

非接触社会を実現する空中ディスプレイ技術－2021 年 5 月

Aerial display technology to realize a non-contact society

桑山 哲郎 (3D フォーラム, 元 キヤノン株式会社)

Tetsuro KUWAYAMA (3D Forum, Former Canon Inc.)

1. はじめに

本稿を執筆している 2021 年 5 月の時点では、新型コロナウイルスの流行の最中であり、今後の見通しが見えない状況である。「何も無い空中に映像が表示されていて、手を出すと通り抜けてしまう。けれども指先でスイッチやキーを押すことはできる。」このような「しかけ」は多くの研究者を魅了し、古くからいろいろな提案や試作が行われてきているが、現在の社会状況から非接触での操作に対するニーズが急速に高まり注目が集まってきた。非接触社会を実現するには、操作を検出する手段、使用者へのフィードバック手段と空中ディスプレイが必要である。これらの個々の技術は古くから存在しているものばかりであるが、使用目的のため選択・組み合わせられて効果的な構成が模索されている。

本稿は、依頼により執筆した解説¹⁻²⁾に、近年発行の資料³⁻⁵⁾を加えてまとめたものである。情報は日々更新されていて、そのすべてに目を通すことは困難であるが、引用文献を可能な限り掲載したので、お読みいただいている皆様の興味に応じ原著を参照されることをお勧めする。

本稿では、非接触の操作を実現する技術要素と、空中像に関して得られる知見を手短かに解説した後、とくに空中ディスプレイ技術についてこれまでの解説であまり触れられていない点に留意して解説する。この分野は日々新しい商品が現れ、関連する機関や企業も多いため全体状況を十分に把握することは難しい。各企業や組織からのプレス発表資料や web サイトの情報に頼る部分が多く、満遍なく公平に解説することはなかなか困難である。通常の解説とは異なり、URL アドレスの紹介を多用するが、ぜひ関連情報を検索いただきたい。また内容は私自身が出会った空中ディスプレイに大きく依存しているが、ご容赦いただきたい。

非接触の操作に関心が高くなったのはごく最近であるが、空中ディスプレイ技術は大変古い時代から存在し、また著作なども数多く存在している。最新の光学技術に繋がる著書として、1972 年に刊行された「三次元画像工学」(大越孝敬：著)⁶⁾には既に再帰反射光学部材・スクリーンが記載されている。1991 年の新版⁷⁾に続き、3D 映像表示と空中ディスプレイ【注：元の画像は多くの場合 2D であるが空中に生じることの価値が高い】に関しては多くの著作⁸⁻¹²⁾がある。どれも非接触の操作に対して有益な情報が収められているが、その一部をリストアップする。また空中ディスプレイを扱う博士論文¹³⁻¹⁵⁾の全文が容易に入手できることは大変有益で、極めて多くの情報が収められている。

2. 現状の接触式操作部と非接触化

本題に入る前に、現状の押しボタン式の操作部と非接触化について簡単に触れる。図 1 は、エレベーター内の操作ボタンである。行先の階数のボタンを機械的に押し込むと、手応えがあり入力された階数が点灯により表示される。入力の検出には適切な感度設定が行われていて、使用者の意思に反した入力が行われないようになっていて、またボタ



図 1 エレベーターの操作ボタン

ンの点灯により入力結果を確認することができる。これを非接触にするには、多少問題が発生するが、後付けでもかなりのレベルが実現できる。

表 1 は、現状使用可能な非接触入力の見出手段の概要を示している。光学的な手段と、静電容量などの手段が存在しているが、工学技術であるので、原理は異なっても代替手段で実現できる場合が多く、装置を構成するには多くの選択肢がある。

表 1 操作見出手段

光学 (パッシブ)	単一カメラ (赤外光照明を用いることが多い)
	ステレオカメラ (赤外光照明を用いることが多い)
光学 (アクティブ)	TOF (Time of Flight) センサーと照射光源
	ステレオ測距 (パターンあるいは格子投影を組合せ)
	光ビーム遮断検出 (光源とセンサーの組合せ)
	反射光量検出
静電容量検出	
超音波による物体検出	

また、非接触操作では入力を使用者にフィードバックする手段にも工夫が必要である。こちらもそれぞれの空中ディスプレイの状況との関連が深い。多くはディスプレイ自体の明るさ、形、色などを変えるが、音や音声による情報伝達、超音波により疑似的な触覚を与える(ハプティックインターフェース)、あるいは熱を空中に結像して使用者に温感を与えるなどの技術が存在している。

空中ディスプレイと組み合わせる操作見出で、特筆すべき商品として“LEAP MOTION Controller” (商品名) 16)がある。2 台の赤外カメラと赤外光源で構成されたセンサーであるが、コンパクトな装置ながら両手の 10 本の指と指の関節、掌まで 3D 計測した結果が出てくる。多くの実験や装置で採用されている。

3. 空中ディスプレイを通して得られる知見

公共の場には度々空中ディスプレイが出現する。大通りに面した歩道、ニューヨーク 5th Street Cartier のウィンドウの外に、宝石を下げた掌が出現など数多くの試みが行われてきたが、依然として理解は一部の人にとどまっている。空中ディスプレイと真剣に向き合うことで、映像・画像の本質に対する理解が得られるのではないかと私は考えている。工学技術としての映像・画像を形成する要素別に、実物視/厳密な再現と工学的な実現手段を表 2 に整理する。

表 2 工学技術としての映像・画像 17)

要素	実物視/ 厳密な再現	工学的手段
形・大きさ	実物通りの形・大きさ	線透視図
奥行き	実物通りの奥行き	いろいろな手段
明暗	実物の輝度	輝度域の圧縮
色	分光エネルギー分布	RGB で撮像・表示
動き	各時刻での忠実な動き再現	時分割サンプリング/ 仮現運動を用いた動き再現

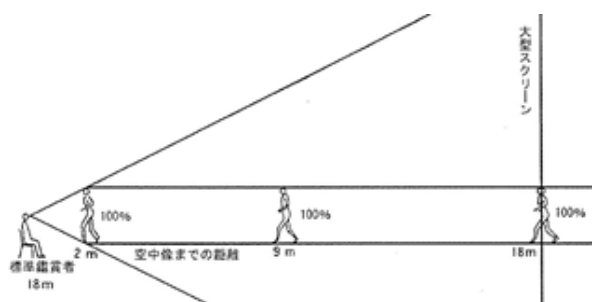
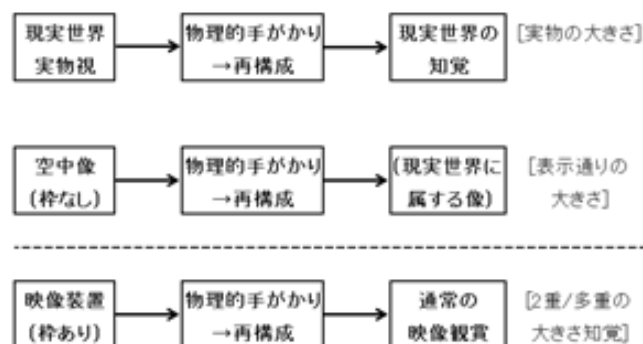


図 2 再現スケール 100%での 3D 映画の上演 18,19)

映像・画像を構成する要素として、明暗、色、動きは当たり前前の工学の範疇で情報取得と工学的な扱いはできるが、形・大きさと奥行きについては、かなり複雑な問題が発生する 17-20)。今回の主題に関連する内容だけ指摘する。3D 映像の表示では「パペットシアタ現象」が話題となることがある。これは、通常のディスプレイ表示やプリント観賞では人物像と見えているのが、3D 像として観賞すると小さな人形の印象になってしまう現象である。

図3 空中像の位置付け¹⁹⁾

空中ディスプレイと真正面から向き合い、またレーザー光源を用い、目前に置かれた物体をホログラムに撮影・表示をすると、気付くことがある。目の前に置かれた物体同様、物差しを当てて図った寸法通りの像が知覚されるのが空中像であり、表示物体の周囲に表示面や装置の気配を感じない像の特性なのである¹⁸⁻²⁰⁾。(図2, 図3)

この視点からはフラットディスプレイ、スクリーン上の映写像、紙の上のプリントは大きさについて「2重性」あるいは「多重性」をもって利用されているという事ができる。通常ディスプレイ上に現れる人物は、実物よりも縮小されている。「この人物は18cmの大きさだが実は身長1.8mの人物なのだ」という事を、暗黙の社会的了解で利用しており明確な言葉で記述しないため、問題が分かり難くなっていると思われる。

4. 各種の空中ディスプレイ

空中ディスプレイの技術は広い範囲にわたり、技術内容を詳細に解説すると分厚い本になってしまう。また毎日のようにニュースが伝えられるが、基本的な部分についての解説が不足していると感じられる。以下では、基本原理が分かる様に図を多用し、細かい記述は引用先より得られるので記述は最小限としている。

4-1 空中スクリーン、浮上物体による空中ディスプレイ

空中ディスプレイに対する社会的な欲求は大変古いと考えられる。図4は、18世紀の末にフランスから流行始まったとされるファンタスマゴリア（ファンタスマゴリー）公演の一場面である²¹⁾。多くの図では、半透明スクリーンに対して背後からマジック・ランタン（幻灯機）を用いて映像を映し出しているが、いくつかの図ではスクリーンに煙を用いている。フランス革命の時代、死者の姿を空中に出現させるという演出で話題を集めたとされている。日本のある年齢以上の方にとっては、1970年の大阪万国博、三菱館の展示を記憶している方も多いことと思われる。展示館の通路に液適により作り出されたスクリーンが配置され、映写機から泳ぐ魚の動画が映し出された。既設あるいは時限設置の噴水にプロジェクターを用いて映像を映写するイベントは世界で盛んになっていて、日本国内ではWATER FANTASIA社²²⁾が事業展開を行っている。

空中の水滴によるスクリーンは、フォグスクリーン、ミストスクリーンなどと呼ばれ研究と開発が行われているが、近年その性能向上が目覚ましくイベントなどで目にする機会が増えている。図5は、(株)星光技研のミストスクリーン²³⁾展示の様子である。係員にお願いし、手をスクリーンの像に重ねていただいた。

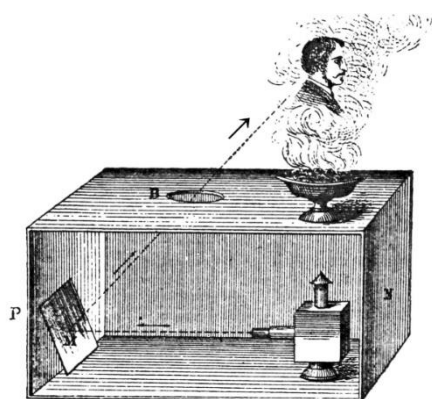


図 4 煙のスクリーンへの映写



図 5 ミストスクリーン(写真撮影著者)

物質を空中に浮かべ空中ディスプレイとして利用する動きは多方面に広がっている。超音波を用いて多数の粒子を三次元空間に任意に配列する技術が開発され²⁴⁾、更にプロジェクターを用いてそれぞれの粒子に任意の色を着ける研究も進んでいる。さらに空中浮遊技術に LED 光源へのワイヤレス給電技術を組み合わせた空中映像の研究も進んでいる。

フェムト秒レーザーを空気中に集光すると窒素分子がプラズマ化し白色光を発し、発光点を作り出される。この装置を大幅にコンパクト化し指先に妖精の姿を作り出す研究も成功している²⁵⁾。これらの技術に関しては、使用できる技術が急速に発展中であるので、多方面への発展が期待される。

4-2 ハーフミラー合成

三次元物体あるいは 2D ディスプレイ上の像をハーフミラーに映し出し実物と重ねると、魅力的な仕掛けとなる。舞台上で役者と半透明な幽霊の像が重なる演出は“ペッパーズ・ゴースト”という名前で 1870 年代にヨーロッパやアメリカで大流行した。ハーフミラー合成はテーマパークでは連続と使用されているが、社会的には 1983 年²⁶⁾から 1986 年ごろに博物館や博覧会で盛んに用いられ、2010 年以降もスマートフォンの画面との組合せで盛んになっている²⁷⁾。また空中像に指先を重ね、非接触操作を行うアート作品が、1997 年に発表されている²⁸⁾。メディア・アーティストの岩井俊雄氏の作品のスケッチを図 6 に示す。

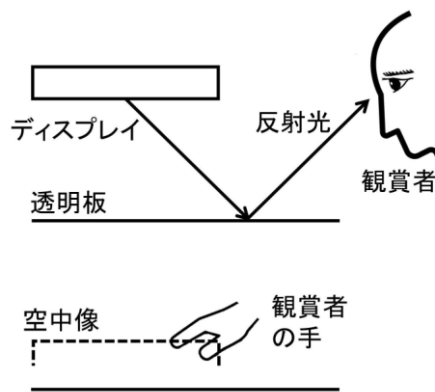


図 6 メディア・アートの作品

4-3 結像レンズ, 凹面鏡による空中像

三次元の物体を凸レンズや凹面鏡などの前側焦点位置より遠方に配置すると、結像位置には 3D 映像(実像, 空中像)が作り出される。結像の原理から縦倍率は横倍率の 2 乗であるため、カメラでの撮影など縮小撮影時には、空中に作り出される像は薄くなっている。物体の縦横と奥行きをバランス良く再現するには、結像倍率は等倍、マイナス 1 倍の倒立像あるいは 1 倍の正立像近辺に限られる。多くの空中像表示では、元の画像は 2D ディスプレイで結像倍率には自由度があるが、「視域」つまり表示画面全体が見える頭(両眼)の移動範囲を確保するため、光学系は十分な寸法であることが必要となる。また利用者に空中像に対する操作を行わせるには、特別な配慮が必要となる。

図 7 は、空中に浮かんだアイコン(木の葉など)を指で押さえると音が出る「空間映像楽器」(商品名)である。空中像は、上下に配列された木の板の間に出現するが、これは利用者へのガイドとして



図 7 「空間映像楽器」(写真提供: 石川光学造形研究所)

大変適切な配慮となっている。この装置では結像レンズとして大口径のフレネルレンズを使用, 10 cm を超える距離手前に飛び出した位置に空中像が出現する。上下の板は, 使用者に対して空中像が出現する位置 (上下左右と奥行き) をすぐに分からせる大切なガイドとなっている。同時に, 楽器として動作させる際の指の検出の仕掛けにも役立っている。上下の板の裏に, LED 光源と対向して光検出器を配置することで, 鍵盤を表示した際にも個々のキーが押されたことを確実に検出できる。この技術は, 石川光学造形研究所の特許公開²⁹⁾に記載されている。

凹面鏡により作り出される空中像に対し操作を行う装置を図 8 と図 9 に示す。なおこれは一例であり, 検索を開始して早々に出会った興味深い図を選び出したものである。図 8 は, 大型の CRT 上の像を半球形の凹面鏡で結像, 空中像としている。単一の凹面鏡で空中像に像が作り出されることは, オリンピックの聖火の採火の様子を見ても分かる様に古くから知られていたと思われるが, 空中にフルカラーの動画を表示する作業は, 1630 年ごろ, デカルトが友人メルセンスに宛てた手紙に見出されている³⁰⁾。球の中心からの光は球面で反射されて中心に戻り, 無収差の結像となる。一方物体が球の中心から離れると, 収差により像は歪みフワフワと宙に浮かぶ印象となる。エンタテインメントの目的の装置ではこの収差を逆に利点として活用している。図 8 では, 観賞者が空中に浮かぶ魚, 小鳥などを掴もうとして手を振り回すのを検出して CG (コンピュータグラフィックス) により反応する位置に像を描画する³¹⁾。

また図 9 では, 2 枚の凹面鏡を向き合わせた等倍結像光学系を用いている³²⁾。底面には, 複数の LED 光源と光検出器が配置されている。光源は時分割で点灯され, 使用者はその一つの実像に指を重ねる。指先で散乱された光は結像光学系の「逆進の法則」に従い光源近傍に戻って光検出器に入射, 空中に配置されたスイッチを押す操作が完了する。

特許第3311820号(1993年6月1日出願)

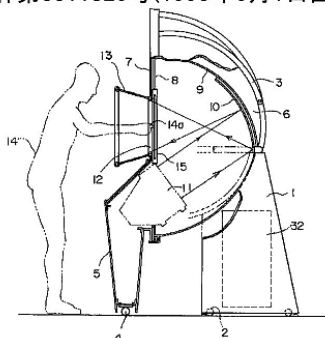


図 8 凹面鏡による空中ディスプレイ

特許第3258562号

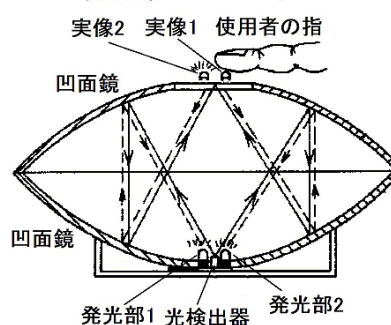


図 9 空中スイッチの光学配置

4-4 正立等倍結像系

正立等倍の結像は、結像光学系の中に倒立実像を作り再結像することにより実現される。光学機器としては、等倍専用の複写機、原稿の幅と同じ長さの読み取り部（コンタクトセンサーとも呼ばれる）で用いられてきているが、2次元に高密度に配列することで、平面のディスプレイがそのまま空中に飛び出した効果を得ることができる。図 10 は、屈折率分布レンズを用いた正立等倍結像光学系の原理図、図 11 は空中像の撮影結果である。本稿の執筆時点では、この方式と思われる「空中ディスプレイ」と、遠隔操作が多数発表されているが、パイオニア(株)からの「フローティングビジョン」(商品名)³³⁾ 以外は装置詳細が不明である。

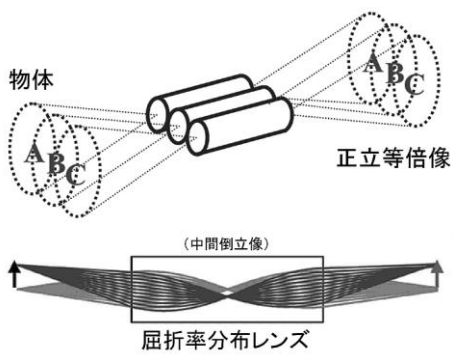


図 10 正立等倍結像系



図 11 空中像(写真撮影著者)

4-5 2面 コーナーリフレクタアレイ (Dihedral corner reflector array)

平面上に 2 枚の平面鏡を 90 度の角度で立て、光線が 2 回反射する角度と位置に入射すると、平面に射影した場合光線の進行方向ベクトルは符号が逆転し元の方向に進む。一方上下方向のベクトルは変化しない。この光学系(2面コーナーリフレクタ)を、目視ではやや困難な微細構造(たとえば 0.3 mm ピッチ)で多数配列することで、新規な光学機能部品が実現する。基本的な光学原理を図 12 と図 13 で説明する。

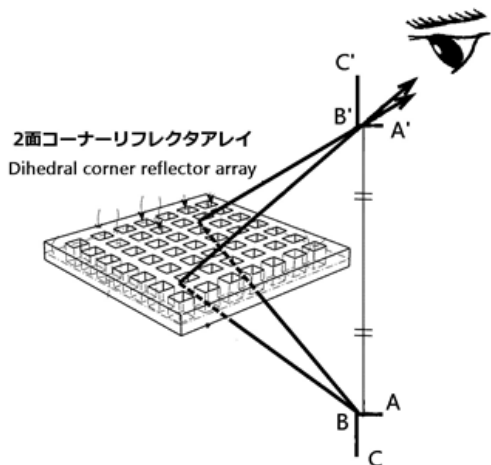


図 12 2面コーナーリフレクタアレイ

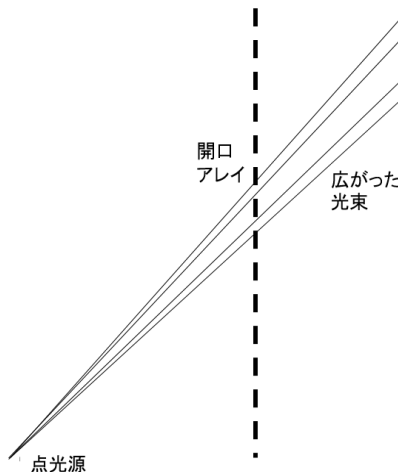


図 13 2面コーナーリフレクタアレイの光束

いま、ABC で表される物体からの光束がコーナーリフレクタに入射するとする。B からの光束は、2 回反射後にはアレイ配列面に投射すると同一の座標位置を進行し、B' に至る。一方平面に垂直の方向で考えると、入射前と同じ方向成分なので、B と平面の間隔が同じ位置に集光することとなる。A 点

と A' 点, C 点と C' 点を考えると, 空中像は凹凸が反転していることが分かる。ここで幾何光学的に個々の光線の挙動を考えると図 13 となる。正方形の柱の入り口側の正方形と出口側の正方形の共通部分しか有効な光束とはならない, また光束は広がり多少のボケを生じる。2 面コーナリフレクタアレイを使用する際には, 入射/射出光の方向が 45 度近傍 (±20 度程度と表記されている) に開口率の関係で限定されること, ボケを伴うこと, 開口率の関係で光の利用効率が低いことに留意する必要がある。

一方 2 面コーナリフレクタアレイには, 空中ディスプレイとして他には見られない利点がある。物体の位置をどこに置いてもし様な結像 (厳密には集光であるが) 特性を持ち, 歪が生じないことで, これは空中でのスイッチ操作には適している。また 2 面の配置角度と平面度に高精度が要求されるため, 部品の低コスト化が実用上の大きな課題となっている。

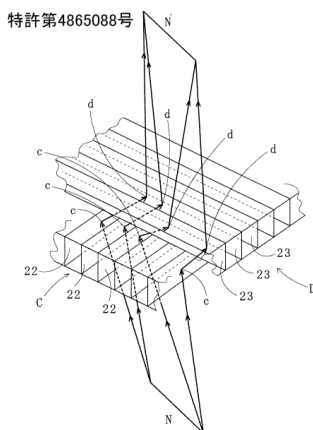


図 14 2 枚の短冊形のミラーアレイ

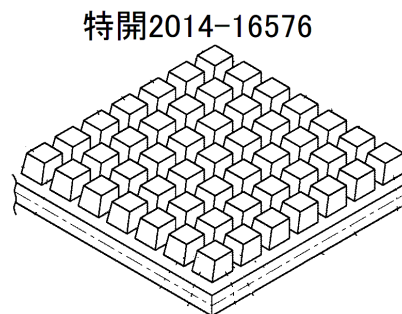


図 15 プリズム柱アレイ

特許文献から時系列に研究・発明の経緯を辿ると以下になる。2006 年 12 月 21 日, 前川聡 (NICT 独立行政法人 情報通信研究機構) による発明³⁴⁾が特許出願され, これを引例に, (株)アスカネットから別な構造の 2 面コーナリフレクタアレイの発明³⁵⁾が出願される。また金属板に開けられた正方形断面の穴 (反射面) 替え, 透明なプリズム柱で同様な光学機能を成り立たせる開発が日東電工(株)により手掛けられ, 反射面として使用しない 2 面にテーパ角を付け, 加工時の抜き勾配として製造を容易とする発明が行われている³⁶⁾。図 14 と図 15 を見るとこれらの技術はすぐ理解いただけることと思う。(株)パリティ・イノベーションは NICT からのベンチャー企業として設立され, 技術開発・製品開発を行っている。図 16 はデモ機の上に表示された空中像である。

なお短冊形のミラーアレイでは, 可視光以外に熱の像も空中に作り出すことが可能であり, 新規な空中ディスプレイ³⁷⁾として研究が進められている。



図 16 パリティミラーのデモ機 (写真撮影著者)

4-6 再帰反射スクリーン

再帰反射光学部品は, 入射する光線を元の方向に反射する。凸レンズの焦点面に反射面を設けたキャッツアイ (Cat's eye) 光学系や直交して 3 枚の平面鏡を配置したコーナーキューブ (Corner reflector) が古くから知られている。これらの光学部品を平面上に目につかないほどの細かさで並べた再帰反射光学スクリーンは交通標識に広く用いられているが, 1960 年代より 3D 映像表示としても注目されて

いる。近年生産技術の進歩から、広幅のロールとして高性能のスクリーンが入手できることとなり、空中像表示への応用が盛んに検討されている。

キャッツアイおよびコーナーキューブを用いるスクリーンの図 (図 17, 図 18) を、1972 年に刊行された著書「三次元工学」⁶⁾よりトレースして転載する。また再帰反射スクリーンによる三次元映像の空中表示の原理⁶⁾を図 19 に示す。この方式の一つの課題は、ハーフミラーを表示光束が反射/透過することによる光量損失である。これを直線偏光と $\lambda/4$ (4分の1波長) 板を用いることで解決した例⁹⁾を図 20 に示す。再帰反射スクリーンの機能はその面形状によらないことから、スクリーンを円筒状に丸めている機器も多い。なお、再帰反射スクリーンの製造元として、日本カーバイド工業(株)の「空中ディスプレイ用リフレクター」のページ³⁸⁾に分かりやすい説明がある。

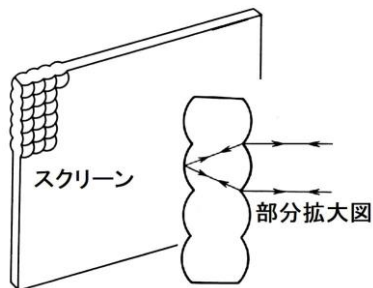


図 17 キャッツアイを並べたスクリーン

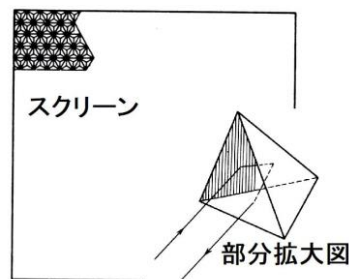


図 18 コーナーキューブを並べたスクリーン

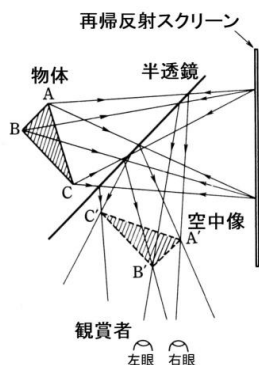


図 19 空中像ディスプレイの原理

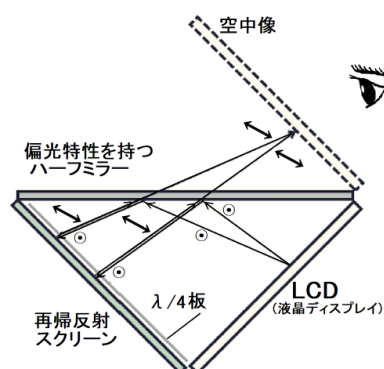


図 20 偏光を用いる空中ディスプレイ⁹⁾

4-7 ライトフィールド, インテグラルイメージング, レンチキュラーレンズ板

マイクロレンズアレイあるいはレンチキュラーレンズ板を用いる 3D ディスプレイは、1908 年のインテグラルフォトグラフィに始まる長い歴史を持っている⁶⁾。光学系の外見だけからは、最新技術とあまり変わりが無い様に見えるが、重要な部分で異なっている。図 21 は、4 本の撮影レンズを持ったニムスロー 3D カメラで撮影したネガからのプリントを観賞している様子³⁹⁾である。カラー印画紙の感光層を塗布したレンチキュラーレンズ板に 4 回の焼き付けを行い、現像処理を行う。レンチキュラーレンズの結像性能が十分高いと、引き伸ばし時の映写レンズの瞳が空中に作り出される。観賞者の左右の目を空中に作り出された瞳に重ねると、ステレオ写真の観賞状態となり立体的な像を見ることが出来る。実際には飛び飛びの位置からしか像が見えないと不都合なので、多数回の焼き付けを行うなどの手段で観賞できる範囲は広げられる。

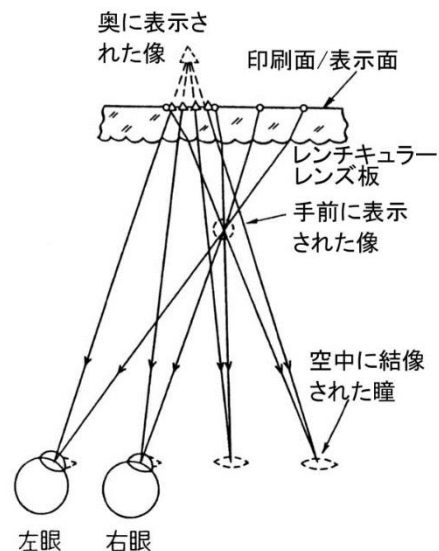


図 21 3D プリントの観賞³⁹⁾

現在のライトフィールド技術あるいはインテグラルイメージング技術¹⁰⁾では、マイクロレンズアレイやレンチキュラーレンズの背後に置かれた 2D ディスプレイ上の各点に自由なデータを表示することができる。とくに 1 つまたは 2 つの視点からの像から、任意の観察位置での像を作り出すことができるようになった効果は大きい。また、レンチキュラーレンズのピッチが細かくなるとともに、レンズ表面の反射を見えなくする装置構造とすることで、自然な空中ディスプレイが達成されている。Looking Glass Factory の製品を見ることができたので光学系の推測図(図 22)と表示像の写真(図 23)を掲載する⁴⁰⁾。分解した方のレポートと少し異なる点もあるがご容赦いただきたい。

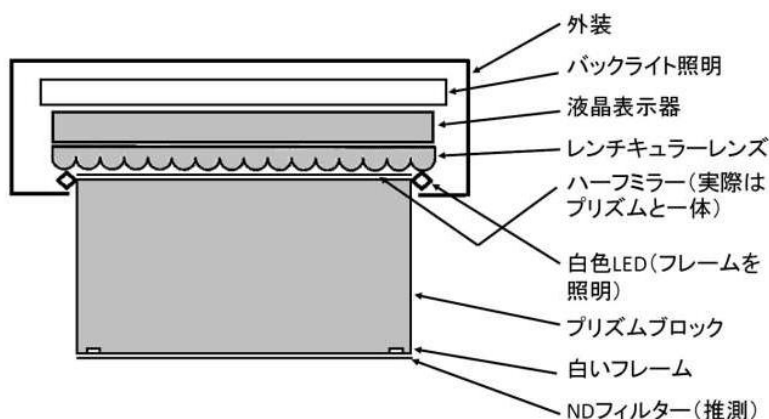


図 22 光学系の構成(著者による推測図)



図 23 表示像(写真撮影著者)

5. 3D ポインティング (3D タッチ) 技術

非接触の操作、入力を空中像に対して行う際、円滑な操作を実現する上で課題となるのが使用者の手と作業対象を一致させることである。表 1 に各種の操作・検出手段を示したが、これらはどれも空中に生じる像との位置合わせにキャリブレーションが必須である。装置を使用している現場では振動などの外乱がある場合が多く、使用者が見ている空中の操作部との位置ずれが生じないことが望ましい。この欲求に応える研究成果が発表されている。専門的な内容なので、論文から著者が理解できた部分を紹介し、詳細は原著^{41,42)}を参照いただきたい。

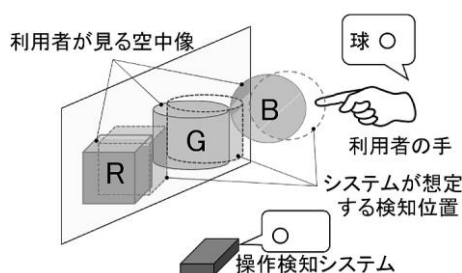


図 24 表示像と装置が捉える位置のずれ

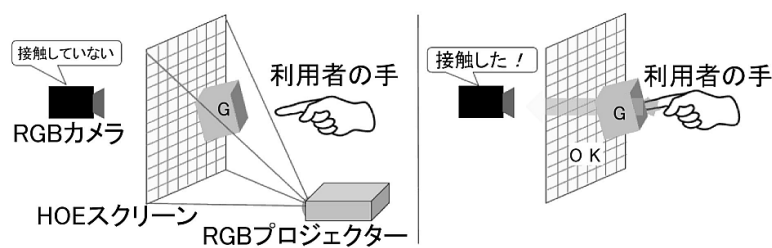


図 25 3D ポインティングの仕組み

図 24 は、利用者が見ている空中像と操作検知システムが想定している操作対象 (3D アイコン) の位置がずれている状態を模式的に表している。利用者はアイコンをスイッチとして触れ、また左右などに動かそうとする。このときシステムが想定している操作部 (図では破線で表示) とずれがあると、スイッチ入力が行われず、またアイコンを左右に動かそうとしても反応しないことになる。この研究では、隣接するアイコンの色を変え、カラーカメラで利用者の手を捉えている。図 25 では、カラーカメラで利用者の手を捉えている。利用者が緑色のアイコンに触れると、空間中のその位置には緑色の光束が集中しているのでカメラには緑色の物体を検出する。表示装置の関係で空中のアイコンの位

置が移動しても、使用者の手が空中像に触れときに検出が行われるので自動的にキャリブレーション、アライメント補正が行われることとなる。元の論文にはホログラフィーによるライトフィールドを扱う内容が記述されているが今回の説明はここまでとする。

6. まとめ

「非接触社会を実現する空中ディスプレイ技術」をテーマに、これまで行われている解説では不足と感じているディスプレイの光学技術に力を入れ解説を試みた。私は、空中ディスプレイに興味を持って 50 年になるが、今回開発の経緯や技術の細部に理解が進んだのは収穫であった。お役に立てば幸いである。

元来この分野は情報が大変多いと感じていたが、執筆の途中にも次々に新しい情報が入り現在も進行中である。現代は「検索の使いこなし」が個々人の仕事の能力を大きく左右する時代といえる。情報取得の導入として、最小限の引用文献は掲載したがこれをヒントに、必要とする情報を入手し、活用いただきたい。

参考文献

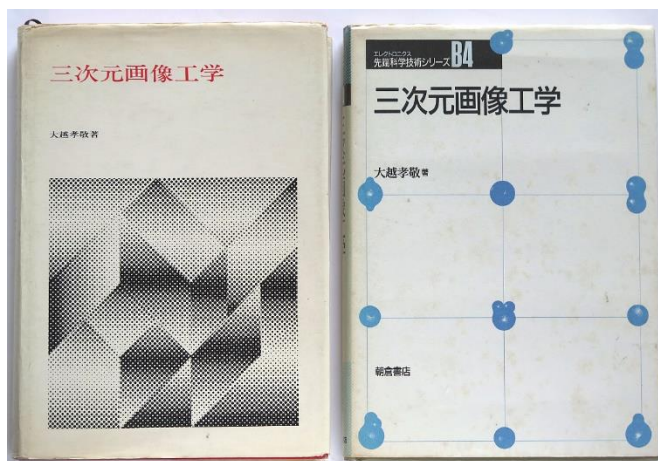
- 1) 桑山哲郎, 非接触社会を実現する空中ディスプレイ技術, 光技術コンタクト, Vol.59, No.1, pp. 4 (2021 年 1 月)
- 2) 桑山哲郎, 非接触社会を実現する空中ディスプレイ技術, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.45, No.9, 3DIT2021-7 pp. 25 (Mar. 2021)
- 3) 特集 新常态で社会実装が加速する非接触・タッチレス空中インターフェース, オプトロニクス, Vol.40, No.1, 通巻 468 号 (2021 年 1 月)
- 4) 特集 B: 空中ディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 75, No. 2 (2021 年 3 月)
- 5) 鏡 惟史, 連載ホビーハウス 空中ディスプレイと透明スクリーン, O plus E, Vol.42, No.6, pp. 826 (2020 年 11・12 月)
- 6) 大越孝敬:「三次元画像工学」(旧版), 産業図書 (1972)
- 7) 大越孝敬:「三次元画像工学」(新版 先端科学技術シリーズ B4), 朝倉書店 (1991)
- 8) 特集 枠(フレーム)にとらわれないディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 4 (2018)
- 9) 山本裕紹, 再帰反射による空中結像 (AIRR) による空中ディスプレイ, 日本画像学会誌, Vol. 56, No. 4, pp.341 (2017) [リンク](#)
- 10) 宮崎大介, 三次元像の空中表示技術の現状と展開, 光学, Vol. 40, No. 12, pp. 608 (2011) [pdf](#)
- 11) 特集 立体映像, 日本写真会誌, Vol. 72, No. 4 (2009) [リンク](#)
- 12) 石川洵, 博物館における立体映像の利用—空間映像を考える, 日本写真学会誌, Vol. 72, No. 4, pp. 266 (2009) [リンク](#)
- 13) 前田有希:「再帰性反射による結像作用を用いた空中像表示装置の試作と空中三次元像形成への応用」, 博士論文, 大阪市立大学大学院工学研究科 (2015 年 3 月) [pdf](#)
- 14) 久次米亮介:「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」, 博士論文, 徳島大学工学部 (2017 年 3 月 23 日) [リンク](#)
- 15) 巻口誉宗:「高臨場映像表示技術の実用化に向けた多層空中像表示と多視点裸眼 3D 映像表示に関する研究」, 博士論文, 北海道大学情報科学研究科情報理工学専攻 (2020 年 1 月 20 日) [リンク](#)
- 16) “LEAP MOTION Controller”, Ultraleap 社サイトより <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>
- 17) 桑山哲郎:「映像技術の成り立ち」, 博士論文, 神戸芸術工科大学 (2003 年 3 月)
- 18) 梁井潤, 3D 映像空間の再現スケール〜被写体の大きさを変えてしまう 3D 映像, 映画テレビ技術, No.486, pp.53 (1993 年 3 月)
- 19) 桑山哲郎, ホログラフィ・インスタレーションに関する小論, DiVA, 第 5 号, pp.60 (2003)

- 20) 桑山哲郎, バーチャルリアリティと画像表示技術, 光学, Vol.23, No.7, pp.406 (1994)
- 21) 桑山哲郎, マルチプレックスホログラムの起源, 光学, Vol. 12, No. 2, pp. 109 (1983) [pdf](#)
- 22) WATER FANTASIA 社 <https://www.waterfantasia.co.jp/>
- 23) “ミストスクリーン” (商品名) 星光技研(株) <https://www.seiko-giken.jp/solution/screen>
- 24) 星貴之, 落合陽一, 暦本純一, 3J1-1 四台の超音波フェーズドアレイを用いた平面状粒子浮揚 (強力超音波・ソノケミストリー), 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 35, pp. 375 (2014)
- 25) 早崎芳夫, 熊谷幸汰, 長谷川智士, 落合陽一, 星貴之, エアリアルプラズマディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 4, pp. 500 (2018)
- 26) 鏡惟史, 連載ホビーハウス おぼけやしきの光学, O plus E, No.47, pp. 123 (1983 年 10 月)
- 27) 桑山哲郎, ペッパーズ・ゴーストによる 3D 映像: 最新動向と歴史, 3D 映像, Vol. 30, No. 1, pp. 4 (2016 年 3 月)
- 28) 岩井俊雄, NTT ICC アーカイブ, 《メディア・テクノロジー ~7つの記憶》 [1997] <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/seven-memories-of-media-technology/>
- 29) 石川洵 ((有)石川光学造形研究所), 空間に表示した実像を入力指標とした電子楽器, 公開特許公報 特開 2007-156370, 2005 年 11 月 30 日出願, 2007 年 6 月 21 日公開
- 30) 村上勝三, デカルトと光をめぐって[科学の光・光の科学], 広瀬秀男: 編, 「遊びの百科全書—③ 「レンズ・マジック」, pp. 61, 日本ブリタニカ (1979)
- 31) 安部公博 (株フジタ), 表示装置, 特許第 3311820 号, 1993 年 6 月 1 日出願, 2002 年 5 月 24 日登録
- 32) 岩佐誠一 (富士通株), 空中像入出力装置及び方法, 特許第 3258562 号, 1996 年 5 月 21 日出願, 2001 年 12 月 7 日登録
- 33) 石川大, マイクロレンズアレイを用いた浮遊映像とインターフェース応用, 光学, Vol. 40, No. 12, pp. 638 (2011) [pdf](#)
- 34) 前川聡 (NICT), 光学システム, 特許第 4734652 号, 2006 年 12 月 21 日出願, 2008 年 7 月 10 日公開, 2011 年 5 月 16 日登録
- 35) 藤島智彦, 大坪誠 (株アスカネット), 光学結像方式, 特許第 4865088 号, 2009 年 4 月 21 日出願, 2011 年 11 月 18 日登録
- 36) 長藤昭子, 十二紀行, 森田成紀 (日東電工株), マイクロミラーアレイおよびその製法, 特許公開広報 特開 2014-16576, 2012 年 7 月 11 日出願, 2014 年 1 月 30 日公開
- 37) 山本裕紹, 空中マルチモーダルディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 4, pp. 488 (2018)
- 38) 日本カーバイド工業(株)「空中ディスプレイ用リフレクター」のページ https://www.carbide.co.jp/product/airial_display/
- 39) 鏡惟史, ステレオ写真を考える, カメラレビュー No.27 特集 ステレオワールド, pp. 6, 朝日ソノラマ (1993 年 12 月)
- 40) 桑山哲郎, 3D フォーラム 2018 年「たしてん」見学会報告, 3D 映像, Vol. 32, No. 2, pp.65 (2018 年 11 月) [pdf](#)
- 41) Iván A. Sánchez Salazar Chavarría, Tomoya Nakamura, and Masahiro Yamaguchi, Interactive optical 3D-touch user interface using a holographic light-field display and color information, Opt. Express 28, 36740-36755 (2020) <https://doi.org/10.1364/OE.409126>
- 42) Masahiro Yamaguchi, Full-Parallax Holographic Light-Field 3-D Displays and Interactive 3-D Touch, in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 5, pp. 947, (May 2017), doi: 10.1109/JPROC.2017.2648118. [リンク](#)

■付記事項・参考情報

話の展開の関係で、解説本文とは別にする。
 ・大越孝敬：「三次元画像工学」について

初版は産業図書から 1972 年に刊行され、大幅に内容を改訂した新版が 1991 年、朝倉書店より刊行されている。2 冊を並べた写真を掲載する。この間にほぼ 20 年経過しているが、記載内容として意外(?)にも少しの修正で利用できる部分が多いことに驚かされる。一方、パリのフォーカルミラーによる奥行き方向走査表示など、旧版で親しんできた内容が削除されている部分もあることに注意が必要である。



「三次元画像工学」旧版(1972 年)と新版(1991 年)の表紙



1. 「映像情報メディア学会誌」Vol. 75, No. 2 (2021 年 3 月 1 日) 特集 B : 空中ディスプレイ <https://www.ite.or.jp/content/journal/>

1. 総合報告：空中ディスプレイの概念と社会実装の動向 山本裕紹 pp.181.

2. デバイス・原理・基礎

2-1 空中ディスプレイの視覚・認知 水科晴樹, 陶山史朗 pp. 188.

2-2 2面コーナリフレクタアレイによる空中ディスプレイ 前田有希 pp. 194.

2-3 反射型の再帰性ミラーアレイによる空中ディスプレイ 大西康司 pp. 198.

3. アプリケーション (応用・関連)

3-1 空中像インタラクション 小泉直也 pp. 202.

3-2 通り抜けられる空中デジタルサイネージ 菊田勇人 pp. 206.

3-3 空中ディスプレイとハプティクス 藤原正浩 pp. 209.

・なお[話題]も参考情報として有益です

HMD 研究の最新動向～視覚の解放を目指して～ 清川清 pp. 213.

2. 月刊「オプトロニクス」2021 年 1 月号 特集「新常態で社会実装が加速する 非接触・タッチレス空中インターフェース総論：ニュー

ノーマル時代のタッチレス空中インターフェース 山本裕紹 pp. 44.

・空中ボタン操作によるタッチレスソリューション(空中入力装置の開発) 飯田誠 pp. 47. ・非接触インターフェースを実現する静電容量センサ 藤由達巳, 重高寛 pp. 52. ・エッジ AI を利用した指先認識による非接触ユーザインターフェース 小島竜一 pp. 57. ・レンズ

アレイによる空中映像と各種インターフェースへの応用 石川大 63. ・非接触タッチパネルソリューション “触れずに触れられるエアータッチパネル” 川野健作 pp. 68.

<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php?year=2021&month=1>

また、「光学」2021 年 7 月号は特集「空間像再生のためのオプティクス」であるが、執筆時点では未入手である。

【以上】