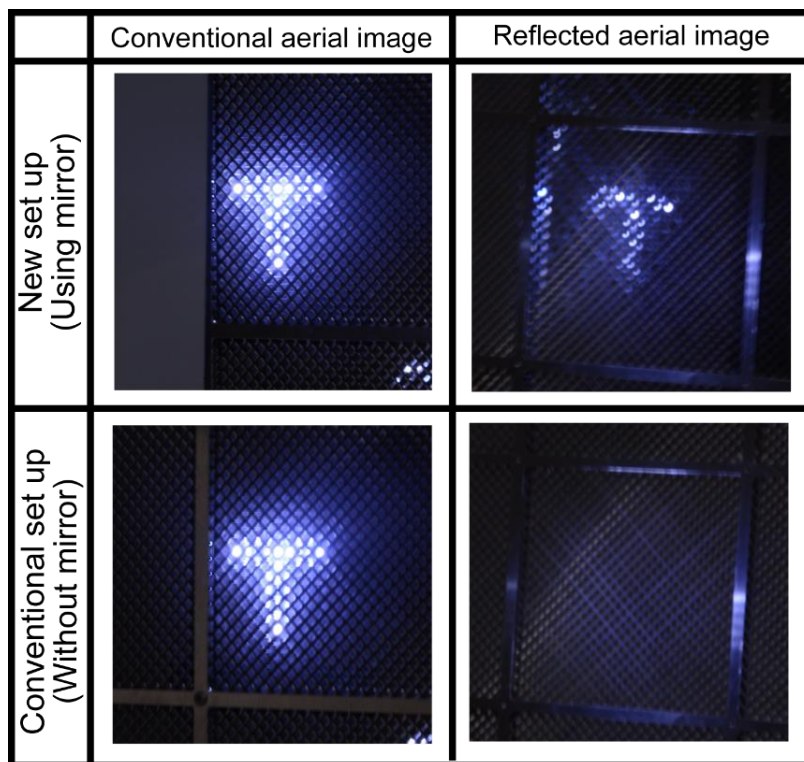


Fig. 4-14. Aerial image that is formed by using setups to two aerial image by using CMA and mirror and conventional setups by using only CMA.

以上のように、直交ミラーアレイの結像に使われなかった 0 回反射光をミラーによって再利用することで 1 つの光源で 2 つの空中像を形成することに成功した。光源を多数使用する場合のように光強度の同じ空中像を表示することはできないが 1 つの光源で複数の空中像を表示できるようになったことで空中表示による表現の幅を広げることができるようになった。

4-5 第 4 章まとめ

本章では直交ミラーアレイを用いて複数方向に空中像を表示するための直交ミラーアレイの構成、手法について論じた。直交ミラーアレイによる多方向へ同質の空中像を表示する場合大事になるのが空中像形成に使用する鏡面と非鏡面の反射の回数である。2 方向までの表示であれば、従来の直交ミラーアレイを 90 度回転させることで鏡面と非鏡面の利用回数が同じになる。4 方向への表示を行う場合は直交ミラーアレイの組み立て方を変更することで対応することが可能である。また、直交ミラーアレイにミラーを組み合わせることでこれまで無駄にしていた 0 回反射成分を使った空中像の形成が可能である。

このように直交ミラーアレイは片面ミラーによって形成されているため本来、1 方向への表示に対して有利になるように設計されているが多方向表示にも十分対応することが可能な素子である。

第5章 直交ミラーアレイを用いた空中像による温感表示

直交ミラーアレイは反射によって結像を行う。そのため波長依存性を気にする必要がなく、可視光と同じように赤外領域の光線を扱うことが可能である。その特性を利用して直交ミラーアレイを用いた赤外線のリニア化をおこなう。そしてそれによって熱空中像を形成する。

本章ではこの直交ミラーアレイを利用した熱空中像の形成とそれによって形成された熱空中像の特性について論じる。

5-1 中空構造と赤外線の反射

熱を持った物体は黒体放射により放射熱を伝搬するために赤外領域の光線を放出する。この放出された赤外領域の光線を収束することで疑似的な熱源を空間中に形成できるはずである。直交ミラーアレイはステンレスミラーを組み合わせることによって各開口が中空構造になるように設計されている。可視光と赤外領域の光線を同様に扱うためには中空構造であることと表面反射を利用していることが重要である。

可視光においては透明で透過可能な物体であっても赤外領域の光線では吸収されてしまうものがある。つまり空中像形成時の光路上にガラスや樹脂などが含まれている場合、赤外領域の光線は吸収されてしまい収束させることができない。レンズの中にはシリコンやゲルマニウムなどを素材とするもので赤外領域の光線を結像させることのできるものがある。しかしこのレンズによっては可視光を収束させることはできない。そもそも屈折には波長依存性が有り波長の違いによる影響を受けやすく収差が発生する。可視光と赤外領域の光線では波長域が違うため生じる収差も大きくなる。そのため可視光と赤外領域の光線を同時に同じ場所に収束するにはレンズは向いていない。

直交ミラーアレイは中空構造であるため赤外領域の光線を阻害する物を含まない。また金属ミラーの表面反射が利用した結像を行うため波長の影響を受けない。以上のことから直交ミラーアレイは可視光と同様に赤外領域の光線を収束させることが可能であると考えられる。

5-2 直交ミラーアレイの赤外領域における光線の収束シミュレーション

直交ミラーアレイが中空構造であることは赤外領域の光線を扱ううえで重要なポイントである。シミュレーションにより直交ミラーアレイが中空構造である場合と開口が透明素材で満たされている場合の光の収束量の比較を行った。シミュレーションには Light Tools を使用する。シミュレーションに使用した光学系の構成を Fig. 5-1. に示す。シミュレーションに使用した直交ミラーアレイの設定は大きさを 141×141 mm で厚さが 8 mm, 各開口の大きさを 8×8 mm である。光源から直交ミラーアレイまでの距離を 300 mm とし、入射角を 45 度とした。光源には点光源を用い、550 nm, 900 nm, 1350 nm, 1800 nm の波長の光線でシミュレーションを行った。透明素材には樹脂の Acrylite_6N を使用した。

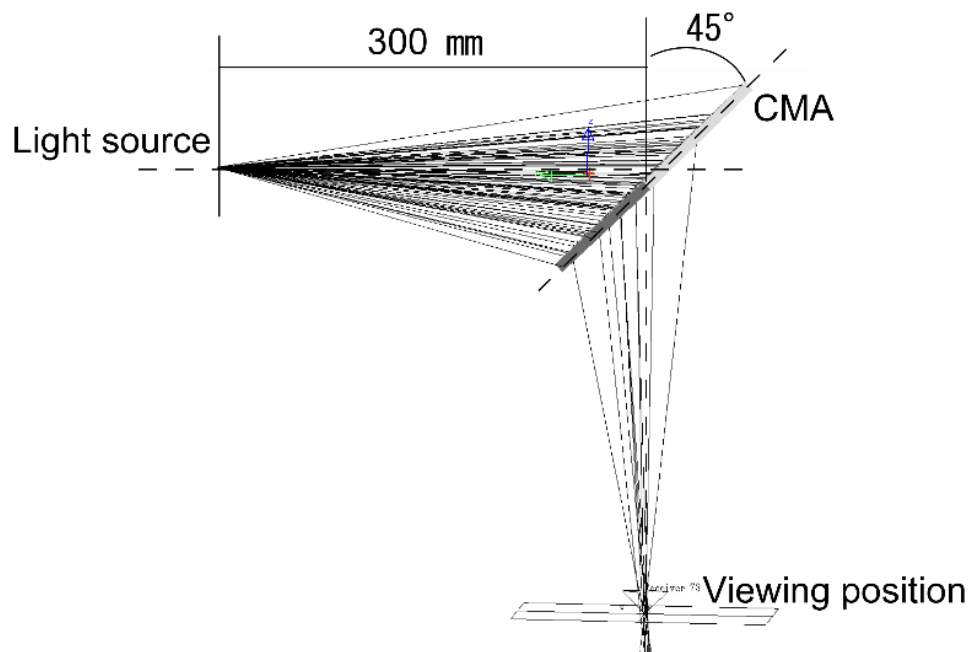


Fig. 5-1. Simulation setups to investigate light power of aerial image that is to formed by two types CMA. Using light wave-length are 550 nm, 900 nm, 1300 nm and 1800 nm. Using acrylic resin is Acrylite_N6.mm.

まず、波長 550 nm の光線を使用した場合における直交ミラーアレイの光の利用効率の高さを開口が中空の場合と樹脂で満たされている場合で比較する。集光点での直交ミラーアレイの開口が中空の場合と樹脂で満たされている場合それぞれの光強度分布画

像を Fig.5-2 に示す。これにより樹脂のない場合の方が光強度が強く、効率よく光を収束できることがわかる。開口が樹脂を含む場合の光線強度が低下しているのは樹脂に光線が入射したときに起こる屈折が原因であると考えられる。屈折により光線の角度が変化するため直交ミラーアレイの開口壁面に対して角度が大きくなり光線が 2 回反射するため通常以上の距離が必要になる。これにより、2 回反射される光線が減ることで光の利用効率が低下している。これを解決するためには直交ミラーアレイの厚みを増す必要がある。

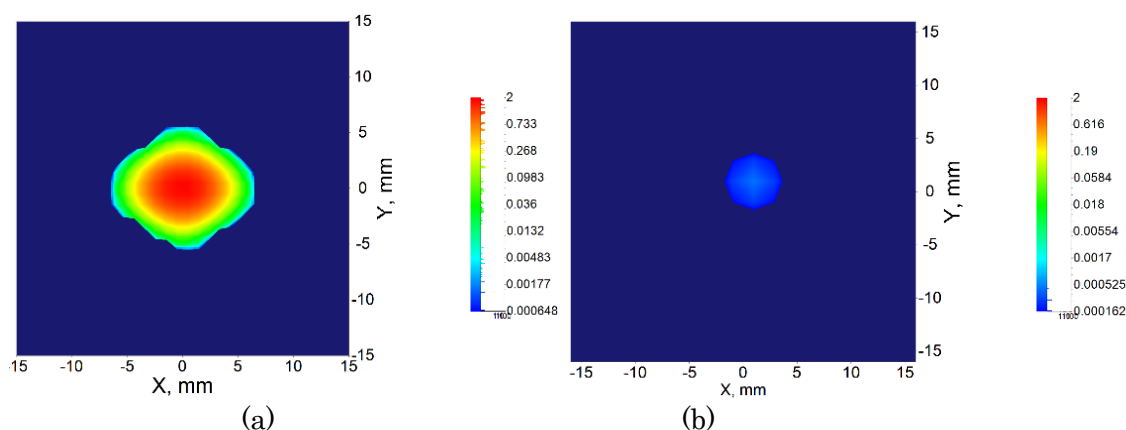


Fig.5-2. Light distribution at formed position of aerial image by using (a) only CMA (b) CMA with acrylic resin.

次に直交ミラーアレイの開口が中空になっている場合と樹脂に満たされている場合のそれぞれの波長での強度分布を Fig.5-3, Fig.5-4 に示す。各開口が中空構造になっている場合、可視光と赤外光で収束される光線の強度分布に大きな変化が見られず、ともに同様の収束が行われていることが分かる。それに対して開口が樹脂によって満たされている場合、波長が長くなるにつれて集束点における光の強度が低下している。これは波長が長くなることによって樹脂による吸収が行われていることが原因である。この吸収の影響を抑えるためには光線が樹脂の中を通る距離を短くする必要がある。そのため直交ミラーアレイの厚みを薄くすることが有効となる。しかし、前述のとおり開口を樹脂で満たした場合、直交ミラーアレイの厚みを厚くしなければ 2 回反射が行われずそもそもその光の利用効率が落ちることが分かっている。つまり、樹脂を開口に満たした状態は赤外領域の光線を扱ううえでふさわしくないことがこのシミュレーションによってわかる。以上のことより、赤外線のを収束を行うためには直交ミラーアレイが中空構造であることが重要なポイントであることが示された。

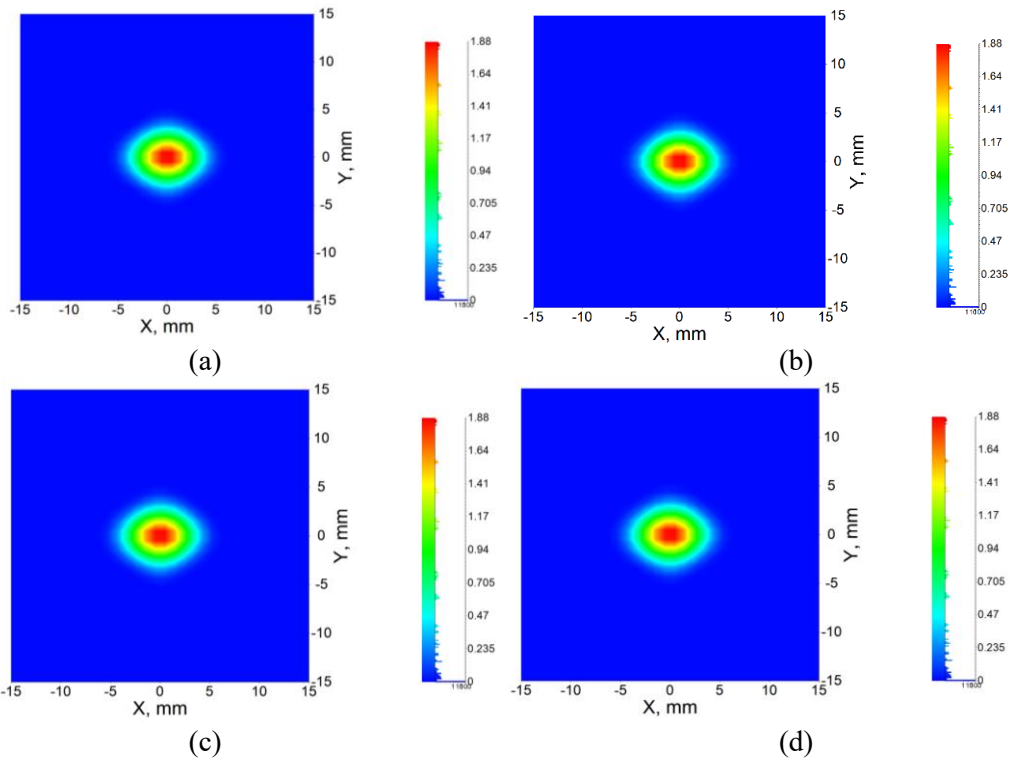


Fig. 5-3. Light distribution at formed position of aerial image by using only CMA. Aperture of CMA is hollow. Using light wavelength is (a) 550 nm (b) 900 nm (c) 1350 nm (d) 1800 nm.

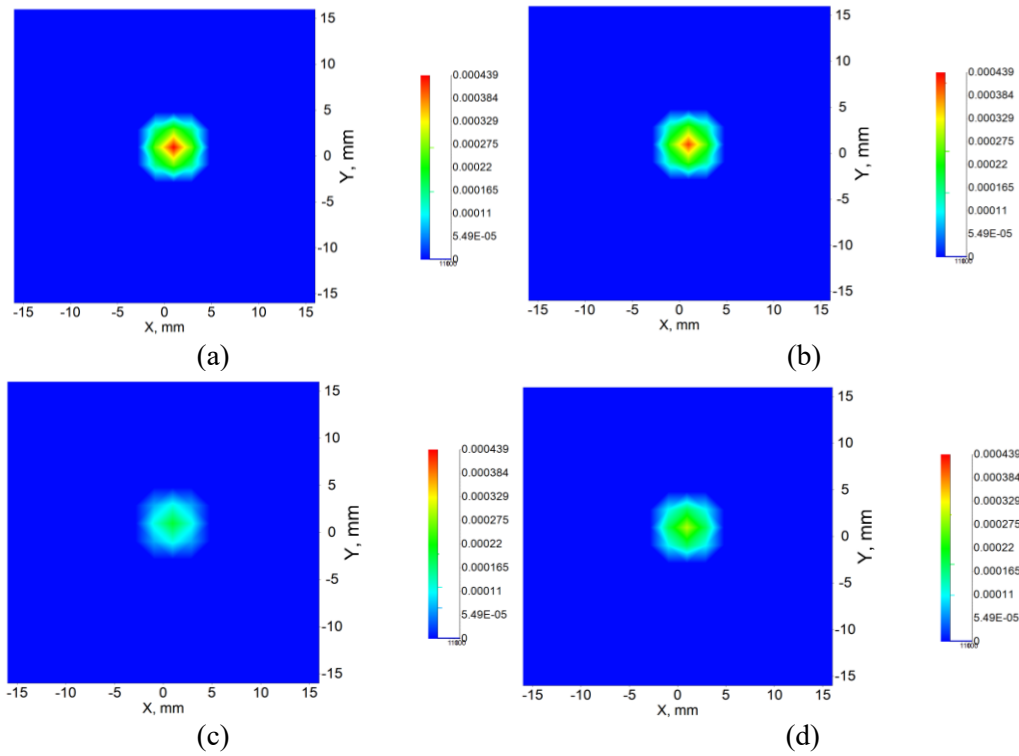


Fig. 5-4. Light distribution at formed position of aerial image by using CMA with acryl resin. Using light wavelength is (a) 550 nm (b) 900 nm (c) 1350 nm (d) 1800 nm. Using acrylic resin is Acrylite_N6.mm.

5-3 直交ミラーアレイを用いた熱の収束

熱源から発せられる赤外領域の光線を直交ミラーアレイによって収束し、温度分布を測定することで熱の収束が行われていることを実証する。熱の空中像の形成に使用した実験系を Fig.5-5 に示す。熱源には 30W のはんだごてを使用した。また、実験には大きさ 141×141 cm、開口の大きさ 4×4 mm、厚さ 8 mm の直交ミラーアレイを 2 枚横に並べて使用した。熱源と直交ミラーアレイの距離を 300 mm とし、入射角 35 度とした。この入射角は可視光の収束において使用した直交ミラーアレイの効率が最もよかった入射角である。直交ミラーアレイからの距離方向と結像位置での横方向の温度分布の測定を行った。温度の測定には白金プローブを用い各観測点で 80 秒静置後の温度を測定した。横方向は直交ミラーアレイに対して熱源と面对称の位置を原点とし、空中像に対して右側を正、左側を負とする。横方向の分布測定は右向きに、距離方向の分布測定では直交ミラーアレイから遠ざかる向きにプローブを移動させて行った。また、温度計の位置は自動ステージによって走査し、観測空間に余計な熱源(人間)が近づかないようにした。

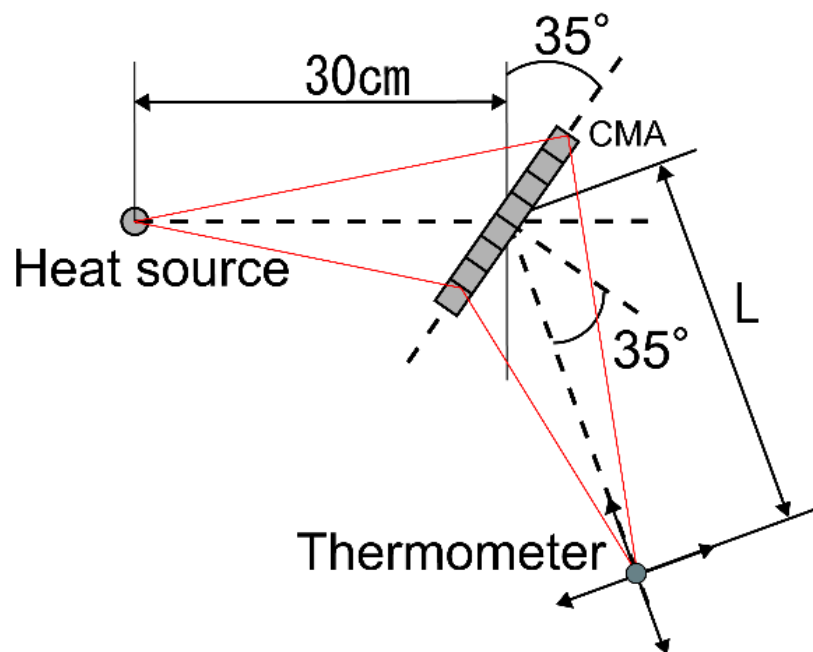


Fig. 5-5. Experimental setups to observe convergence of heat. Thermal source is a soldering iron.

直交ミラーアレイにより熱を収束したときの温度分布を Fig.5-6 に示す。(a)は直交ミラーアレイに対する距離方向を、(b)横方向の分布を示している。距離方向、横方向とも

に直交ミラーアレイに対して面对称の位置で温度分布がピークを取っている．これにより直交ミラーアレイによって赤外線を収束することによって熱の空中像の形成が可能であることが実証された．

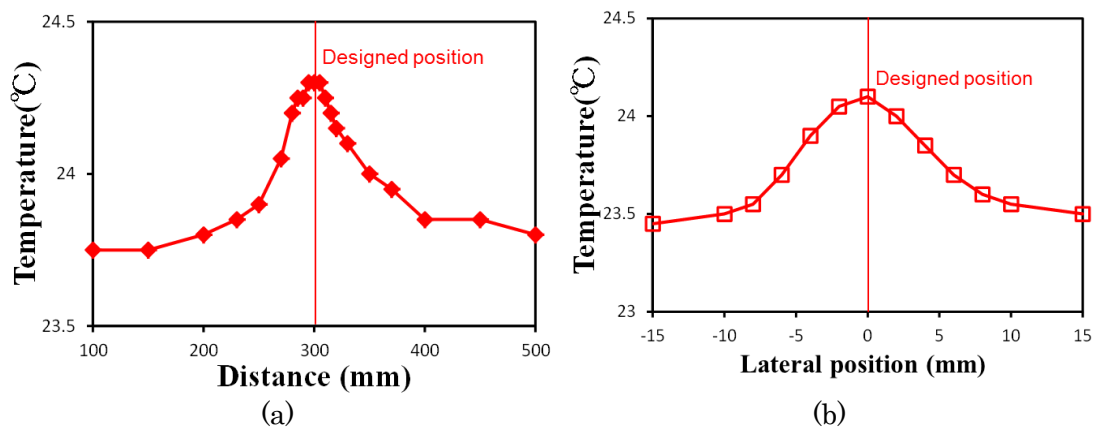


Fig. 5-6. Dependences of temperature of the aerial thermal image of a soldering iron upon (a) distance and (b) lateral position. The temperature take the maximum at the image position.

次に熱の空中像を形成したときの直交ミラーアレイに対して熱源と面对称の位置での温度の時間変化の測定を行う．これによ、熱空中像を形成することによっておこり温度の変化を観測する．観測結果を Fig5-7 に示す．空中像の形成直後、熱空中像の形成点において温度は大きくに増加した．また、空中像を形成してから約 500 秒で温度の上昇が緩やかになる．このことより光と熱の空中像が空間を温めるのにはある程度の時間を必要とし、一定の数値で安定することがわかる．

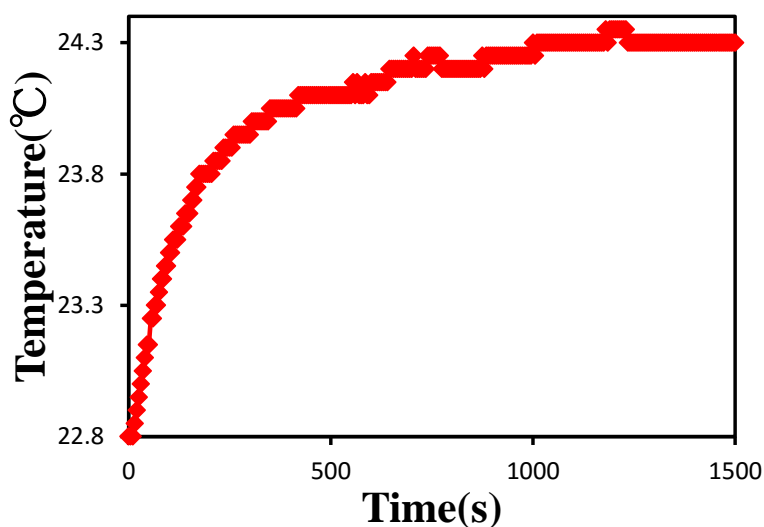


Fig. 5-7. Temporal trace of temperature at the aerial image position of the soldering iron.

次に形成された熱による空中像の形状を観測する。収束の様子はスクリーンが温められる様子をサーモグラフィによって観測した。熱源のはんだごてを立てた場合と寝かせた場合の2パターンで観測を行った。観測に使用した実験系を Fig. 5-8 に示す。はんだごてを立てた場合のはんだごてと直交ミラーアレイの距離は 300 mm である。はんだごてを寝かせた時はんだごての先端と直交ミラーアレイの距離は 250 mm ではんだごての長さは 100 mm である。また、使用したはんだごての出力は 30W である。実験には大きさ 142×142 cm、開口の大きさ 4×4 mm、厚さ 8 mm の直交ミラーアレイを2枚横に並べて使用した。熱源と直交ミラーアレイの距離を 300 mm とし、入射角 35 度とした。集束点を中心としてスクリーンを前後に動かし、スクリーンが温められる様子を熱画像によって確認する。各観測地点においてスクリーンを 30 秒温めた場合の熱画像を取得した。

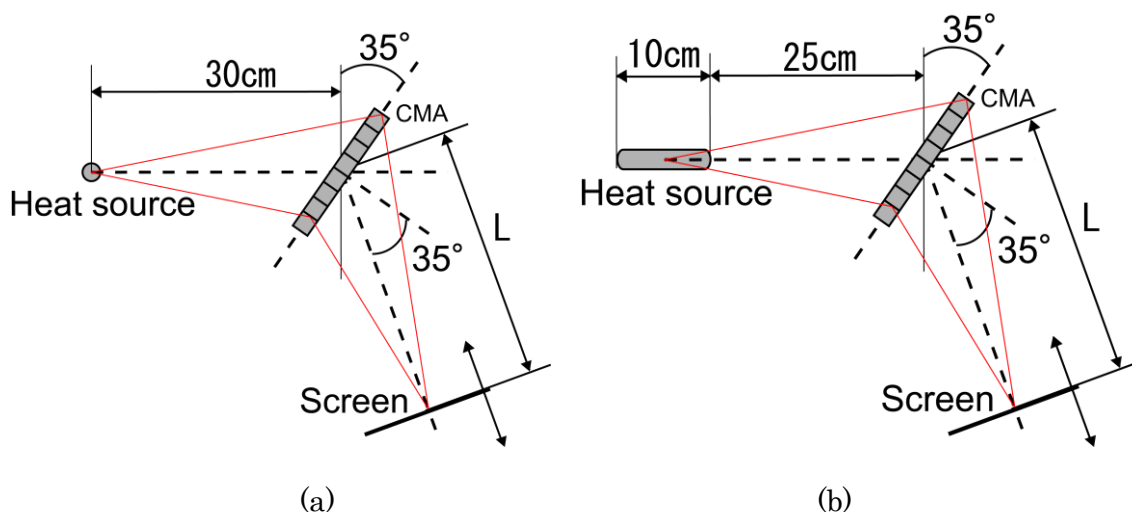


Fig. 5-8. Experimental setups to observe convergence of heat. Thermal source is a soldering iron. Thermal source set up (a) vertical (b) horizontal.

はんだごてを縦向きにおいた場合の各距離での赤外線線の収束の様子を熱画像によって Fig.5-9 に示す。集束点に近づくにつれてぼんやりとしたはんだごてに近い形状が見られ、集束点ではっきりとしたはんだごての形状を観察することができる。これにより、可視光の場合と同じように赤外線も光源と同じ形の空中像を形成していることが分かる。つまり、横方向においては直交ミラーアレイによる熱空中像の形成は熱源となるものと同じ形状の暖かい空間を形成するということである。

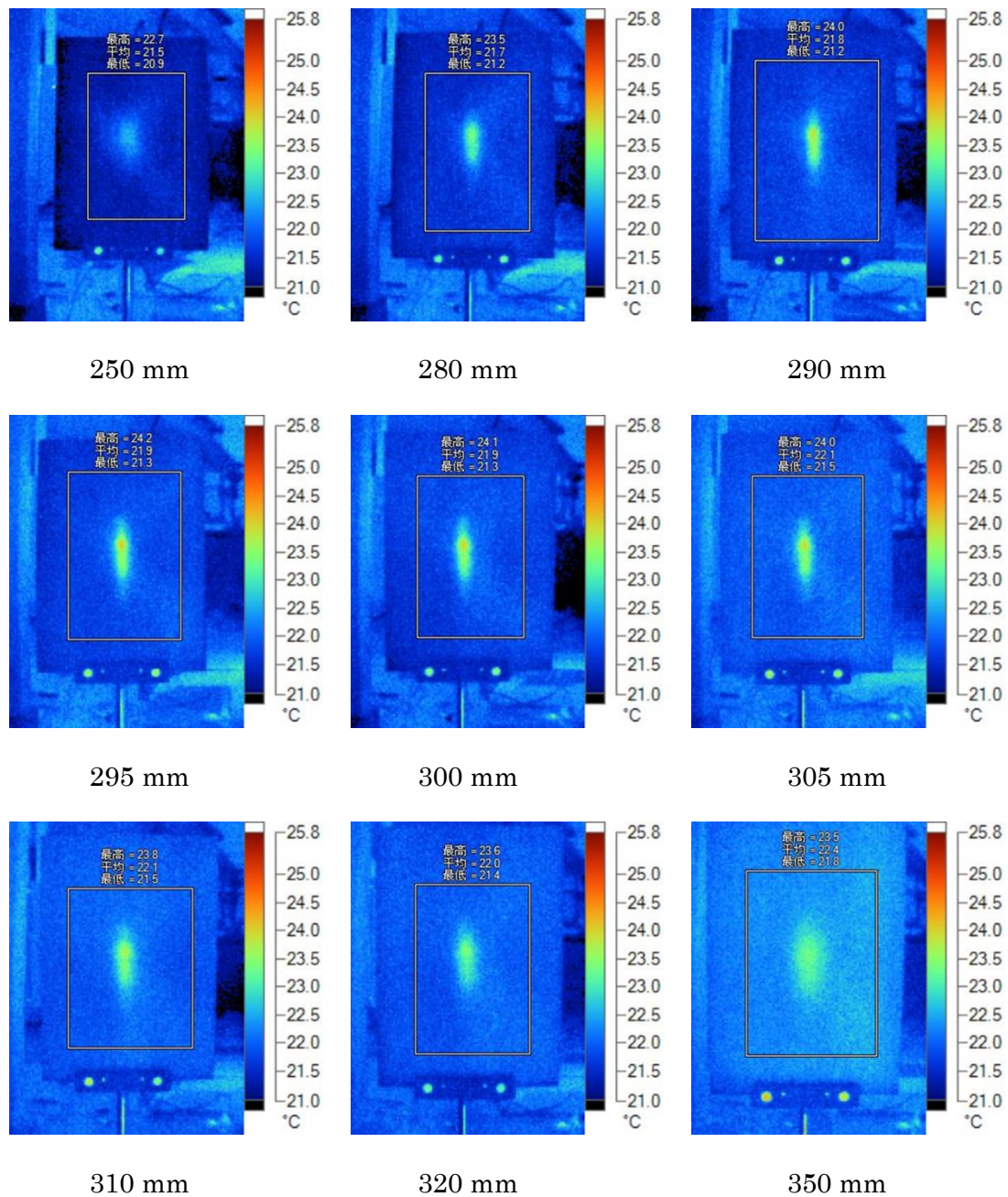


Fig. 5-9. Thermal distributions taken with a thermal camera when the soldering iron was used for the heat source. These thermal images were taken at one minutes after starting to warm. Local temperature rise was observed on the screen at the aerial image position (300 mm).

はんだごてを寝かせることで熱源に奥行きを持たせた場合の赤外線収束を熱画像によって Fig5-10 に示す. 距離方向に広い範囲で丸く赤外線が収束していることがわかる. 距離が遠い位置の熱の収束点程温度が低くなっているのは赤外線の伝搬時の減衰によるものであると考えている. 結像距離が長いとその分光線の移動距離は長くなるため

伝播による減衰の影響が大きくなることは当然である。以上より、奥行きを持つ物体も可視光による空中像の場合と同じように熱により表現することが可能であることが示されている。

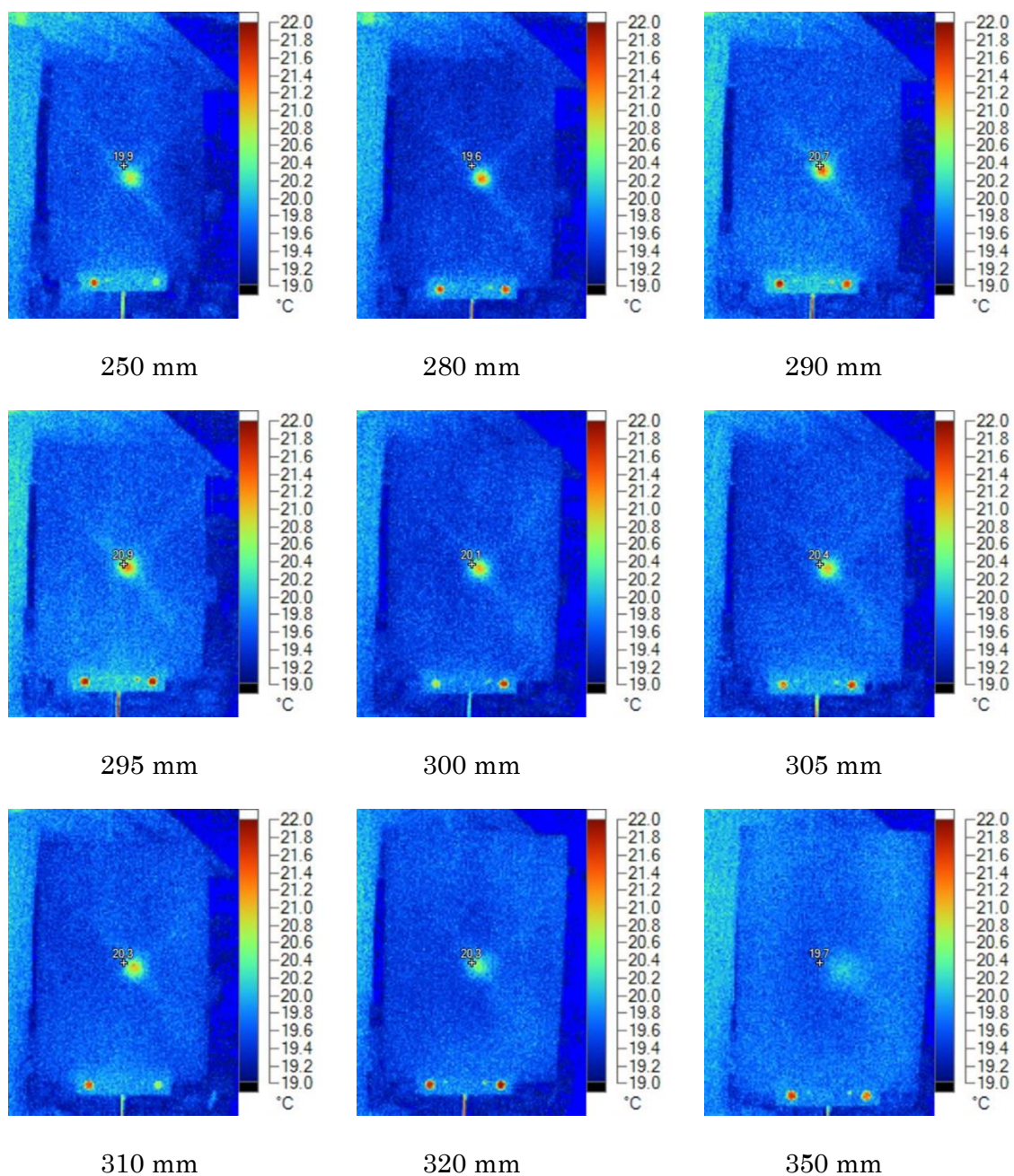
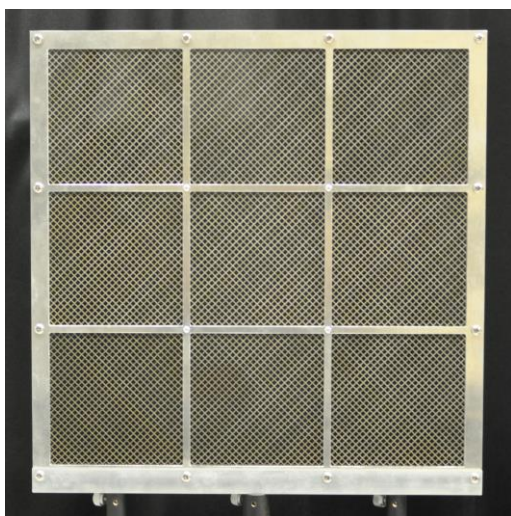


Fig. 5-10. Thermal distributions taken with a thermal camera when the soldering iron was used for the heat source. These thermal images were taken at one minutes after starting to warm.

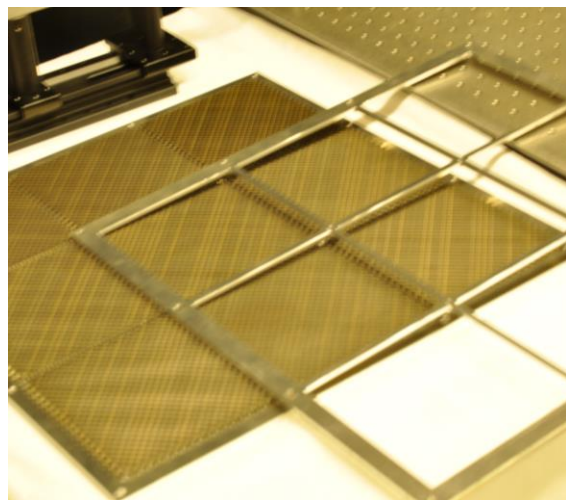
5-4 肌で感じることのできる熱を持った空中像

実証のために行った実験系では形成される熱空中像のパワーが弱く、肌で感じることができない。この問題は熱源のパワー不足とともに通常の直交ミラーアレイではサイズが小さいために直交ミラーアレイに入射する光線の量が少なくなることにより熱源からの放出される赤外領域の光線の利用効率が低くなってしまいうために形成される空中像のパワーが弱くなったためにおこったと考えられる。そこで、上記の問題を解決するために熱源をハンダゴテ(30W)から暖房用のハロゲンヒーターに変更した。使用したハロゲンヒーターの出力は300Wである。また、直交ミラーアレイをタイリングし熱光源の出力を上げることで、肌で熱を感じる事が可能な空中像の形成に成功した。直交ミラーアレイを9枚(3×3)タイリングすることで1枚の大きな直交ミラーアレイとして扱うことで熱源からの放出される赤外領域の光線の利用効率の向上を図った。

直交ミラーアレイをタイリングするにあたり、専用のホルダーを作成した。制作したホルダーをFig.6-12に示す。ホルダーの大きさは460 mm×460 mm×12 mmである。大きさ142 mm×142 mm、厚さ8 mmの直交ミラーアレイを9枚セットすることが可能である。このホルダーは直交ミラーアレイを前後からはさむ形で固定する。素材にはアルミを用いている。前後のパーツはそれぞれ1枚のアルミ板から削り出すことで制作されている。



(a)



(b)

Fig. 5-11. Holder for use 9 CMA. (a) Perfected. (b) that is decomposed.

5-5 複数熱源を用いた熱空中像と熱空中像の特性

赤外領域の光線の物体を暖める力は可視光を目で観測する場合と違い収束点以外の空間でも有効であるため、光線の通り道であれば光線の収束点ほどではないが温度に影響を与える。そのため、複数の熱源を使い同時に熱空中像を形成するした場合、互いの空中像に影響を与える恐れがある。また、可視光を収束した場合に起きるオクルージョンの矛盾のように熱源が重ね合わされている場合に影響がおきる可能性もある。ここでは、それらどのような影響を熱空中像に与えるかを調べることにより熱の空中像の特性について論じる。

複数熱源を用いて空中像を形成した場合の3次元温度分布の測定を行った。測定に使用した実験系を Fig.5-12 に示す。大きさ $142\text{ mm} \times 142\text{ mm}$ 、厚さ 8 mm 、開口の大きさ $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ の直交ミラーアレイを9枚使用し、熱源には 30 W のはんだごてを2本使用した。温度計には白金気体プローブを用い、各位置において80秒静置後の温度を測定した。熱源をそれぞれ距離方向と横方向に並べた2パターンの配置における3次元温度分布の測定を行った。距離方向の配置では直交ミラーアレイからそれぞれ 285 mm と 315 mm の位置に熱源を配置した。横方向の配置では直交ミラーアレイから 300 mm 離れた位置から光軸を中心として左右にそれぞれ 15 mm の位置に熱源を設置した。

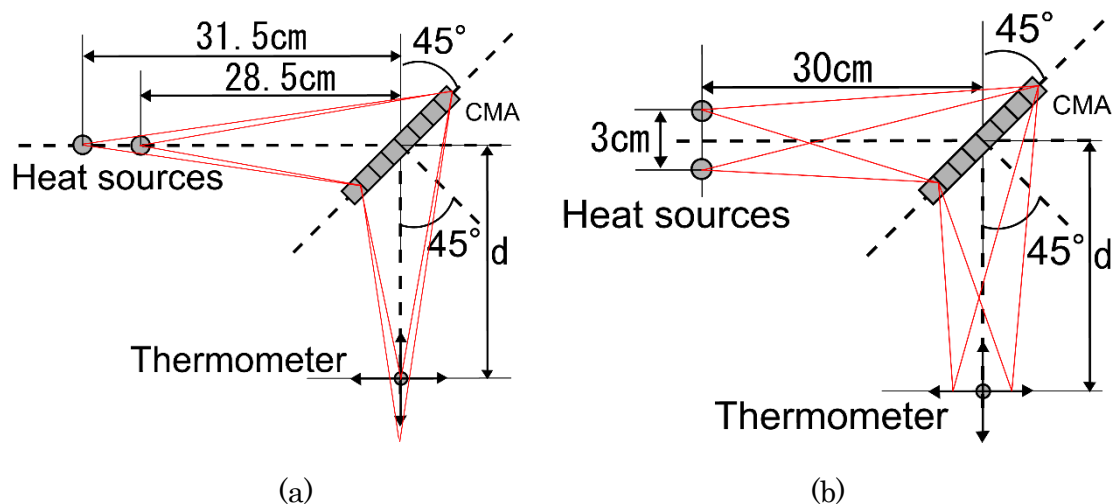


Fig. 5-12. Experimental setups to observe convergence of heat. Thermal source is a soldering iron. Two soldering irons in (a) the longitude direction (b) the lateral direction.

熱源を距離方向に2つ並べた場合の温度分布を Fig. 5-13 に示す。(a)は直交ミラーアレイからの距離方向、(b)は結像距離での横方向での温度分布を示している。距離方向の温度分布をみると結像距離で温度のピークを迎えており熱の収束はできているが2つの結像点において温度差が生じている。これは距離による減衰ともう一つの熱源によって赤外線が直交ミラーアレイに入射することが阻害されることによって生じた差であると考えられる。また2つの結像点の間地点をしてみると直交ミラーアレイから遠い結像点の温度と同じ値をとっている。つまり、遠方の結像点において結像していると認識することが困難になるということである。これらより、距離方向に複数の熱源を並べた場合直交ミラーアレイからの距離によって熱源の出力を調整する必要があるが、短い間隔に置かれた複数の熱源は一つの長い熱源として扱うことができる可能性があることを示している。

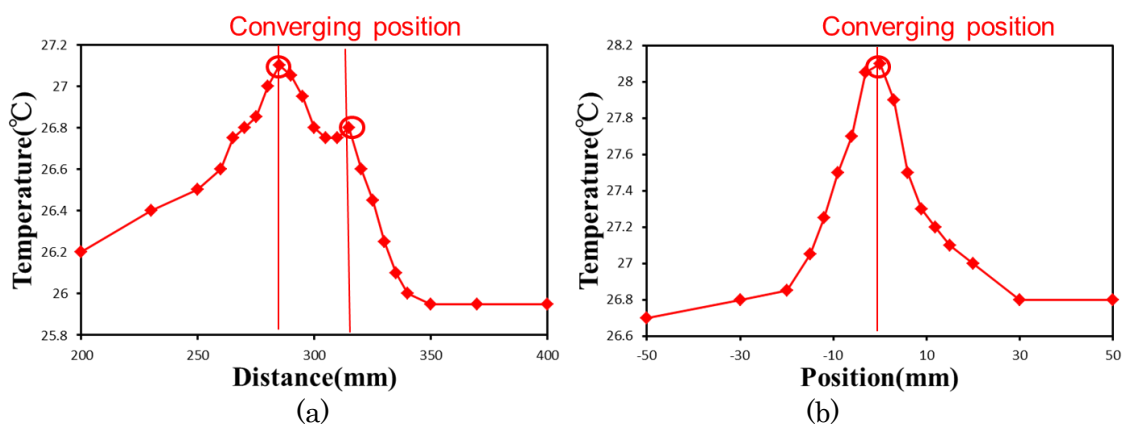


Fig. 5-13. Dependences of the aerial thermal image of two soldering irons in the longitude direction upon (a) distance and (b) lateral position. The temperature takes the maximum at the image position.

次に距離方向に熱源を配置した場合の空中像の結像点2点(285 mm, 315 mm)とその中間点(300 mm)を通るときの横方向の温度分布を測定した。測定結果を Fig.5-14 に示す。直交ミラーアレイから300 mm(中間点)の温度分布と315 mm(結像点)の温度分布の最大温度が等しい。また、中間点の温度分布のほうがは半値全幅が広い。中間点が結像点の一つと同じ温度ピークを持っているのは中間点が赤外線の通り道であるため、2つの結像点で収束する赤外線によって中間の空間も温められているためである。温度が同じということは中間地点と直交ミラーアレイから遠い方の結像点は肌で感じるとき単一の熱源として感じるができる。つまり、距離方向に熱源を重ねた場合、

1つの奥行を持った熱源として扱うことができる。

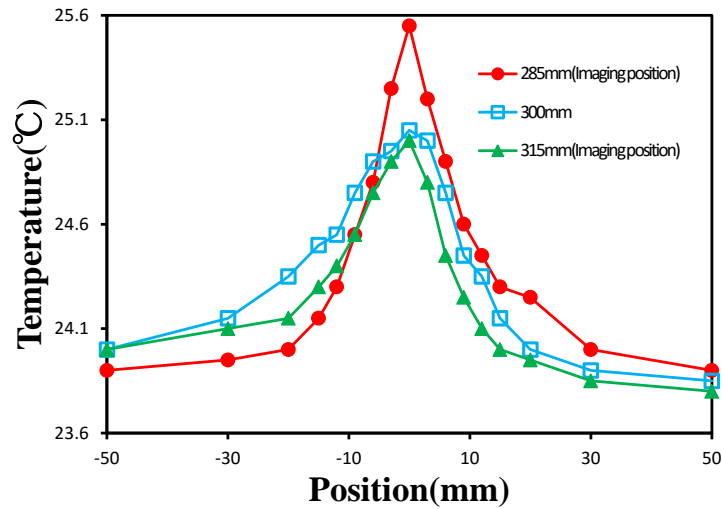


Fig. 5-14. Dependences of the aerial thermal image of two soldering irons in the longitude direction upon lateral position at imaging positions and the middle position of two imaging positions.

熱源を横方向に並べた場合の温度分布を Fig.5-15 に示す。(a)は熱の空中像を通る直交ミラーアレイからの距離方向、(b)は結像距離での横方向での温度分布を示している。距離方向の温度分布は大きな変化は見られない。横方向の温度分布では最大値に差が出ている。これは熱源の位置により利用できる直交ミラーアレイの面積に差が出ることからくる差であると考えられる。つまり、横方向に熱源を並べた場合相互に与える目立った影響はないが、場所によって直交ミラーアレイの利用効率が変わり出力に差が出るということである。

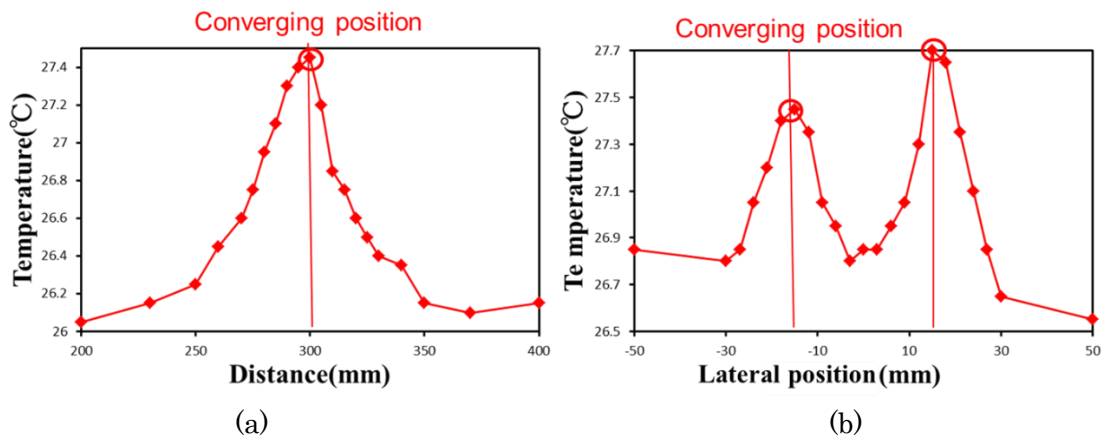


Fig. 5-15 Dependences of the aerial thermal image of two soldering irons in the lateral direction upon (a) distance and (b) lateral position. The temperature takes the maximum at the image position.

次に横方向に熱源を配置し結像を行った場合において結像点を通るときと結像点 2 点の中心をとおるときの距離方向の温度分布を測定した。測定結果を Fig.5-16 に示す。中間点では熱の収束が行われていないことがわかる。これにより横方向に並んで形成された熱の空中像はそれぞれが別のものあり、空中像と空中像の間に現在ほどの間隔があれば相互への影響がないものと考えられることが明らかになった。

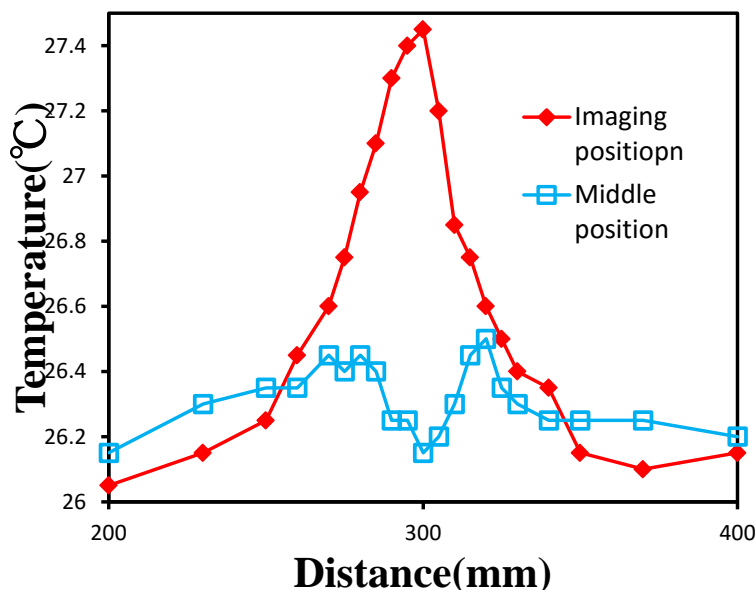


Fig. 5-16. Dependences of the aerial thermal image of two soldering irons in the longitude direction upon distance at imaging positions and the middle position of two imaging positions.

距離方向と横方向に熱源を並べた場合の熱の収束の様子撮影した熱画像を Fig.5-17 と Fig. 518 にそれぞれ示す。熱源の間隔はともに 30 mm である。

距離方向に熱源を並べた場合は CMA からの距離が 285 mm と 315 mm がそれぞれ結像点で 300 mm が 2 つの結像点の中間点である。CMA から遠い結像点はしっかりと像が結像しているが、結像点 2 点の中間点より温度が低くなっている。以上より距離方向では細かい形を表現することは難しいが、広い範囲に熱を収束したい場合少ない数の熱源で表現することができるということがわかる。

また、熱源を横方向に並べた場合は直交ミラーアレイから 300 mm が結像点であり、結像点で像が 2 つ結像していることがしっかりと確認できる。結像点の前後では微弱にはあるが広い範囲が温められていることがわかる。これより横方向に熱源を並べた場合、赤外領域に電磁波の通り道において多少はものを温める力はあるが、形成される空中像の分解能には影響がないことがわかった。

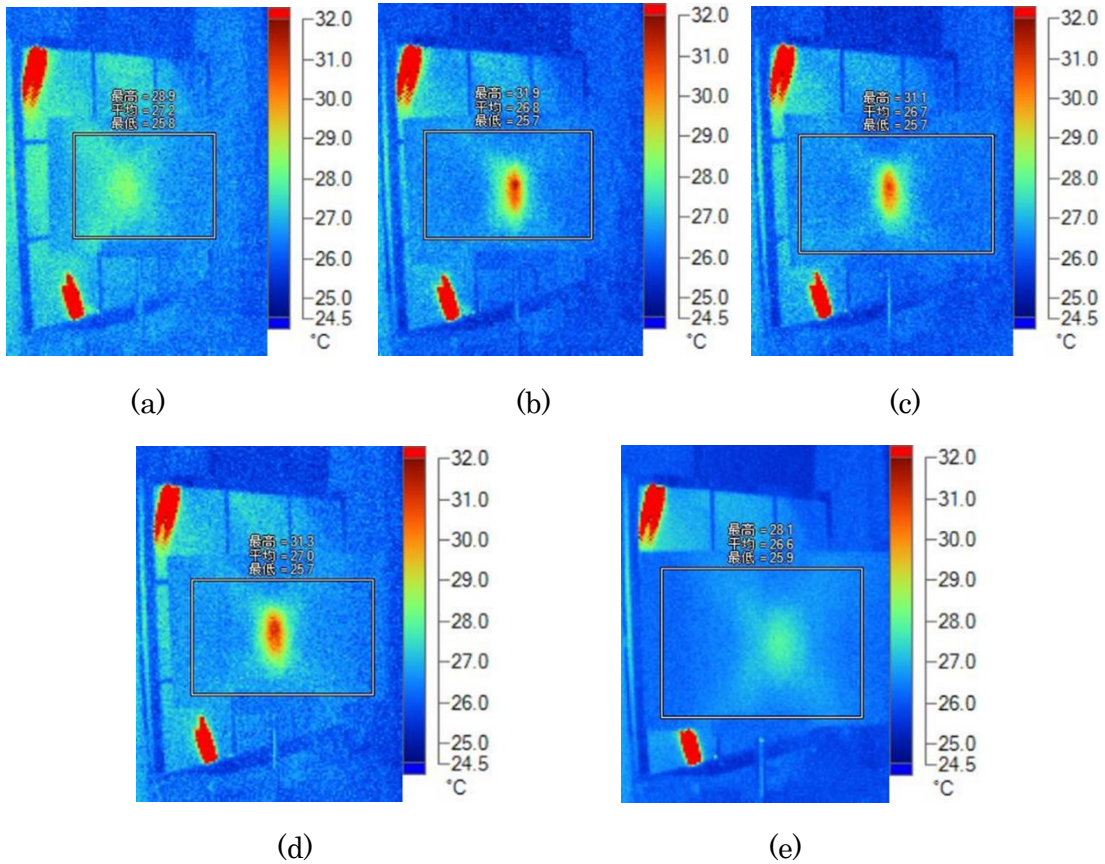


Fig. 5-17. Thermal distributions taken with a thermal camera when two soldering irons were used for the heat source. soldering irons is setup in the longitude direction. These thermal images were taken at one minutes after starting to warm.

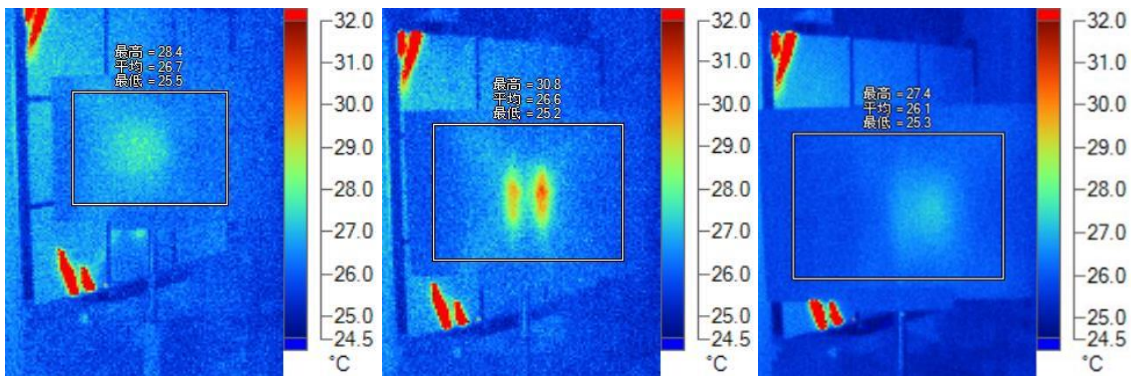


Fig. 5-18. Thermal distributions taken with a thermal camera when two soldering irons were used for the heat source. soldering irons is setup in the lateral direction. These thermal images were taken at one minutes after starting to warm.

以上より、距離方向と横方向で比べた場合横方向の分解能の方が距離方向よりも高いことが分かる。また、距離方向は熱源のサイズよりも広い範囲を暖めることが可能であるため少ない数の熱源で大きな熱空中像を表現することが可能である。

5-6 第5章のまとめ

本章では、直交ミラーアレイをもちいて赤外領域の光線を収束することで熱の空中像の形成を行った。直交ミラーアレイは中空構造であり、金属ミラーによる表面反射によって空中像の形成を行うため波長依存性がない。そのため可視光以外の光線も収束することが可能であるため赤外線も収束が可能である。これにより、熱の空中像の形成に成功した。

この直交ミラーアレイによって形成される空中像の熱の伝搬にはある程度の時間が必要である。なぜなら、熱の伝搬に赤外線を使用しており赤外線を対象が吸収することによって熱を発生させている。このプロセスにかかる時間と熱源の出力の問題より現在多少の時間を要する。また、形成される空中像の解像度には方向によって差があり、直交ミラーアレイに対して横方向への分解能が高く距離方向への分解能は低い。収束途中の赤外線にも熱を伝える力が有るため、赤外線の通り道となる距離方向ではこの影響を受け分解能が低下する。以上のような特性を持った熱空中像の形成に成功した。

そして、熱源をハロゲンヒーターにし、直交ミラーアレイをタイリングすることで出力を向上させ、人の肌でも感じる事が可能な空中像の形成に成功した。

第6章 直交ミラーアレイによる音波の収束

音波であるため直交ミラーアレイの原理によって収束が可能である。しかし、音波と光では波長の長さに大きな差があり、従来の直交ミラーアレイでは収束を行うことができない。本章では、直交ミラーアレイの原理による音波の収束を実現させる方法について論じる。

6-1 音波を収束するための直交ミラーアレイの作製

人間の可聴域の周波数は 20 Hz～20 kHz、つまり可聴域の音波の波長は 17 mm～17 m である。それに対して可視光の波長はおよそ 380 nm～750 nm、赤外線の波長は 750 nm～1 mm とされている。そのため、従来の空中像形成用の直交ミラーアレイは開口のサイズが 4×4 mm、厚みが 8 mm で設計されている。これは光の収束を行うには十分に大きなサイズであるが、可聴域の音波の波長よりも小さいため音波を扱おうとした場合回折の影響を受けてしまう。そのため、うまく音波を収束することができない。つまり、音波を収束するためには波長の長さに対応した開口サイズを持つ直交ミラーアレイが必要ということである [71-74]。

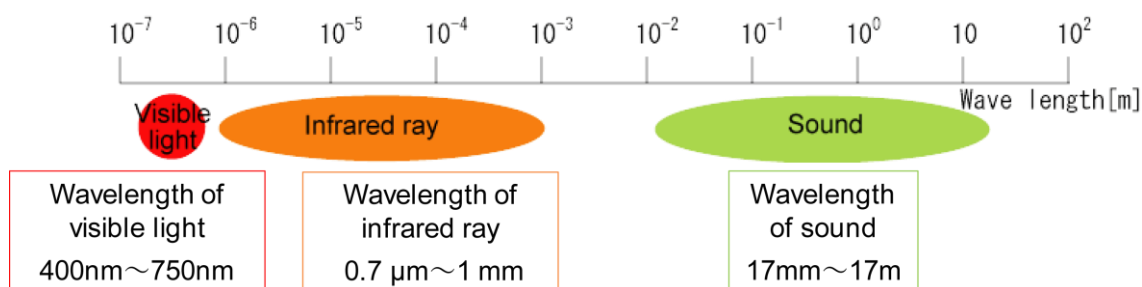


Fig. 6-1. Wavelength band of light, infrared ray and sound waves.

この問題を解決するために新たに音波の波長の長さにあった大きさの開口を持つ直交ミラーアレイの試作を行った。試作した音波用の直交ミラーアレイを Fig.6-2 に示す。基本的な構造は従来の直交ミラーアレイと同じく、楕形の板を組み合わせた格子状の素子である。一番の違いはサイズである。各開口のサイズが 150×150 mm、厚みが 150 mm である。各開口の壁面の厚さは 3 mm である。これにより可聴域全域の音波を収束することはできないが、高音域の音波の収束が可能になる。音波用の直交ミラーアレイ

の素材には透明アクリル板が使用されている。透明アクリル板を使用したのは従来の空中像形成用直交ミラーアレイと合わせて使うときに光線を阻害しない透明素材であることと加工がしやすく試作に向いているためである。加工にはフライス盤を使用し、楕円形状に加工した。Fig.6-2(b)に示されているのが音波用直交ミラーアレイを構成している楕形のパーツである。これらの溝をはめ合わせることでFig.6-2(a)のような格子状の素子を形成している。

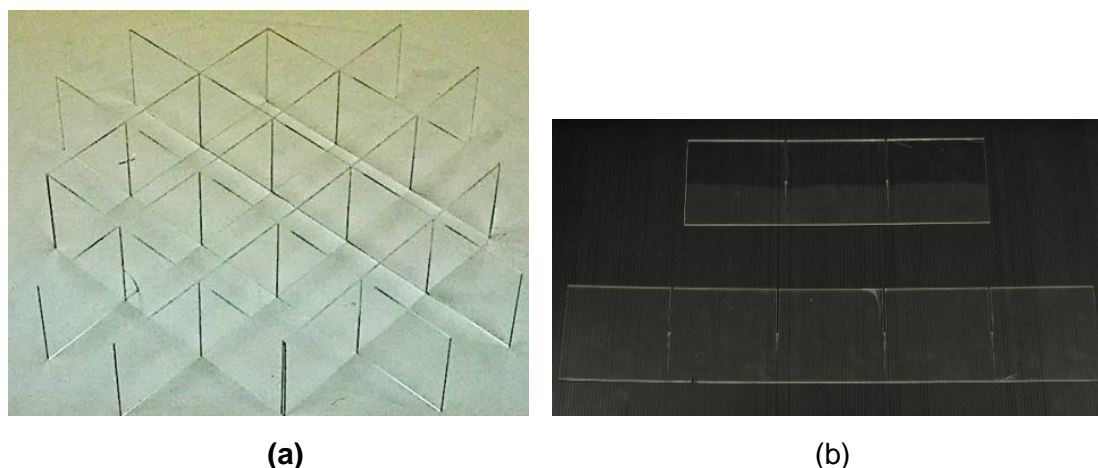


Fig. 6-2. Prototype crossed mirror array for converging sound. Its size was 65 cm × 65 cm and aperture size is 15cm × 15cm. Thicknesses of trial CMA is 15cm.

6-2 音波用直交ミラーアレイによる音波の収束

試作した音波用の直交ミラーアレイを用いて音波が反射による収束が可能であるかを確認する。検証のために試作された音波用の直交ミラーアレイによって音波の収束を行い、音の強度分布を測定する。これにより、直交ミラーアレイの原理のとおり素子に対して面対称の位置に収束させているかを確認する。

音波の収束に用いた実験系を Fig.6-3 に示す。音源と直交ミラーアレイの距離は 1000 mm とし音波の入射角が 45 度になるように音波用直交ミラーアレイを設置した。音波は周波数 10 kHz(波長 3.4 mm)の正弦波を使用した。そして測定にはオシロスコープを使用し、p-p(peak-to-peak)値の計測を行う。直交ミラーアレイに対して音源と面対称の位置を原点とし、距離方向と理論上における結像距離における横方向の強度分布を測定する。

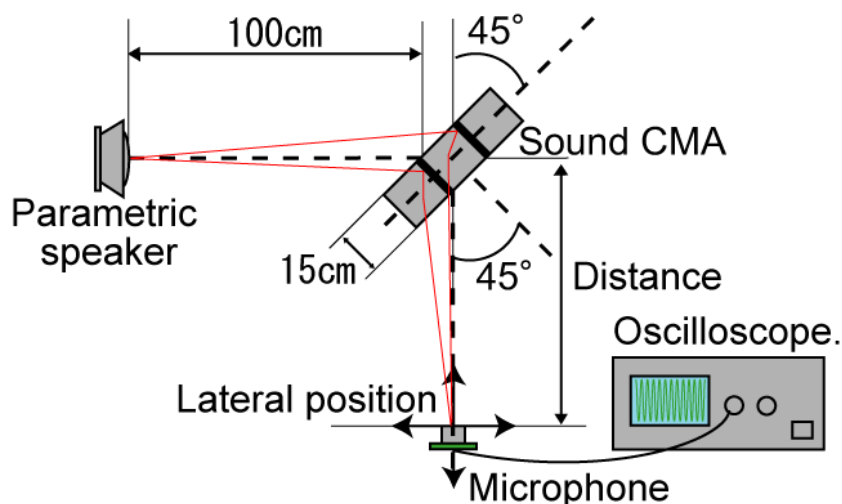


Fig.6-3. Experimental setups to observe convergence of sound. In order to provide directivity sound wave, a parametric speaker was used for a sound source. Using sound is sin wave of 10 kHz.

音波用の直交ミラーレイにより収束された音の強度分布を Fig.6-4 に示す。(a)は直交ミラーレイに対する距離方向の、(b)理論上の収束距離における横方向の強度分布を示している。各グラフにおける横軸の0の値が理論上の収束点を表している。距離方向、横方向ともに直交ミラーレイに対して音源から面对称の位置で強度が最大値をとっている。つまり、理論どおりの位置に音が収束されているということである。横方向の値が左右対称でないのは1回反射成分によるものであると考える。以上より、音波用に製作された直交ミラーレイを使用することで音波を収束すること可能であることが検証できた。

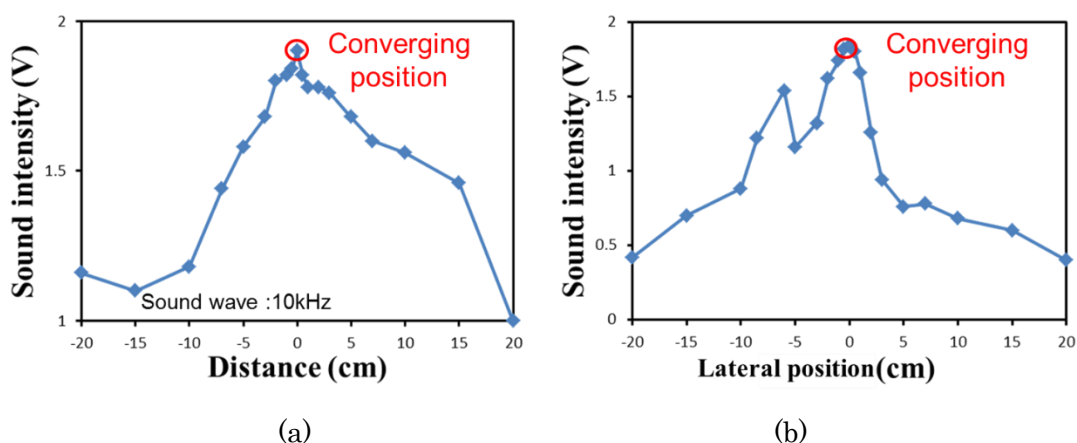


Fig.6-4. Dependences of sound upon (a) the distance and (b) the lateral position. The peak to peak value takes a maximum value. Sound is converging at that position. Using sound is sin wave of 10 kHz.

6-3 収束された音波の波形

音波用の直交ミラーアレイを使用することによって音波が収束可能であることはわかったが、収束された音波がどのような状態にあるのかはわからない。音波を収束する過程でノイズが発生していた場合、除去する必要がある。そこで、収束点における音波の波形を取得することで直交ミラーアレイによって収束された音波に状態を明らかにする。

直交ミラーアレイによって音の集束を行った時の収束点の音の波形を取得し、集束を行わない場合の波形との比較を行った。また、距離方向で観測点を移動させたときの波形の変化の観察を行った。音波を収束したときの波形の観測に用いた実験系を Fig.6-5 に示す。音源から直交ミラーアレイまでの距離は 1500 mm で音波の入射角は 45 度である。使用した音波用の直交ミラーアレイの各開口の大きさは 150×150 mm で、厚さが 150 mm である。直交ミラーアレイを使用しない場合も使用する場合と同じだけ音源とマイクの距離を離して測定を行った。音波は周波数 10 kHz(波長 3.4 mm)の正弦波を使用した。

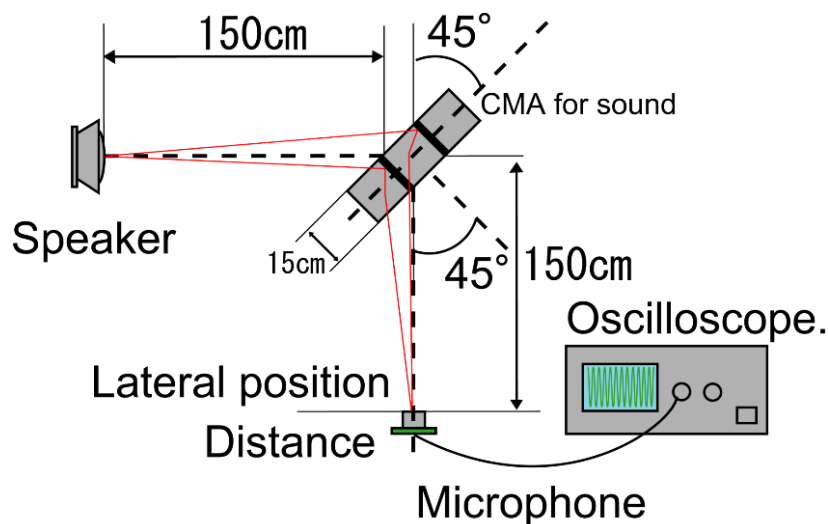
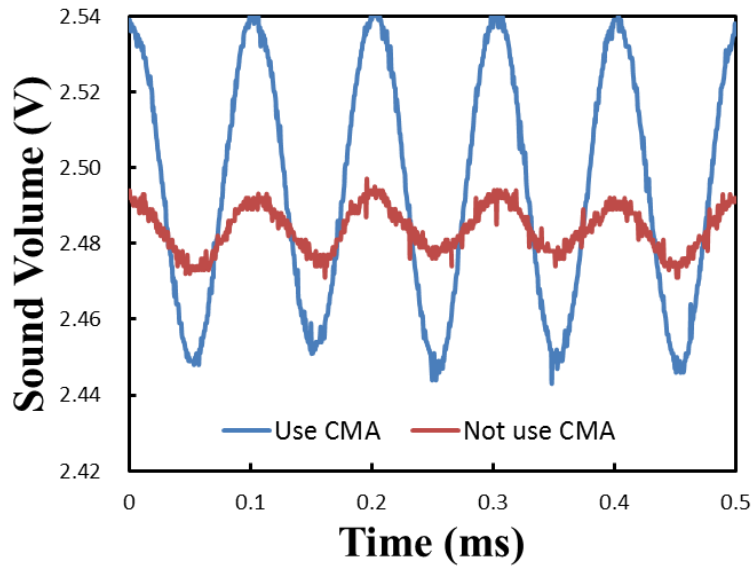


Fig. 6-5. Experimental setups to observe sound-wave form. Using sound is sin wave of 10 kHz.

集束点における直交ミラーアレイを使用した場合としない場合の音波の波形をそれぞれ Fig.6-6 に示す。CMA を使用した場合振幅が大きくなっていることがわかる。これは音波が収束されている為である。そして振幅以外で波形に目立った変化は見られない。



**Fig.6-6. Wave form of using CMA and not use CMA at converging position.
Frequency of using sound is 10 kHz.**

次に各距離における波形を Fig.6-7 に示す．測定位置は収束点と収束点から CMA に向かって 5cm,50cm 地点の 3 点を測定した．収束点に近いほど振幅が大きくなっている．つまり，音波の収束の度合いに合わせた振幅の変化のみがおきているということである．以上のこのことから直交ミラーアレイは余計なノイズを発生させることなく波形を保って音波を収束できていると考えられる．

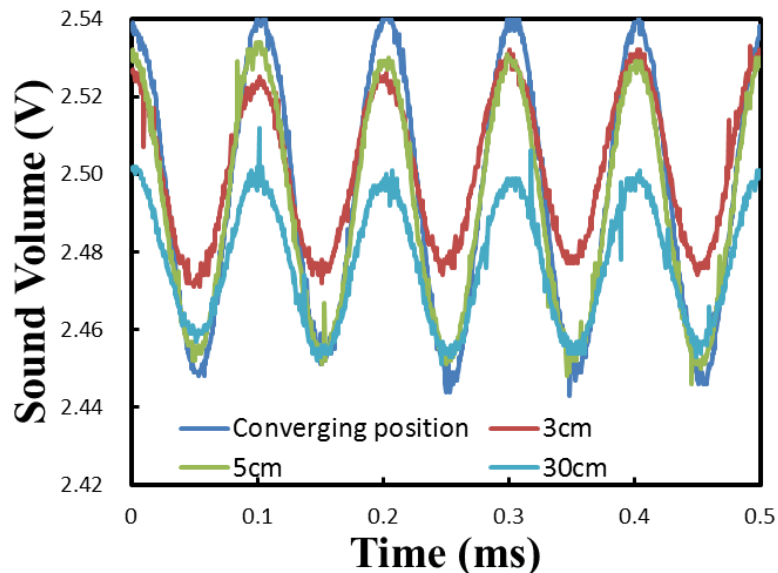


Fig.6-7. Wave form at converging position, 5cm from converging position and 50 from converging position. Frequency of using sound is 10 kHz.

6-4 直交ミラーアレイの開口サイズより長い波長の音波の収束

直交ミラーアレイを大きくすることで音波を収束が可能になった。しかしそれは直交ミラーアレイの開口サイズより小さな波長の音波だけである高音域の音波だけである。低音域に対応する直交ミラーアレイを作成すれば低温領域の音波も収束は可能と考えられるが、一般的に男性の話し声の波長が 680 mm(500 Hz)前後といわれておりこの波長に対応できる直交ミラーアレイを作成することは現実的に考えて難しい。そこでこの問題を解決するために超音波を搬送波とした振幅変調が行われた音波を収束に使用する。振幅変調とは、変調方式の一つで波を搬送波の強弱によって変調し伝播する変調方式である。直交ミラーアレイによって収束が行われた場合、収束された音波の波形に大きな変化は起きない。そのため、音波の収束時に搬送波である超音波の波形を保つことができれば振幅変調された音波を収束することは搬送波の波長の音波を収束することと同じ扱いにできると考えられる[72,73]。また、超音波は高い指向性を持っており超音波を搬送波とすることで収束に使用する音波に指向性を持たせることができる。これにより音波の利用効率が上昇する可能性もある。そして、人間は超音波を聞くことができず、耳がローパスフィルタとして機能するため超音波によって変調されて音波は人間が聞く場合、耳で自動で復調される。

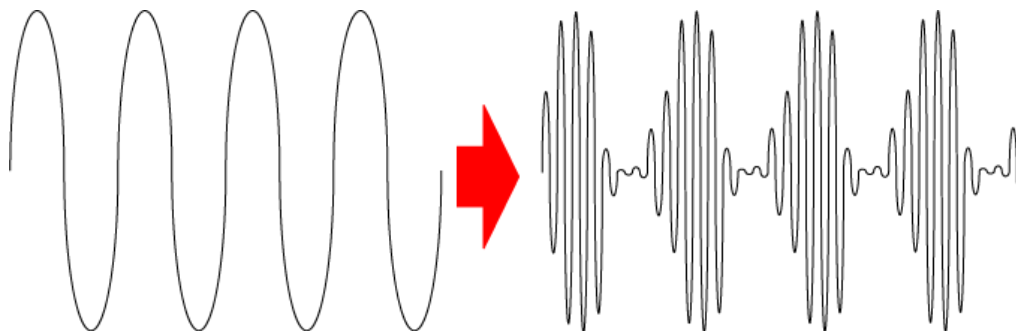


Fig.6-8. Amplitude modulation of sound waves.

直交ミラーアレイにより超音波を搬送波とした音波の収束を行う。そしてその波形を取得し、搬送波の波形が保たれていることの確認を行う。音波を収束したときの波形の観測に用いた実験系を Fig.6-9 に示す。音源にはパラメトリックスピーカーを使用し、10 kHz の音波を 40 kHz の搬送波で振幅変調した場合の波形を取得した。パラメトリックスピーカーとは超音波を利用して音波に指向性を持たせることのできるスピーカーで超音波を搬送波とした音波を出力することができる。音源から直交ミラーアレイま

での距離は 1000 mm とし、音波の直交ミラーアレイへの入射角は 45 度である。直交ミラーアレイを使用しない場合も使用する場合と同じだけ距離を離し測定を行った。

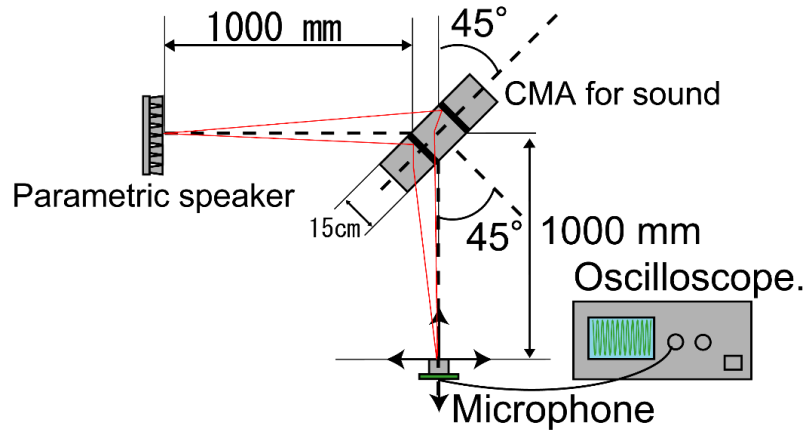


Fig. 6-9. Experimental setups to observe sound-wave form. Sound source is parametric speaker. Designed frequency of auditory sound was 10 kHz.

直交ミラーアレイを使用し収束された音波と直交ミラーアレイを使用しなかった場合の音波の波形を Fig.6-10 に示す。直交ミラーアレイを使用した場合は搬送波となった超音波の波形をはっきりと確認することができる。これにより、変調された音波を収束することは搬送波の波長の音波を収束することと同じ扱いにできるようになる。直交ミラーアレイを使用しない場合超音波成分をはっきりと観測できないのは直交ミラーアレイを使用しない場合パラメトリックスピーカーから直接音がマイクに入射せず、実験室内で反射、反響され成分の弱まった音が観測されたためである。実際にわずかではあるが、超音波成分は残っている。

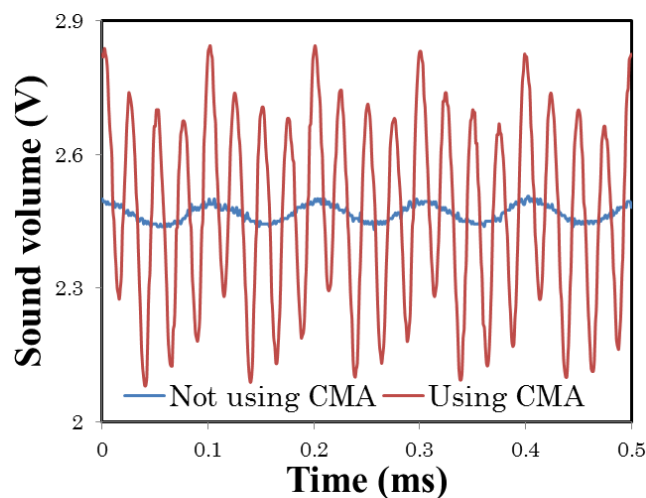


Fig. 6-9. Wave form of using CMA and not use CMA at converging position. Frequency of using sound is 10 kHz.

搬送波である超音波の波形が収束されても保てることが分かったので実際に直交ミラーアレイの開口のサイズよりも長い波長をもった音波の収束を行う。直交ミラーアレイの開口よりも長い波長の音波の収束において超音波を搬送波に使用した場合と使用しない場合の音量分布を測定した。実験系を Fig.6-11 に示す。人に聞こえる音波の周波数は 800Hz(波長 425 mm)とした。超音波を搬送波にする場合は音源にパラメトリックスピーカーを使用し、変調を行わない場合は通常のスピーカーを使用する。直交ミラーアレイの各開口の大きさが 150×150 mm で、厚さが 150 mm である。音源と直交ミラーアレイの距離は 1000 mm で入射角は 45 度である。CMA からの距離方向および理論上の集束点における横方向の音の強度分布を測定した。

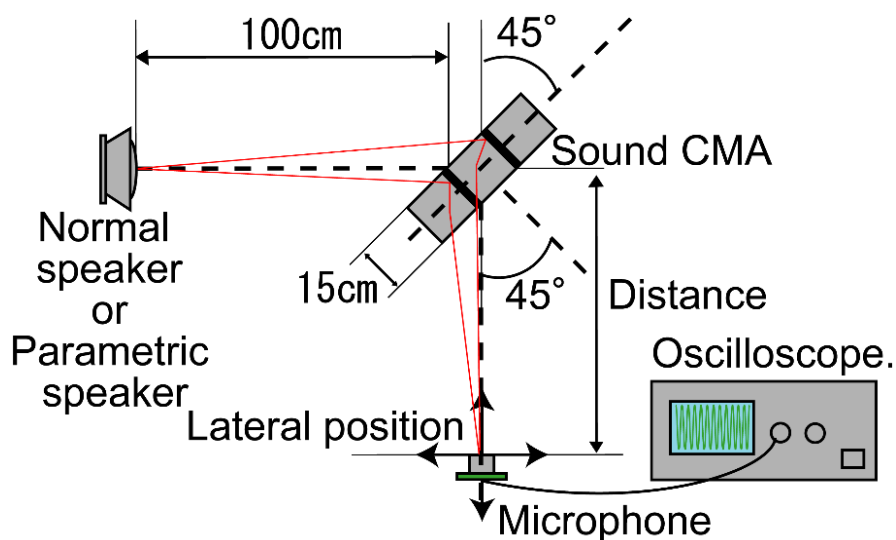


Fig. 6-11. Experimental setups to observe convergence of sound. Sound source is normal speaker or parametric speaker. Designed frequency of auditory sound was 800 Hz.

超音波を搬送波に使用した場合としない場合の音量の強度分布を Fig.6-12 と Fig.6-13 に示す。Fig.6-12 において横方向では音量に大きな変化は見られない。また、距離方向では一応のピークのようなものが存在しているが、このピークは干渉によるものであり、直交ミラーアレイによる収束が行われていない。つまり通常直交ミラーアレイでは開口より長い波長の音波を収束することができない。

超音波を搬送波としている音波を使用した場合、距離方向、横方向のともに理論上の収束位置において強度がピークを取っている。これにより、直交ミラーアレイよって音波が収束されていることが分かる。つまり、超音波を搬送波として使用することで直交ミラーアレイの開口よりも長い波長の音波の収束が可能であることが示されている。よ

って、音源を超音波による振幅変調を行った場合、直交ミラーアレイが搬送波となる超音波を収束させるだけの開口サイズを持っていれば、どのような波長の音波でも収束が可能になったということである。

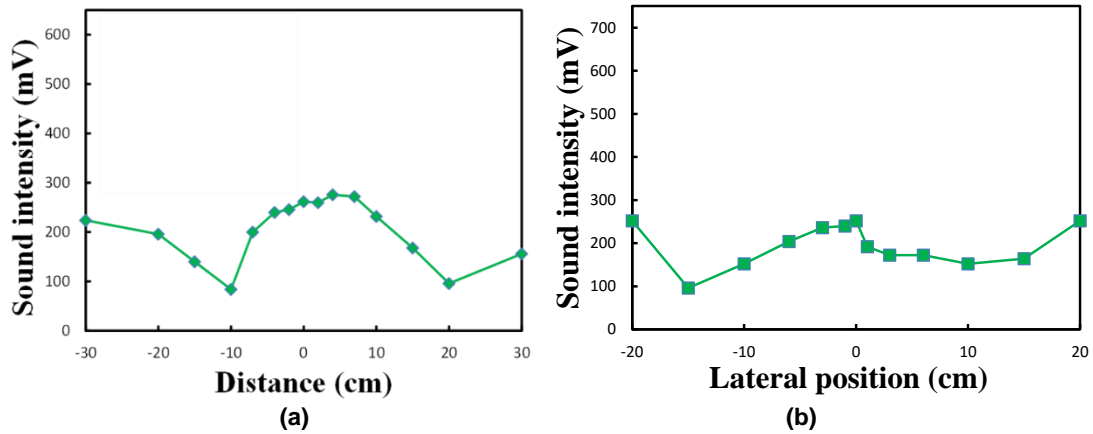


Fig. 6-13. Dependences of sound intensity of normal speaker upon (a) distance and (b) lateral position. Using sound was normal sound. Sound did not converge.

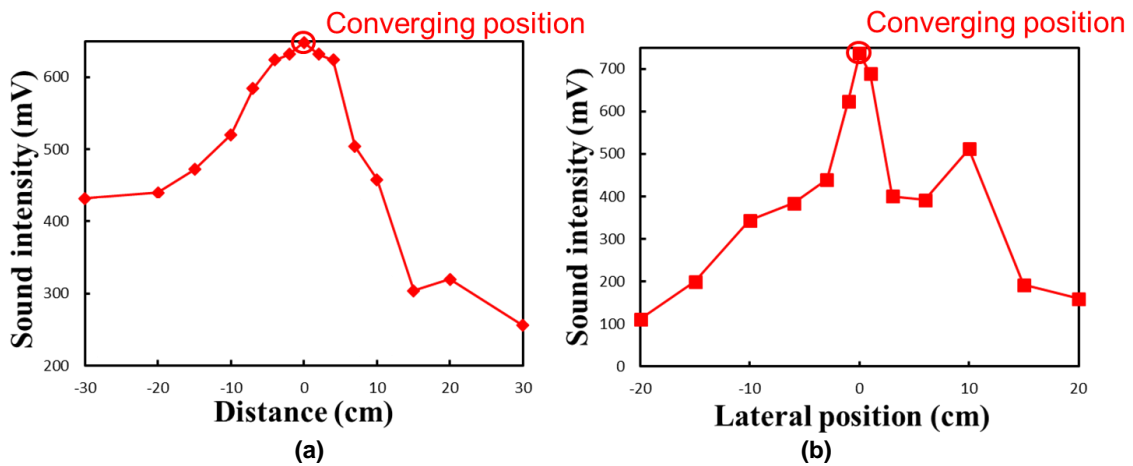


Fig. 6-14. Dependences of sound intensity of parametric speaker upon (a) distance and (b) lateral position. The sound intensity has the maximum at the designed image position.

6-5 第6章まとめ

本章では直交ミラーアレイの原理を利用して音波を任意の空間に収束させることで音による空中像の形成を行った。通常の空中像形成用の直交ミラーアレイでは音波の波長に対して開口の大きさが足りないため音波用の直交ミラーアレイを作成し、直交ミラーアレイによる音波の収束に成功した。また、超音波を搬送波とすることで長波長の音波を短波長の音波の集まりととらえることが可能になったことにより、開口の大きさよりも長い波長を

もつ音波の収束にも成功した。これにより，可聴域の音波は直交ミラーアレイによって収束，結像が可能になった。

第7章 光と熱と音によるマルチモーダル空中表示

これまでの章で直交ミラーアレイを用いて光、熱、音波の空中像をそれぞれ形成する方法について述べてきた。本章ではこれまで紹介してきた直交ミラーアレイを使った様々な感覚に刺激を与えることのできる空中像を組み合わせることで3つの刺激を持ったマルチモーダルな空中の形成を行う。

7-1 光と熱の空中像

光と熱の空中像を形成する場合、直交ミラーアレイは同じものを使用することが可能である。反射による結像であるため収差による結像位置のズレを心配する必要がない。その代わりに、可視光と赤外領域の光線を同時に出力する光源を用意する必要がある。そこでハロゲンランプを光源として光と熱の空中像の形成を試みる。ハロゲンランプは可視光と近赤外から中赤外領域の光線を同時に出力することのできる光源である。ハロゲンランプの出力を Fig.7-1 に示す。ハロゲンランプの出力はほとんどが近中赤外領域の光線である。つまり可視光と赤外線と同時に放出しており、光と熱を同時に収束する本実験に用いる熱光源として十分なものである。

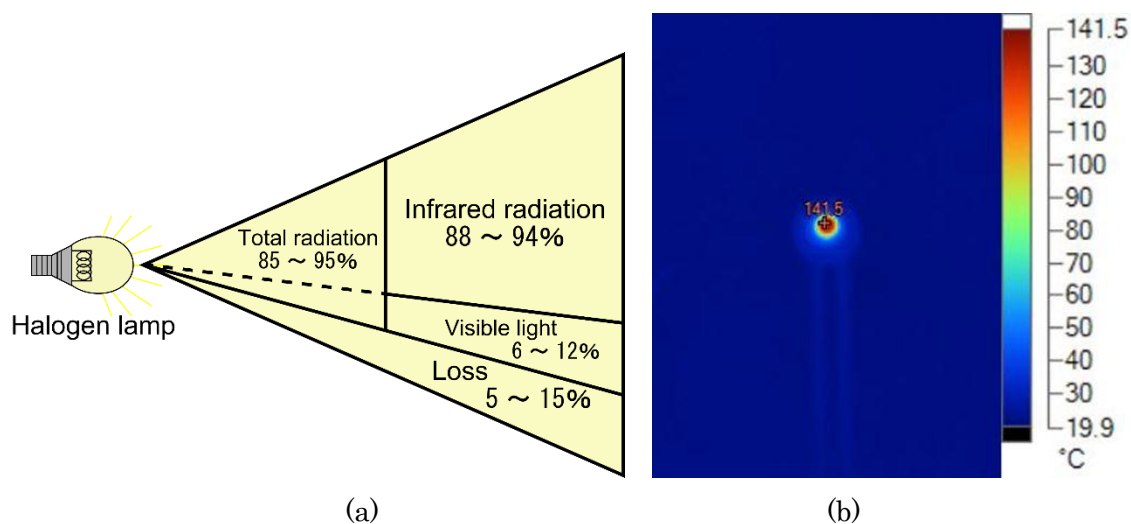


Fig.7-1. Output of the halogen lamp.

(a) The contents of the output. (b) thermal image

直交ミラーアレイを使用して光と熱の同時収束を行い空中像の光強度分布と温度分布の測定を行った。熱光源であるハロゲンランプを光源とした場合と非熱光源である

LED を光源とした場合で比較を行い光と熱の空中像の形成に非熱光源が必要であることを示す。測定に使用した実験系を Fig. 7-2 に示す。光源にはハロゲンランプ (OSRAM64410)を使用した。直交ミラーアレイの大きさは $141 \times 141 \text{ mm}$ で各開口の大きさは $4 \times 4 \text{ mm}$ 、厚さ 8 mm である。実験では直交ミラーアレイを 2 枚ならべて使用した。温度計には白金気体プローブを用い、1 点につき 80 秒静置後の温度を測定した。光源と CMA の距離は 300 mm で入射角は 35 度である。横方向は空中像のある位置を原点とし、空中像に対して右側を正、左側を負とする。横方向の分布測定は右向きに、距離方向の分布測定では直交ミラーアレイから遠ざかる向きにプローブを移動させて行った。

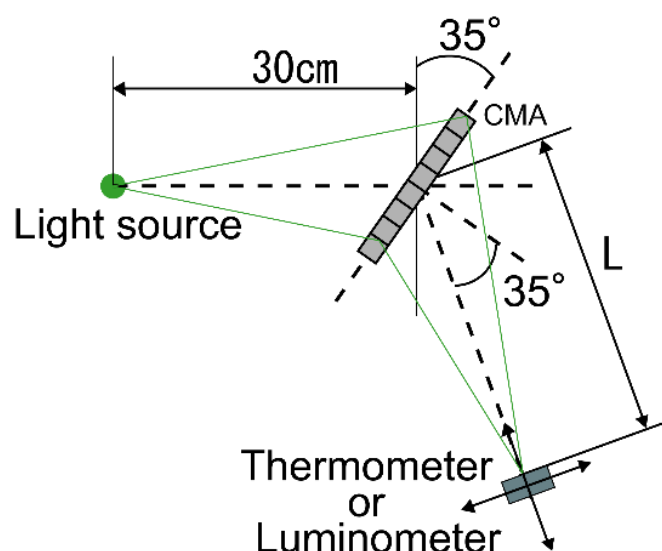


Fig. 7-2. Experimental setups to observe convergence of light and heat. Light source is a green LED or a halogen lamp.

ハロゲンランプと LED による空中像の光強度分布と温度分布をそれぞれ Fig. 7-3, Fig. 7-4 に示す。(a)は直交ミラーアレイからの距離方向の分布、(b)は原理上の結像位置における横方向の分布を示す。LED による空中像は直交ミラーアレイに対して光源と面対称の位置に光強度のピークを持っている。しかし、温度分布は目立った変化が見られない。各図で温度がわずかに単調増加している理由は、時間の経過により室温が変化したためである。

対して、ハロゲンランプを光源に用いた場合、光強度と温度ともに同じ位置で最大値を取っている。つまり、光と熱が同じ位置に収束しているということである。これにより可視光と近中赤外領域の光を同時に出力できる熱光源を使用することで直交ミラー

アレイは光と熱を同時に同じ場所に収束することが可能であるということが示された。

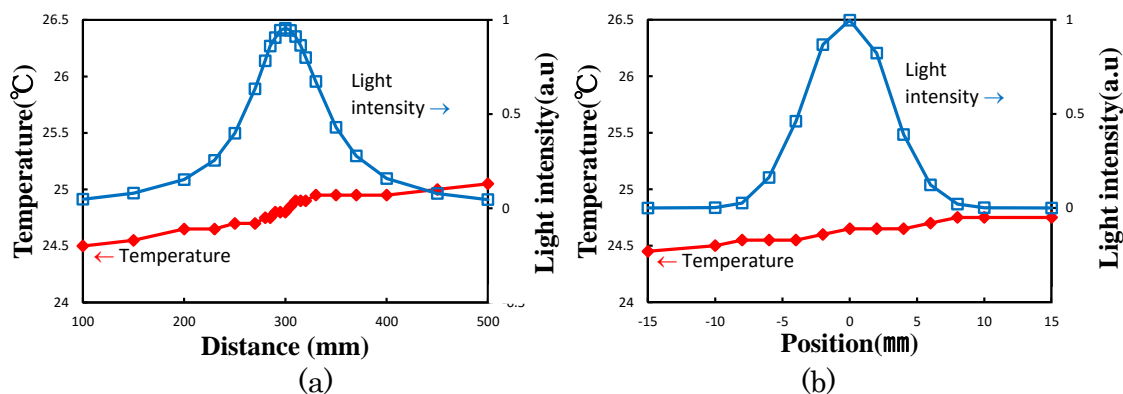


Fig. 7-3. Dependences of temperature and light intensity of the LED image upon (a) distance and (b) lateral position. The light intensity takes the maximum at the image position, while there is no remarkable peak in the temperature.

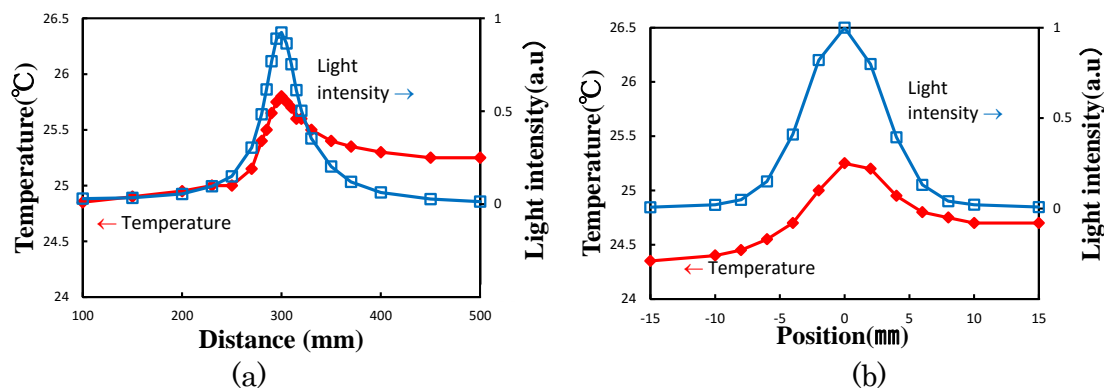


Fig. 7-4. Dependences of temperature and light intensity of the halogen lamp image upon (a) distance and (b) lateral position. The light intensity and the temperature take the maximum at the image position.

熱光源であるハロゲンランプと非熱光源である LED を光源として空中像を形成したときの結像点における温度の時間変化をそれぞれ測定した。結果を Fig.7-5 に示す。

LED を光源とした場合結像点で目立った温度の変化は見られなかった。ごく微量の変化は認められるがこの変化は室温の変化によるものであると考えられる。ハロゲンランプを光源に使用した場合、温度は大きくに増加している。LED を光源として使用した場合と比較するとどれだけ熱空中像が熱を持っているかが分かる。また、空中像を形成してから約 500 秒で温度の上昇が緩やかになる。このことより光と熱の空中像が空間を温めるのには熱単体の空中像と同様ある程度の時間を必要とし、一定の数値で安定することがわかる。これは光源となるハロゲンランプの出力に依存する物であると考ええる。

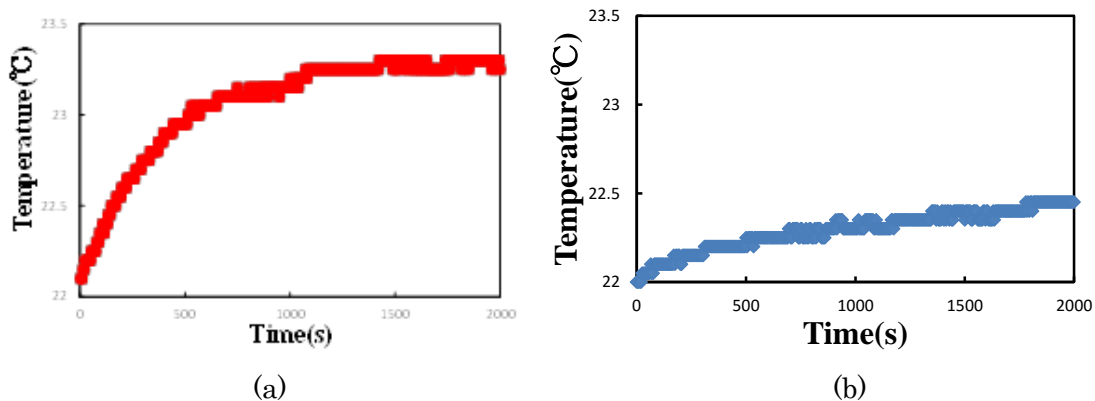


Fig. 7-5. Temporal trace of the temperature at the converging position of (a) the halogen lamp (b) LED.

直交ミラーアレイによってハロゲンランプと LED の空中像を形成し結像点での光と熱の収束を示す画像をそれぞれカメラとサーモグラフィによって取得した。Fig.7-6 に示す。熱の収束を測定するときは収束点にスクリーンを置いてスクリーンが温められる様子を観測した。ハロゲンランプ、LED とともに光によるイメージングが行われていることが確認できる。しかしサーモグラフィによる熱のイメージングを見てみるとハロゲンランプのみがイメージングできており LED は変化が見られない。この画像からも熱光源であるハロゲンランプによって形成された空中像のみが熱を乗っていることがわかる。

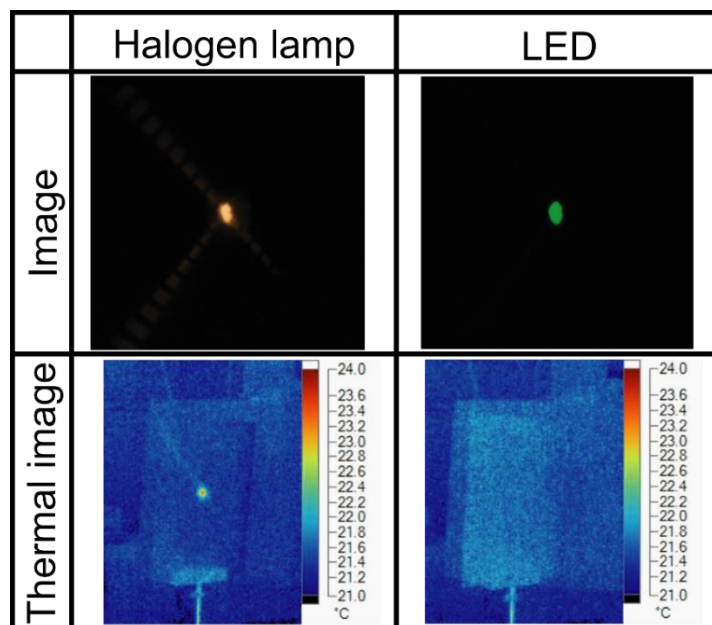


Fig. 7-6. Aerial image taken with the thermal image and viewable image. Using light source is LED and halogen lamp.

また、ハロゲンランプを熱光源として、光と熱の空中像を形成したときの熱の収束をサーモグラフィによって確認した。各距離での赤外線線の収束を熱画像によって Fig.7-7 に示す。

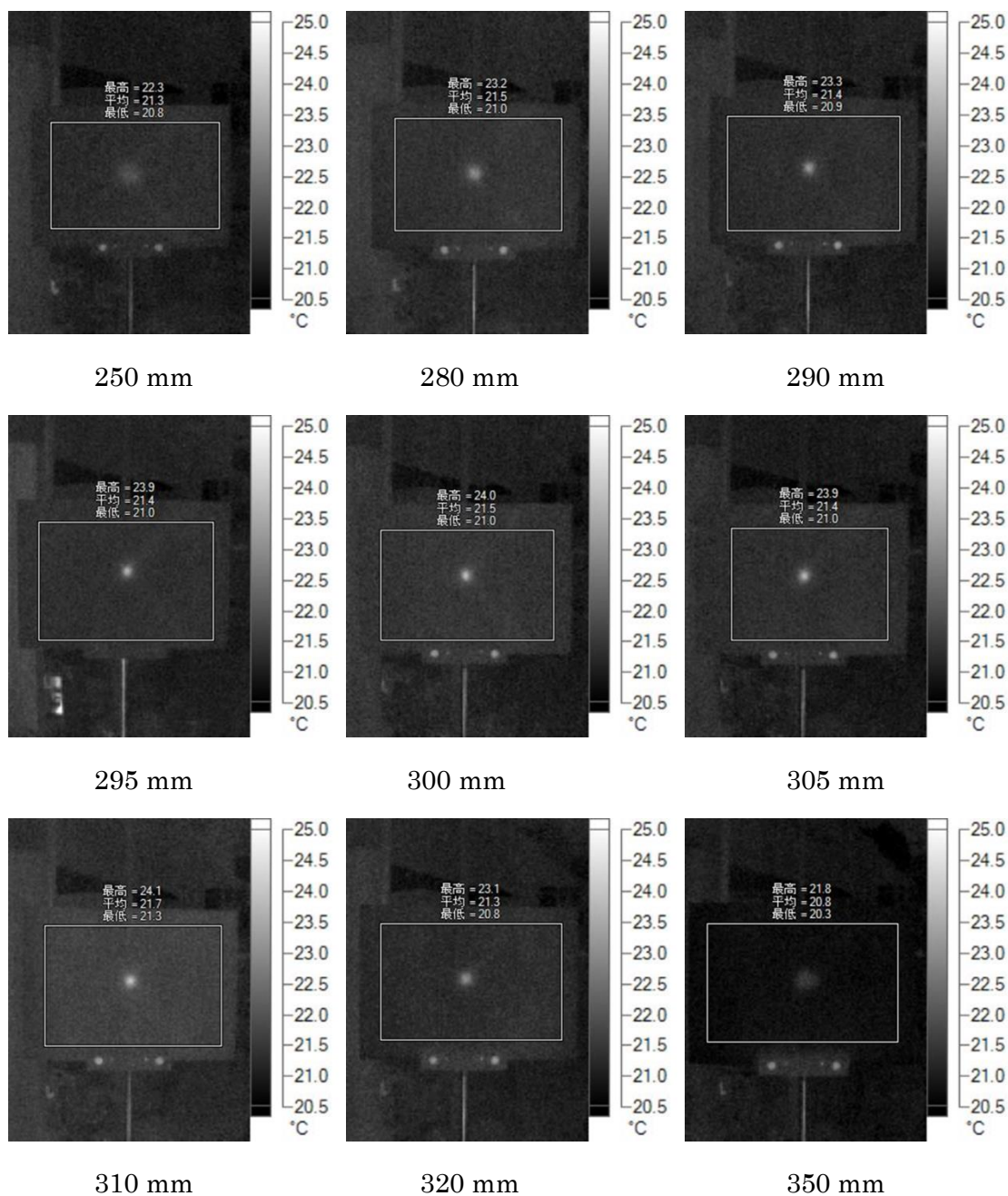


Fig. 7-7. Thermal distributions taken with the thermal camera when the halogen lamp was used for the light source. The thermal images were taken before turned on the light source and at three minutes after lighting the halogen lamp. Local temperature rise was observed.

7-2 光と音の同時収束

光と音波を同時に収束する場合、光と音波それぞれに対応した 2 種類の直交ミラーアレイを同時に使用する必要がある。そのため、2 種類の直交ミラーアレイが互いの働きを阻害する恐れがある。また、音源と光源もそれぞれ用意する。ここでは、実際に 2 種類の直交ミラーアレイを同時に使用することが可能であることを検証する。

光と音の空中像の形成が可能であることを示すために直交ミラーアレイを使用して光と音波の同時収束を行い空中像の光と音の強度分布の測定を行った。今回、2 種類の直交ミラーアレイは重ね合わせて使用した。重ね合わせるとき、直交ミラーアレイの結像位置を決める面对称の基準面が可能な限り近くなるように空中像形成用の直交ミラーアレイを光源、音源側に配置した。

形成に使用した実験系を Fig7-8 に示す。使用する直交ミラーアレイは空中像形成用のものが大きさ $142\text{ mm} \times 142\text{ mm}$ 、開口の大きさ $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 、厚さ 8 mm のものを 9 枚タイリングして使用する。音波用のものは各開口の大きさが $150 \times 150\text{ mm}$ で、厚さが 150 mm のものを使用する。光源には LED を使用する。音源にはパラメトリックスピーカーを使用し 8 kHz の音波を収束する。音源と直交ミラーアレイの距離は 1000 mm で入射角は 45° である。直交ミラーアレイからの距離方向および理論上の収束点における横方向の光と音の強度分布を測定した。

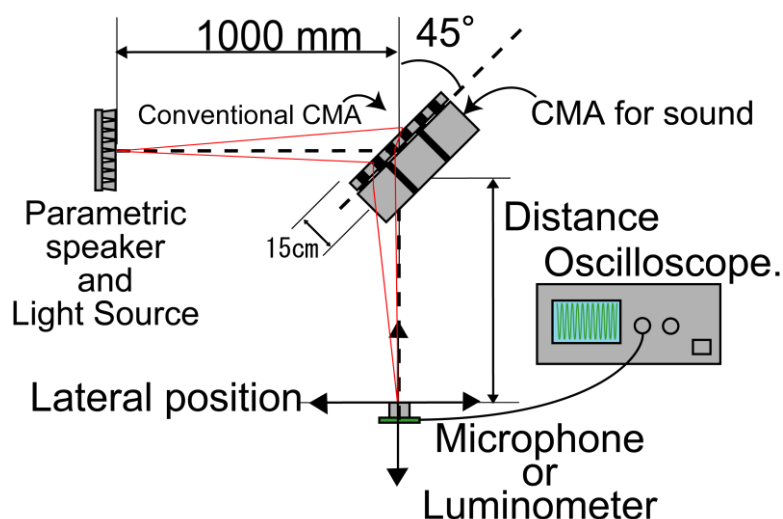


Fig. 7-8. Experimental setups to observe convergence of light and sound. To provide directivity sound wave, a parametric speaker was used for a sound source. Using sound is sin wave of 8 kHz. Light source is LED. That system uses two types CMA.

光と音波を同時に収束したときの強度分布を Fig.7-9 に示す. (a)は直交ミラーアレイからの距離方向の分布, (b)は原理上の結像位置における横方向の分布を示す. 光, 音波ともに強度が最大値を取っている. これにより音波用直交のミラーアレイは空中像形成用の直交ミラーアレイに阻害されることなく 2 種類の直交ミラーアレイを同時に使用することが可能であることが示された. 2 種類の直交ミラーアレイを使用することで光と音波を同時に収束されている. そして光, 音波の強度が最大になる位置が距離方向, 横方向で同じであった. このことより光と音波が同じ位置, 結像されていることが分かる. これは, 2 種類の直交ミラーアレイを重ね合わせるときに直交ミラーアレイの結像位置を決める面対称の基準面を意識して配置したことによる成果である. つまり, 空中像形成用, 音波用の 2 種類の直交ミラーアレイを同時に使用する場合は 2 種類の直交ミラーアレイの収束における面対称の基準面を意識する必要があるということである.

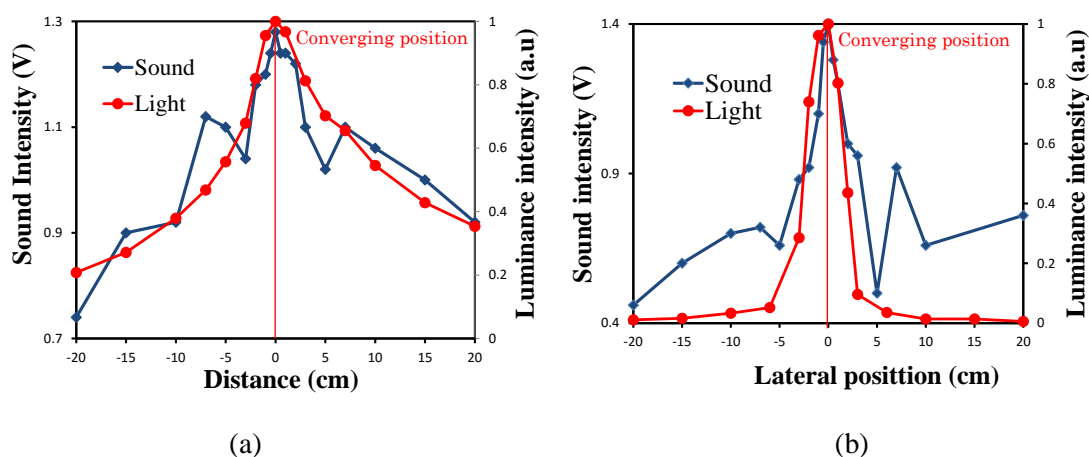


Fig.7-9. Dependences of sound and light upon (a) the distance and (b) the lateral position. The peak to peak value takes a maximum value. Sound and light are converging.

7-3 光と熱と音によるマルチモーダルな空中像の形成

これまで直交ミラーアレイによって収束, 結像してきた光, 熱, 音波の 3 つすべての要素を同時に収束させることでマルチモーダルな空中像の形成を行う [77,78]. 光と熱, 光と音波, 熱と音波はそれぞれ同時に収束可能であることが分かっている. しかしすべてを同時に収束するためには, 空中像形成用と音波収束用の直交ミラーアレイ両方を使用する必要があり, 音波用の直交ミラーアレイがアクリルで構成されているため赤外領域

の光線を阻害する可能性がある。つまり、音波用の直交ミラーアレイを同時に使用した場合、空中像形成用の直交ミラーアレイは赤外領域の光線を収束できない可能性がある。それを確認するために光、熱、音波を同時収束させた空中像の形成を行う。そして、結像が行われているかを確かめるために光、熱、音各成分の強度分布を取得する。

光、熱、音波による空中像を形成したときの実験系を Fig.7-10 に示す。光と音を同時に収束したときと同様に 2 種類の直交ミラーアレイは面対称の基準面が同じになるように重ねて設置する。使用する直交ミラーアレイは空中像形成用の直交ミラーアレイが大きさ 141×141 mm、開口の大きさ 4×4 mm、厚さ 8mm のもの 9 枚をタイリングして使用する。音波用の直交ミラーアレイは各開口の大きさが 150×150 mm で、厚さが 150 mm のものを使用する。光源にはハロゲンヒーターを使用し、音源にはパラメトリックスピーカーを使用した。直交ミラーアレイからの距離方向および理論上の収束点における光、熱、音の強度分布をそれぞれ測定し、すべての要素が同時に収束可能であることを実証する。直交ミラーアレイからの距離方向および理論上の収束点における横方向の各強度分布を測定した。

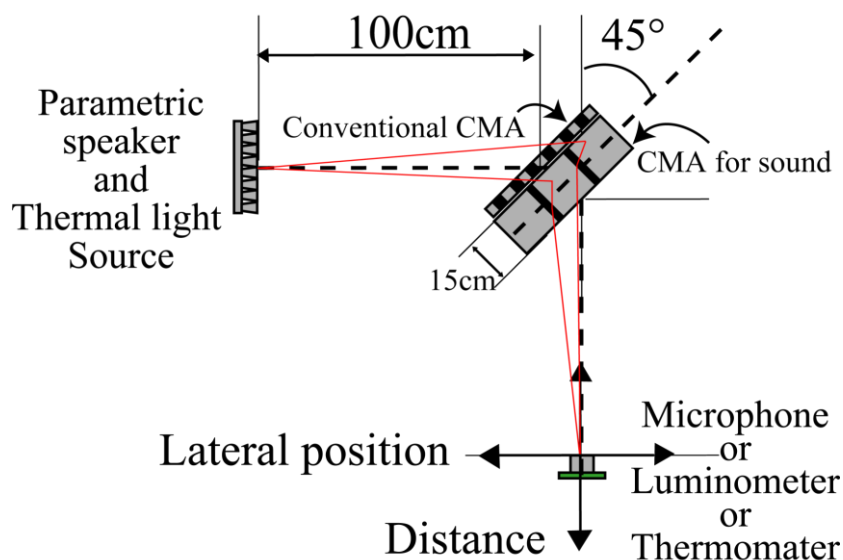


Fig. 7-10. Experimental setups to observe convergence of light and sound. In order to provide directivity sound wave, a parametric speaker was used for a sound source. Using sound is sin wave of 8 kHz. Light source is halogen heater. That system uses two types CMA.

形成された空中像の光、熱、音の強度分布をそれぞれ Fig.7-11, Fig.7-12, Fig.7-1 に示す。各グラフの(a)は直交ミラーアレイからの距離方向の分布、(b)は原理上の結像位

置における横方向の分布を示す。光，熱，音すべてが理論上の収束位置で最大値を取得しており問題なく光，熱，音すべての結像が行われていることが分かる。特に音波用の直交ミラーアレイによって熱の収束が妨げられる恐れがあったが問題はなかった。これは音波用の直交ミラーアレイの開口のサイズが大きいためいくつかの赤外領域の光線は阻害されることなく開口を通るためその成分が収束されることによって熱の結像が行われたためである。

以上のように2種類の直交ミラーアレイを使用することで光，熱，音の3つの要素によって構成されたマルチモーダルな空中像の形成に成功した。これにより空中像を目だけでなく肌や耳でも感じるできるようになった。

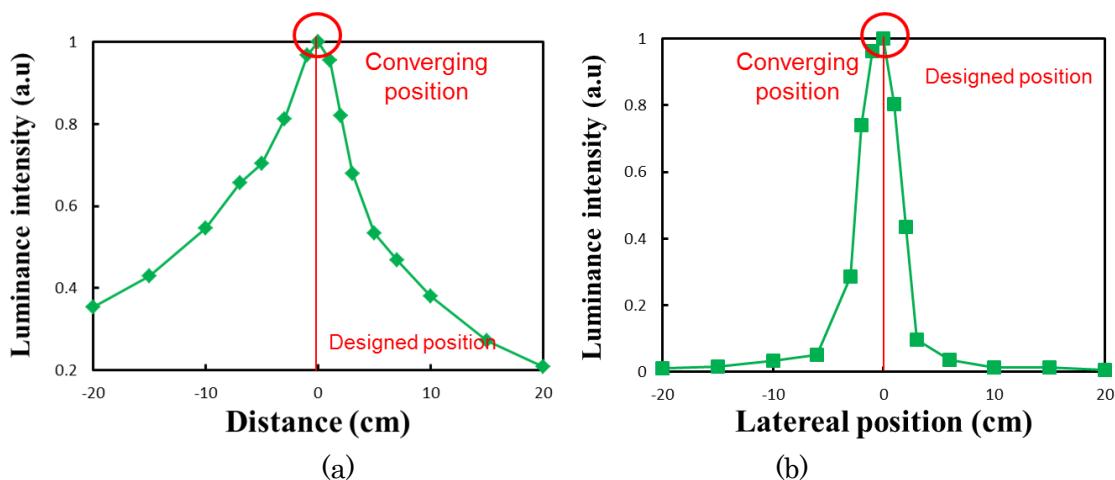


Fig. 7-11. Dependences of light intensity of the halogen heater image upon (a) distance and (b) lateral position. The light intensity takes the maximum at the image position.

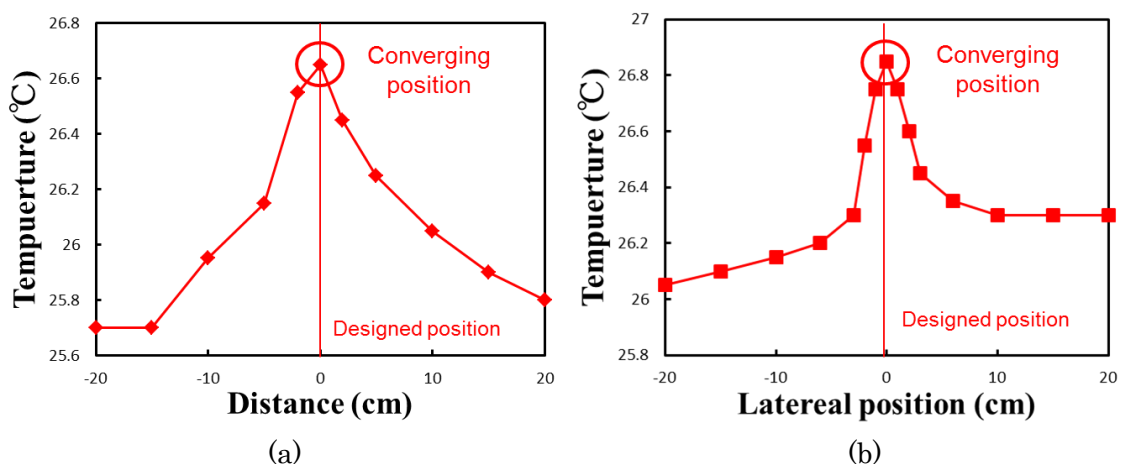


Fig. 7-12. Dependences of thermal of the halogen heater image upon (a) distance and (b) lateral position. The thermal takes the maximum at the image position.

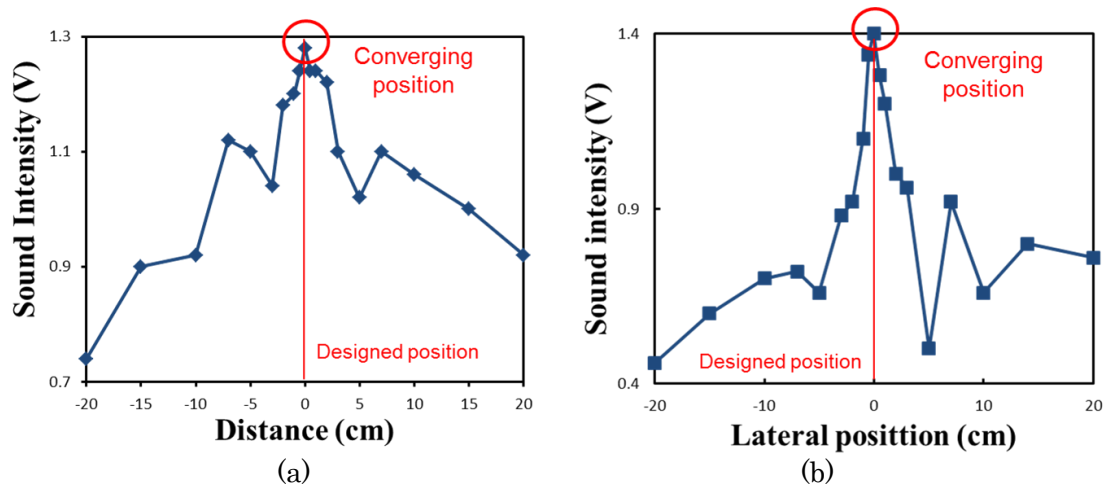


Fig. 7-13. Dependences of sound upon (a) distance and (b) lateral position. The sound intensity takes the maximum at the image position.

7-4 第7章まとめ

本章では2種類の直交ミラーアレイを用いて光，熱，音波によって構成されたマルチモーダルな空中の形成を行った。2種類の直交ミラーアレイを同時に利用するにあたって互いに干渉する恐れがあったが，問題なく重ね合わせて使用できることが本章において実証された。

マルチモーダルな空中像の形成が可能になったおかげで空中像は注目を集める能力の増加させることができた。この注目を集める能力の高さはデジタルサイネージの分野で大きな武器になる。

第 8 章 結論

8-1 まとめ

本論文では直交ミラーアレイを用いて光，熱，音の 3 つの要素を持った空中像の表示技術について述べた。そして，それらを利用したマルチモーダルな空中像の形成を行った。

第 2 章では空中像表示技術について述べ，研究目的であるデジタルサイネージやマルチモーダル表示に最適な空中表示技術の検討を行った。これにより，本研究の目的に直交ミラーアレイが適していることが分かった。

第 3 章，4 章ではキーデバイスとなる直交ミラーアレイの構成や空中像の形成原理，形成される空中像の性質，直交ミラーアレイの使用方法について述べた。直交ミラーアレイの

第 5 章では直交ミラーアレイによる熱空中像の実現とその性質について述べた。直交ミラーアレイによる熱空中像は赤外線のリフレクティブ効果によって形成される。直交ミラーアレイは反射によって収束を行うことが可能であるため波長にとらわれず可視光とともに赤外線の収束が可能である。これを利用し赤外線を収束することで直交ミラーアレイは熱空中像を形成することができる。この熱空中像は高出力の熱源をしようすることで人の肌でも感じる事が可能な熱空中像になる。

第 6 章では直交ミラーアレイによる音波の収束について述べた。音波を収束するためには従来の直交ミラーアレイでは波長に対して開口のサイズが足りないため専用の直交ミラーアレイを作成した。また，超音波を搬送波として使用することで開口のサイズよりも波長の長い音波の収束に成功した。これにより，可聴域全体の音波の収束が可能になった。

第 7 章では第 5 章，6 章で述べた熱空中像，音波による空中像に従来の直交ミラーアレイによる空中表示を組み合わせることで可能になるマルチモーダル空中像の形成に関して述べた。光とともに熱や音波によって空中像を形成することに成功しているのは直交ミラーアレイのみである。直交ミラーアレイは反射を利用している為このような複数の要素を扱うことがかかっている。光，熱，音波による空中像は 2 種類の直交ミラーアレイを同時に使用することで実現した。

今回形成に成功したマルチモーダルな空中像の技術によって空中像は注目を集める能力が今までよりも増加したといえる。注目を集める能力の高いマルチモーダルな空中像はデジタルサイネージの分野で大きな武器になるはずである。

8-2 今後の展望

今後はほかの空中像形成素子と直交ミラーアレイを組み合わせることでよりデジタルサイネージに有効な空中像が形成できないかを検討したいと考えている。例えば、直交ミラーアレイより AIRR との組み合わせである。AIRR は直交ミラーアレイよりも広い視野域を持つが、結像距離が長くなると空中像に像の広がりがおきる。直交ミラーアレイと AIRR を組み合わせることで互いの利点が活かされた視野角が広く、像の広がりの起さない大型空中像の形成が可能になるのではないかと考えている。

参考文献

1. T. Baba, K. Kushiya, and K. Doi: "ThermoGame: video game interaction system that offers dynamic temperature sensation to users." In ACM SIGGRAPH 2010 Posters, No. 51 (2010).
2. K. Kumiko, T. Baba K. Doi and S. Sasada: "Thermal design display device to use the thermal tactile illusions: Thermo-Paradox." Proc. ACM SIGGRAPH 2010 Posters, No. 99 (2010).
3. Y. Ikei, K. Abe, K. Hirota and T. Amemiya: "A Multisensory VR System Exploring the Ultra-Reality", Proc. of VSMM 2012, pp.71-78 (2012).
4. T. Amemiya and H. Gomi: "Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically", Proc. of Eurohaptics 2014, Vol.II, pp.88-95 (2014).
5. K. Kushiya, T. Baba, K. Doi ,S. Sasada: "Thermo-Paradox Thermal Design Display device to use the thermal tactile illusions," ACM SIGGRAPH2010 Poster (2010).
6. 高山裕行, 山本晃生, 樋口俊郎: "物体表面における濡れ感の再現提示に関する基礎的検討," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-I14, (2008).
7. 小林孝浩,福森 みか: "温度覚による触図表現の拡張「温感触図」," 日本バーチャルリアリティ学会第 16 回大会, p.185-186, (2011).
8. 串山久美子: "Thermo Drawing:冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した温度描画システムの開発", 情報処理学会インタラクション 2012, pp 723-728 (2012).
9. 井野秀一: "物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質感触覚ディスプレイ方式の提案ー感覚フィードバック型ハンドのための基礎的研究ー" 計測自動制御学会論文集, vol. 30 (3), pp. 345-351 (1994).
10. Johansson, R., Landstrom, U., Lundstrom, R.: "Responses of mechanoreceptive afferent units in the glabrous skin of the human hand to sinusoidal skin displacements," Brain Res. 244, 17-25 (1982).
11. Rekimoto, J.: Traxion: "a tactile interaction device with virtual force sensation," Proc. Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 427-431 (2013).
12. Tappeiner, H.W., Klatzky, R.L., Unger, B., Hollis, R.: Good vibrations: "Asymmetric vibrations for directional haptic cues," Proc. Proceedings of World Haptics Conference, pp. 285-289. IEEE Computer Society (2009)
13. M. Kawazu and T. Imokuti: "Imaging device using a roof mirror lens array,"

- Applied Optics, vol. 24(24), pp. 4300–4306 (1985).
14. R. Vořlkel, H. P. Herzig, P. Nussbaum, R. Dařndliker, and W. B. Hügler: “Microlens array imaging system for photolithography,” *Optical Engineering*, vol. 35(11), pp. 3323–3330 (1996).
 15. J. Aria, F. Okano, H. Hoshino, and I. Yuyama: “Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional photography for three-dimensional image,” *Applied Optics*, vol. 37, pp. 2034–2045 (1998).
 16. F. Okano and J. Arai: “Optical shifter for a three-dimensional image by use of gradient-index lens array” *Applied Optics*, vol. 41(20), pp. 414–4147 (2002)
 17. C. Hembd-Sölner, R. F. Stevens, and M. C. Hutley: “Imaging properties of the Gabor Superlens,” *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, vol. 1(1), 94–102 (1999).
 18. N. Lindlein: “Simulation of micro-optical systems including microlens arrays,” *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, vol. 4(4), S1–S9 (2002).
 19. F. Okano, J. Arai, and M. Okui: “Resolution characteristics of a focal array optics,” *Proc. of SPIE*, vol. 6016, 601601 (2005).
 20. S.-W. Min, M. Hahn, J. Kim, and B. Lee: “Three-dimensional electro-floating display system using an integral imaging method,” *Optics Express*, vol. 13, 4358–4369 (2005).
 21. M. Ishikawa: “A proposal to create the impression of a miniature garden, and the development of a glasses-free small 3-D display,” *Pioneer R&D*, vol. 12(3), pp. 47–58 (2003).
 22. Y. Takaki and N. Nago: “Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display,” *Optics Express*, vol. 18(9), 8824–8835 (2010).
 23. J.-S. Jang and B. Javidi: “Three-dimensional synthetic aperture integral imaging,” *Optics Letters*, vol. 27, pp. 1144–1146 (2002).
 24. J. L. Vrachan and C. L. Thornton: “Aerial display system with low cost plastic spherical mirror,” US 7614749 B2 (2009).
 25. F. Okano, M. Okui, and J. Arai: “Depth control a focal lens array for integral imaging,” *Proc. SPIE* 5599 (2004).
 26. R. F. Stevens, and T. G. Harvey: “Lens arrays for a three-dimensional imaging system,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 4, pp. S17-S21 (2002).
 27. 石川洵: “空間映像表示装置,” 特開 2001-133729 (2001).
 28. 石川大, 采原克美, 富澤功, : “「フローティングインターフェース」の開発,” *PIONEER R & D* 16, pp. 50-61 (2006).
 29. 太田昌宏, 小池崇文, 苗村健: “3次元ディスプレイとアフォーカル系を併用した

- 空中像提示手法の基礎検討,” 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 2C2-1 (2007).
30. 和田拓朗, 苗村健: “FloasionTable: 複合現実展示のための多方向から鑑賞可能な空中立像ディスプレイ,” 電子情報通信学会技術研究報告 MVE 109, pp. 29-34 (2010).
 31. 木島竜吾, 渡辺純哉, 近藤大祐: “再帰透過性素材を用いた虚像投影式頭部搭載型プロジェクタ,” 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 108, pp. 7-12 (2008).
 32. 岡野文男, 洗井 淳, 奥井誠人: “屈折率分布レンズアレイによる 3 次元像の形成”, レーザー研究, 731—736 (2002).
 33. 宮崎大介: “三次元像の空中表示技術の現状と展開,” 光学 40 (2011) 608-615
 34. 園田貴紀, 岡田裕也, 山本裕紹, 陶山史朗: “多焦点レンズと 高速 2D 表示を用いた新たな体積型 3D 表示方式の提案”, 動的画像処理実用化ワークショップ 2011 講演概要集 (2011) pp. 349—353.
 35. 宮崎大介, 平野登, 大野圭介, 前川聡: “透過型面対称結像光学素子を用いた 体積走査型 3 次元ディスプレイ”, 3D コンファレンス 2009, 9-4 (2009).
 36. 宮崎大介: “体積走査法による 3 次元空中像形成”, OPJ2009, 25pAS1 (2009).
 37. S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba: "Transmissive optical imaging device with micromirror array," Proc. of SPIE, vol. 6392, 63920E, (2006).
 38. S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba: “Advances in passive imaging elements with micromirror array,” Proc. SPIE, vol. 6803, 68030B (2008).
 39. S. Hisatake, S. Suda, J. Takahara and T. Kobayashi: “Transparent volumetric three-dimensional image display based on the luminescence of a spinning sheet with dissolved Lanthanide (III) complexes,” Opt. Express, 156635—6642 (2007).
 40. 石川尋代, 斎藤英雄: “レーザプラズマ式 3 Dディスプレイにおける点列を用いた物体表現”, 映像情報メディア学会誌 63, pp. 665-672 (2009).
 41. H. Ishikawa, H. Watanabe, S. Aoki, H. Saito, S. Shimada, M. Kakehata, Y. Tsukada, H. Kimura: “Surface representation of 3D objects for aerial 3D display,” Proc. SPIE 7863, 78630X(2011).
 42. Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J.Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki. : “Fairy lights in femtoseconds: aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields,” In ACM SIGGRAPH 2015 Talks (2015)
 43. R. Hudec: “Kirkpatrick-Baez (KB) and Lobster Eye (LE) Optics for Astronomical and Laboratory Applications,” X-Ray Optics and Instrumentation 2010, Article ID 139148 (2010).

44. D. Miyazaki, N. Hirano, Y. Maeda, K. Ohno, and S. Maekawa: "Volumetric display using a roof mirror grid array," Proc. SPIE, vol. 7524, 75240N (2010).
45. L. J. Hornbeck and W. E. Nelson: "Bistable deform-able mirror device," OSA Technical Digest Series 8, p. 107 (1988).
46. 前川 聡, 仁田功一, 的場修: "微小 2 面コーナリフレクタアレイを用いた対称結像光学素子: 実像を結像する「鏡」," 映像情報メディア学会技術報告 30, 49-52 (2006).
47. 前川聡: "2 面コーナリフレクタアレイによる多視点から観察可能な空間映像表示", 3D 映像, vol.21, No.4(2007).
48. 前川聡, マルコンシャンドル: "空間映像による 対面型コミュニケーション", 3D コンファレンス 2009, P17 (2009).
49. 前川聡: "マイクロミラーアレイによる 3 次元実像の結像" OPJ2009, 25pAS4 (2009).
50. H. Bando, S. Suyama, H. Yamamoto: "Floating display of LED signage by use of crossed mirrors" Proc. IDW'11, 935-938 (2011).
51. R. Kujime, S. Suyama, and H. Yamamoto: "Thermal and visual 3D display by use of crossed-mirror array," Proc. IDW/AD'12, 3Dp-21 (2012).
52. 橋川広和: "反射型対称結像素子を用いた空中映像表示装置の試作", 映像情報メディア学会報告書, vol.34, No.12, pp. 9-11 (2010).
53. R. Kujime, S. Suyama, and H. Yamamoto: "Different aerial image formation into two directions by crossed-mirror array" Optical Review, vol. 22, issue 5, pp. 862-867 (2015).
54. R. Kujime, S. Suyama, and H. Yamamoto: "Crossed-Mirror Array Configuration with One-Side Mirrors for Four-View Aerial LED Signage," Proc. IMID 2014, 6-4 (2014).
55. R. Kujime, K. Miyamoto, S. Suyama, and H. Yamamoto: "System of crossed-mirror array to converge illumination light for culturing chlorella," Proc. JSAP-OSA Joint Symposia 2014, 20p- C4-3 (2014).
56. R. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto: "Viewing angle of aerial image by use crossed-mirror array" Proc. IWH014, 16p 06 (2014).
57. R. Kujime, S. Suyama, H. Mizushina, and H. Yamamoto: "Design of CMA to Improve Luminance of Aerial Image" JSAP-OSA Joint Symposia2016, 13a-C301-3 (2016).
58. 高田英明, 伊達宗和, 黒川義昭, 本多悠真, 小島明: "3D 映像音響システムによる映像と音響の空間的な相乗効果", 3次元画像コンファレンス, 講演予稿集 CD, P-4 (2014).
59. H. Yamamoto, and S. Suyama: "Aerial 3D LED display by use of retroreflective sheeting", Proc. SPIE, vol. 8648, 86480 (2013).

60. H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama: "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Optics Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919-26924 (2014).
61. Y. Tomiyama, S. Suyama, and H. Yamamoto: "Fabrication of special glass-beads retroreflector for AIRR," *Proc. IDW*, vol. 21, pp. 395-398 (2014).
62. H. Yamamoto and S. Suyama: "Floating Digital Signage Based on Aerial Imaging Techniques," *Proc. IDW*, vol. 21, pp. 814-817 (2014).
63. Y. Tokuda, K. Onuki, M. Takahashi, S. Onose, T. Okamoto, M. Hirose, and H. Yamamoto, "Aerial Imaging by Retro-Reflection with Transparent Retro-Reflector (AIRR with TRR)," *Proc. IDW*, vol. 22, pp. 830-833 (2015).
64. K. Onuki, M. Nakajima, T. Okamoto, N. Kawagishi, and H. Yamamoto: "Brightness improvement by polarization modulation in the aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Proc. 2016 OSA Imaging and Applied Optics Congress (3D)*, JT3A.65 (2016).
65. T. Iwane, M. Nakajima, and H. Yamamoto: "Light-field display combined with aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Proc. 2016 OSA Imaging and Applied Optics Congress (3D)*, TM3A.3 (2016).
66. S. Onose, T. Okamoto, K. Onuki, M. Takahashi, and H. Yamamoto: "Developments of Large Aerial LED Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)," *IMID 2016 DIGEST*, E45-3 (2016)
67. K. Onuki, T. Okamoto, S. Onose, M. Nakajima, N. Kawagishi, and H. Yamamoto: "Comparisons of Retro-Reflectors for Polarization Modulation in the Aerial Imaging by Retro-Reflection," *IMID 2016 DIGEST*, P2-60 (2016).
68. H. Yamamoto: "Real Image Forms SF Display," *IMID 2016 DIGEST*, F78-2 (2016).
69. R. Kujime, and H. Yamamoto: "Preventing Surface Reflected Light on RetroReflector in AIRR" *Proc.IDW'16*, FMC2 – 2 (2016)
70. 安井雅彦, M. Sakti Alvissalim, 山本裕紹, 石川正俊: "空間映像と高速 3D ジェスチャー認識技術の統合による低遅延な立体映像作業環境の実現", *計測自動制御学会論文集*, Vol. 52, No. 3, pp. 134-140 (2016).
71. 久次米亮介, 宮本康平, 陶山史朗, 山本 裕紹, "直交ミラーアレイを用いた空中への音の収束", *OPJ*, 5aDS12 (2014).
72. R. Kujime, S. Suyama, and H. Yamamoto: "Bidirectional Visual and Thermal 3D Information Display by Use Crossed-Mirror Array," *Proc.DH2014*, JT4A.23(2014).
73. 久次米亮介, 宮本康平, 陶山史朗, 山本 裕紹: "直交ミラーアレイによって収束された音波の波形", *第 62 回応用物理学会春季学術講演会*, 14a-A11-4 (2014).

74. R. Kujime, S. Suyama, H. Mizushina, and H. Yamamoto: "Wave form of converged sound by Crossed-mirror array" Proc. IMID2015, 3Dp1 - 6 (2015).
75. 久次米亮介, 水科晴樹, 陶山史朗, 山本 裕紹: “直交ミラーアレイによる長波長音波の空間収束のための手法” , OPJ 2015, 29pE12 (2015)
76. R. Kujime, S. Suyama, H. Mizushina, and H. Yamamoto: " How to Converge Long Wave-Length Sound by Small-Aperture Crossed-Mirror Array " Proc.IDW'15, 3Dp1-6 (2015).
77. 久次米亮介, 水科晴樹, 陶山史朗, 山本 裕紹: “直交ミラーアレイを用いた光, 熱, 音によるマルチモーダル空中像”, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 32A-4 (2014).
78. R. Kujime, S. Suyama, H. Mizushina, and H. Yamamoto: "Converging light, thermal and sound wave by 2 types crossed mirror array" JSAP-OSA Joint Symposia2015, 15p-2F-13 (2015).

謝辞

本論文をはじめ学生生活における研究を支えてくださったすべての方皆様に心から感謝いたします。

指導教員である陶山史郎教授には本研究をはじめ研究人生で必要なことの多くをご指導いただきました。本当に、ありがとうございました。

水科先生には研究だけでなく博士の学生として足りない部分をフォローしていただきました。感謝いたします。

宇都宮大学山本先生には学生の身分でありながら研究員として迎え入れていただくなど研究の指導はもちろん、学生の身分だけでは体験をすることのできない研究生生活をする機会をいただくなど、多くのことでお世話になりました。ここに感謝の意を示します。

技術職員の宮本康平さんには音波用の直交ミラーアレイの作成をしていただきました。そのうえで設計の段階から工作方法やそれに合わせた構成のアドバイスなどをいただきました。宮本さんの協力のおかげで直交ミラーアレイによる音波の収束を形にすることができました。大変感謝しています。

研究を続けるうえで独立行政法人日本学生支援機構からは奨学金を、独立社会法人 NEC C&C 財団には国際会議参加のための研究助成金をいただきました。まことにありがとうございました。

最後になりましたが、本研究でお世話になった人をはじめ同研究室に所属する皆さま、インターンシップ先である宇都宮大学オブティスセンター山本研究室の皆様、学会参加中にお世話になった他大学の先生、学生及び企業の方、そして私生活を支え続けてくれた家族、すべての方がたに深い感謝の意をここにささげさせていただきます。