

3-6 fVisiOn: 全周囲より観察可能なテーブル型裸眼立体ディスプレイ

3-6 *fVisiOn: Glasses-Free Tabletop 3D Display Observed from Surrounding Viewpoints of 360°*

吉田俊介 矢野澄男 安藤広志

YOSHIDA Shunsuke, YANO Sumio, and ANDO Hiroshi

要旨

テーブルトップ作業に適した、周囲 360° から観察可能な新しい裸眼立体ディスプレイについて述べる。バーチャルな立体物を何もないテーブル面上にて自然に共有している感覚を提供するためには、次に記すような幾つかの条件を満たす必要があると考える。(1) テーブルトップでの作業の邪魔になったり、作業領域を占有しないこと。(2) テーブルの周囲あらゆる方向から適切な立体画像が観察可能であること。(3) 自然なコミュニケーションのために特殊なメガネを必要としないこと。本研究では、これらの条件を全て満たす立体ディスプレイ「fVisiOn」を提案し、実装する。本手法では、円状に並べられた複数のプロジェクタと、指向性の光学性能を持つ柱体あるいは錐体状の光学素子を用いる。これらはテーブルの内部に隠蔽されるため、テーブル上の作業は阻害されない。本手法はテーブルの周囲上方に円環状の視域を構成するものであり、その領域では各々の視点に応じた適切な像が観察でき、まるでテーブル中央にある置物のように立体映像が知覚される。

This paper describes a novel glasses-free 3D display of 360° optimized for tabletop tasks. For sharing 3D virtual objects on a flat tabletop surface naturally, we assume that the following conditions should be satisfied: (1) the tasks should not be disturbed and the working spaces should not be occupied, (2) the 3D images should be observed from arbitrary directions around the table, and (3) special 3D glasses should not be required for natural communication around the table. In this paper, we propose and implement the 3D display “fVisiOn” which fulfils the above whole conditions. The display employs circularly arranged projectors and a cylindrical- or a conical-shaped optical device that has a directional optical characteristic. Those devices are installed underneath the table not to obstruct the working space. One of the novelties of the proposed method is forming a ring-shaped viewing area above the table. When users look in this area, they can observe individual 3D images from each direction with correct perspective on the table such as a centerpiece.

【キーワード】

裸眼立体ディスプレイ, 立体映像, 光線像再生, テーブルトップ, 協調作業

Glasses-free 3D display, 3D images, Light field reproduction, Tabletop, Collaborative tasks

1 はじめに

本研究は、図1に例示されるような、書類や製品モックアップをテーブルに置きつつ進める会議のように、複数人が同時にテーブルを囲み共同作業をする場面を想定した、裸眼で観察可能な立体映像の提示技術に関するものである。

我々の提案する技術により試作されたシステム「fVisiOn(エフ・ビジョン)」は、何もない平らなテーブル面上 (flat tabletop surface) に、高さのある立体映像を浮かび上がらせて再生 (floating 3D standing image) でき、着座時のような周囲 360° から (from omnidirection of 360°) 見下ろすように観察する場面に特化したものである。複数人が特

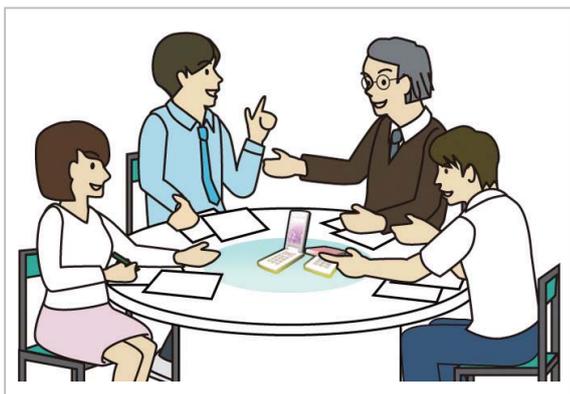


図1 テーブル型立体ディスプレイの利用想定図



図2 テーブル型 3D ディスプレイ「fVisiOn」

殊なメガネを使わずに自然に利用可能なインターフェース (friendly-interface for multiple users) となることを目指しており、テーブルを介したコミュニケーションを促進させるためのツールである。試作したシステムでの立体映像の再生結果を図2に示す。

提案方式[1]-[4]では、指向性のある光学性能を備えた柱体、あるいは錐体状の光学素子と複数台のプロジェクタを用いて立体映像を再生する。これらの装置はすべてテーブル面より下方に配置されており、テーブル上の空間を使った自由な作業を物理的に阻害しないことを特徴とする。プロジェクタ群から発せられる無数の光線は、テーブルの中央にあると想定される物体が放つはずの光を再構成するように光学素子によって制御され、周囲の任意方向から観察可能な立体像を再現する。

本稿では、テーブルトップ作業の特徴を考察した後、それにふさわしい立体ディスプレイの形態を議論する。次に、考察された要件を満たす新し

い形態の立体映像提示技術を提案し、必要な光学素子の機能について述べる。最後に、必要な機能を持つ光学素子を試作し、提案する像の再生手法により、実際に裸眼で立体映像が観察可能であることをシステムとして実装することにより実証する[5][6]。

2 テーブルトップ作業のための立体映像

2.1 テーブルトップ作業の特徴

何らかの作業を進めるための場所として、古くから人はテーブルや机を用いてきた。机はやや個人利用を想起させるツールなのに対し、テーブルには複数人で囲みながら利用するコミュニケーションの場としての役割もあると考えられる。テーブル上の領域(テーブルトップ)では、対象を横に置くことで一時的に作業を記憶させたり、必要な情報を周囲に配置するなど、空間の広がりや有効に活用することで円滑に作業できる。また、テーブルを囲む他者に作業対象を手渡す、対象を共有しながら議論を交わすなど、情報共有や協調作業のためのツールとしても活用できる。

そのような使い勝手の良さを持つテーブルトップを、コンピュータにより強化されるバーチャルな世界とリアルな世界の境界面として使い、人と人あるいは人とコンピュータとがインタラクションをし、情報の交換や共有をするための場と見なすのであれば、効果的な情報提示や作業者の意図を読み取り協調作業を円滑に進めるためのインターフェースとしての仕組みが重要となる。

テーブルトップをインターフェースとして考えた場合、映像メディアによる情報提示は理解のしやすさや伝えやすさから重要である。そこで、頭上のプロジェクタでテーブル上に映像情報を重畳して作業支援するなど、様々なコンピュータ支援の試みがこれまでに数多くなされてきた[7]。また、テーブルを囲んだ多人数での利用時には、それぞれの視点・観察方向に応じて見え方の変わる映像の提供も重要である[8]。特に、共有する映像メディアとして立体映像を選択するのであれば、テーブルトップが本来持つ作業性やコミュニケーションツールとしての価値を損なわない技術が望まれる。

すなわち、映像メディアをより自然な形で立体的にテーブルトップにて扱うことを考える場合、(1) 連携する作業を阻害しないようにテーブルトップの空間を占有せず、(2) テーブルの周囲、任意の方向から適切な視点の映像を観察できることが必要であり、(3) 話題に気軽に参加できるように、特殊なメガネなどが不要で参加人数を制限しない観察方式が望ましい。

2.2 関連研究との比較

本研究のコンセプトを個別に満たす立体ディスプレイは既に幾つか提案されている。以下でそれらの関連する研究について述べ、本提案手法で達成される技術との違いを明らかにする。

2.2.1 ポリウムディスプレイ

まず、裸眼で周囲からの観察を目的とした立体ディスプレイとして、回転機構を用いた方式が多く提案されている。立体映像の再現の仕方としては、奥行き標準化型^[9]、多視点画像提示型^[10]、光線野(Light field)再生型^{[11][12]}に大別される。それぞれ、ボクセル値や観察方向に応じた像や光線野を、回転機構(例えば、回転する円盤状のスクリーン)の向きに同期しながら提示する方式である。

これらは、上述の条件(2)と(3)を同時に満たすが、いずれの方式も回転機構などの比較的大がかりな機械的な装置をテーブル上に配置する必要がある。よってテーブルトップの大半の領域が侵食され、協調作業の場としての空間利用に制限が加わり条件(1)を満たさない。また、再現される立体映像はガラスケースの中に閉じ込められたかのような状態であり、映像との直接的なインタラクションもできず、手に取れそうな立体映像がテーブル上にあるという感覚を作りにくい。

2.2.2 空中像ディスプレイ

鏡などの光学系の工夫によって、いずこかにある対象の実像を空中に転送させる方式が提案されている。古くより知られる向かい合わせた凹型放物面鏡2枚による実像の転送に始まり、レンズ系を利用した方式^[13]や、テーブル面に配置された面対称結像光学素子による方式^[14]などが提案されている。また、数方向分の平面像を対応する方向から観察できるような数枚の鏡で光学的に空中へ転送して周囲から観察する方式^[15]なども提案

されている。これらの方式は空中に転送された実像が見えるために高い実在感を得られるが、転送元の対象がLCDなどの平面映像であれば空中像も同様に平面映像である。立体映像を電子的に表示するためには転送元に立体ディスプレイがさらに別途必要であり、これら単体では立体ディスプレイとして成立し難い。

他にも、空気中の1点に高エネルギーを与えて空気分子を発光させる方式^[16]が提案されているが、その立体映像に触れることは安全性の問題により現状では不可能であり、協調作業のツールとして用いることができない。煙や水蒸気に映像投影する方式^[17]も提案されているが、これらは平面映像の空中表示であって立体映像ではない。

2.2.3 テーブルトップで複数人に対応した像表示

条件(1)を満たすようなテーブル上の空間に映像投影装置を必要としない方式としては、視点追跡と立体視メガネを用いて数人で立体映像を異なる方向から同時に観察できる方式^[18]や、4方向から別々な平面映像を観察可能な方式^[8]などが提案されている。いずれもコンセプトとしては本研究に類似するものであるが、いずれも観察者が数名(4名前後)に制限され、前者については立体映像の観察に特殊なメガネを装着する必要がある、後者は平面映像である。

2.2.4 フラットパネル型3Dディスプレイ

電子ホログラフィー^[19]やインテグラルイメージング^[20]による立体映像再生の手法は、立体映像を表示する機構であるディスプレイ面が平らであるために条件(1)を満たし、裸眼で観察可能であり条件(3)を満たす。

しかしながら、一般的なこれらの方式の観察に適した領域(視域)は、ディスプレイ面に正対する方向の狭い範囲であり、テレビを視聴するかのような利用形態に適している。基本的に提供される立体感もディスプレイ面に対する奥行き方向の表現だけであり、回り込んで後ろ側から観察するような周囲360°の観察には対応できない立体映像である。

これらのフラットパネル型3Dディスプレイをテーブル上に平置きして用いるには、周囲からの観察に対応するため、視域をかなり広く設定しなければならない。しかしながら現状では電子ホロ

グラフィアの視域は数度しか無く、インテグラルイメージングによる方式でも数十度しかない。またその条件下では、本来それらが提供する観察に最適な正面の視域が活用できず、立体映像を再生する光学素子の性能の端部を使うために像の提示自体が困難である。

例えば、インテグラルイメージングを応用したテーブル型裸眼立体ディスプレイ [21] が提案されている。この方式では上方から覗き込むような観察には適するが、着座時のようなテーブルの周囲からの観察では、真上の空間からの観察は想定しないため、効果的に視域を利用することができない。一方、視域を平置き時のある特定の斜め方向からの観察に最適化したインテグラルイメージングの方式 [22] も報告されているが、周囲から多数で観察することはできず、条件 (2) をも同時に満たさず技術ではない。

2.2.5 fVisiOn にて提供される立体映像

本研究にて新しく提案する立体映像の再生手法は、テーブル面下に映像を再生する全ての機構を配置することによって、テーブルトップの作業領域を担保して条件 (1) を満たす。また、視域をテーブルの周囲の上方、円環状に定義する手法を新しく提案することで条件 (2) を満たし、テーブル中央付近に周囲 360° 任意方向から裸眼で観察可能な条件 (3) を満たす立体映像を再生する。

ここで想定する利用形態は、座った状態か立っ

た状態のような、極端な視点の上下動を伴わない観察条件であり、テーブル直上からの観察は対象としない。また、関連研究に見られた個々の制約を解消し、観察者側に装備が不用であり、裸眼で多数でも周囲から立体映像が観察でき、テーブルトップでのインタラクティブな作業を阻害しないことを特徴とする。

3 テーブルトップ作業のための光線像再生

3.1 光線状態の再現による像再生

本提案手法では、現実世界の物体に当たった光を眼でとらえる状態を、光学的に模擬することによって立体映像を再現することを基本的な原理とする。ここでは、単純なモデルとして不透明な実世界の物体を考え、立体映像の再生原理を述べる。

光源から発せられた光は物体表面にて散乱反射し、その光を両眼で見ることでヒトは物体を知覚する。ここで点光源から発する光を、あらゆる方向へ飛行する無数の光の線 (光線) の集合体として考える。物体表面のある 1 点を考えると、複数の光源からの光を入力とし、射出する方向に依存した光を放つバーチャルな点光源と見なすことができる (図 3 左)。すなわち、何らかの手段でその位置を通過する光線群を作り出し、通過方向に

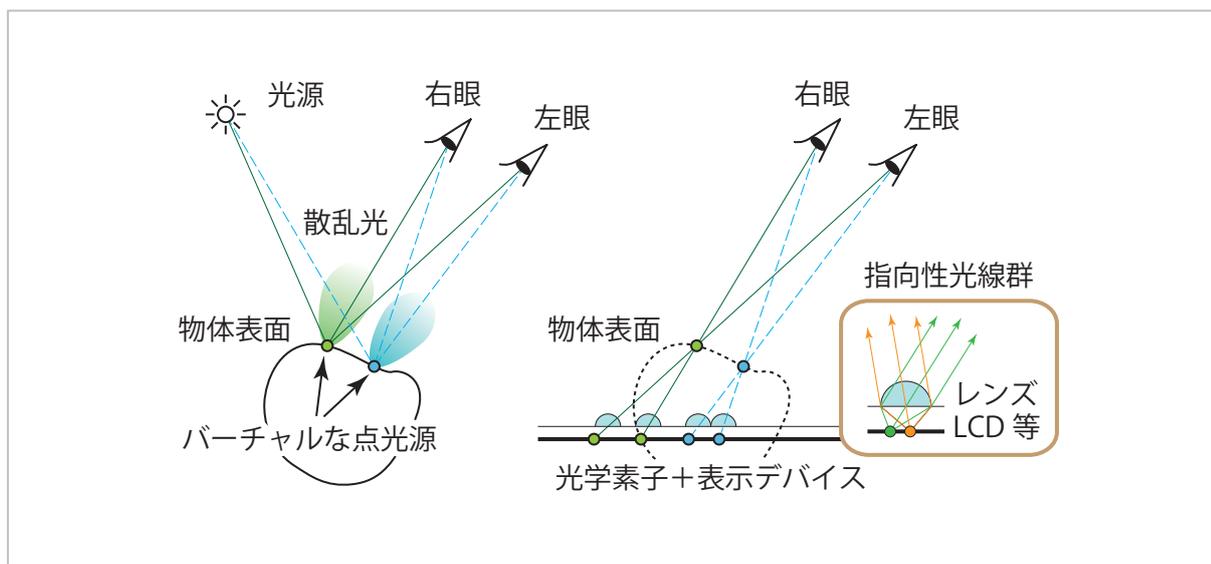


図 3 光線像再生の原理

応じた適切な色や輝度を与えることができれば、実世界の物体表面が放つはずの光の状態が再現される。

一方、凸レンズのような光学素子は、図3右の囲みに示すように、焦点距離にある光源の光を集め、光源とレンズの主点を通る直線と平行にその光を射出する機能を持つ。よって、凸レンズ下に表示デバイスを配した場合、2次元配列された各画素の光は、対応する特定の方向からのみ観察される。

すなわち、表示デバイス上の画素と光学素子の位置関係からその光の飛行方向を求め、想定する物体表面との交点を算出し、本来のあるべき点光源がその方向に発すべき色や輝度を画素に与えることにより、バーチャルな点光源がそこにあるかのように空間に再現される(図3右)。

このような特定空間内の光線群(光線野)が、正確かつ密に再現されているとすれば、それは現実世界の物体を見る状態に限りなく等しくなる。ヒトの両眼にはそれぞれ異なる方向より飛来する光線で構成される像が観察されるため、両眼像差によって物体が立体的に認識される。このような光線野を再現して立体映像を再生する方式を、ここでは光線像再生方式と呼ぶ。

3.2 テーブルトップ作業に必要な視域

本研究の想定する利用形態では、テーブルトップの立体映像は常に斜め上方から観察されることになる。すなわち、観察位置はテーブル斜め上の

円環状の領域に限定され、その領域にのみ光線群が飛来すれば十分である。また、立体知覚要因としての両眼像差は、少なくともテーブルの円周方向にて再現されればよい。

図4に示すようにテーブル面の中心に原点 O を取り、テーブル平面上にて直行する X 軸と Y 軸を考え、 O より鉛直上方を Z 軸と定義する。この時、テーブルの中心から e_d 離れ、 e_h の高さより利用者が観察するとすれば、 $E = (e_d \cos \theta, e_d \sin \theta, e_h)$ で表される円環が視域と定義される。なお、 θ は任意の観察方向を示す Z 軸周りの X 軸を基準とした角度である。

ここで、再現されるべき光線群を X - Y 面に鉛直に交わる平面(例えば X - Z 平面)にて考える。図5左に示すように、視域はテーブルを挟んだ両側上方に点として投影され、像を形成するための

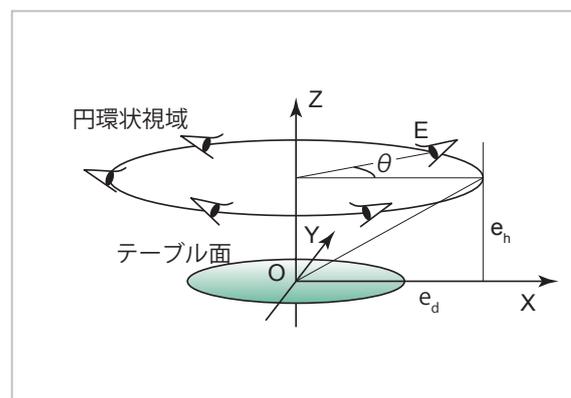


図4 提案手法により定義される視域

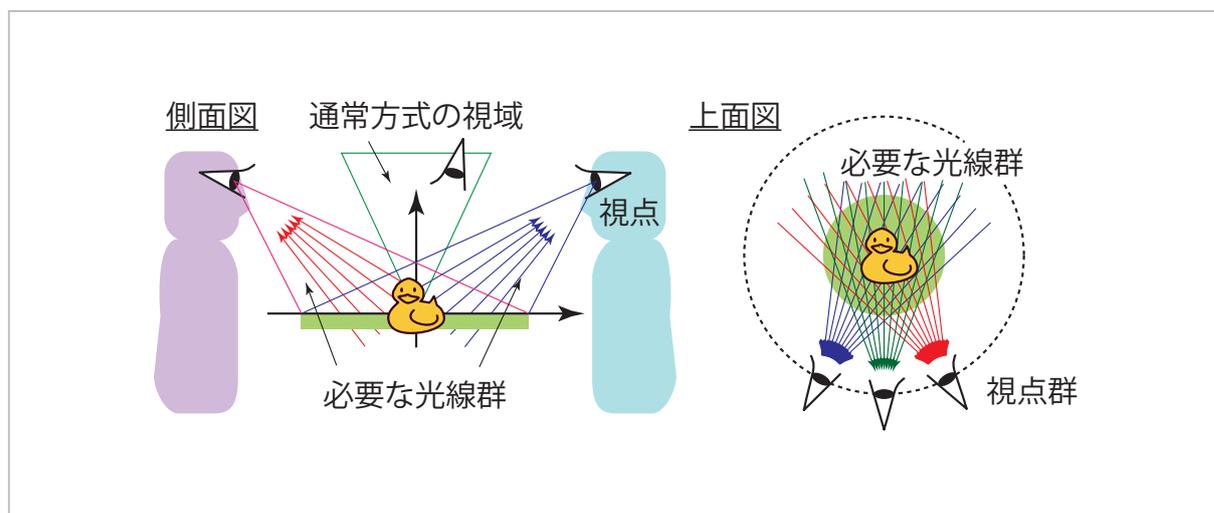


図5 テーブルの周囲からの観察に必要な光線群

光線群はその点を通すれば十分であることがわかる。なお、通常のインテグラルイメージングの方式による像再生では、Z軸方向に数十度の範囲で視域が形成され、光線群は上方の領域に集中する。想定する利用形態ではその領域は視点として利用されず、想定する視点に対応するためには極端に視域を広げる必要があり非効率的であることが、この図からもわかる。

X-Y面上にて必要な光線群は、円環上の任意の点Eへテーブル方向から放射状に集中する直線群として定義されなければならない(図5右)。この円環上に観察者の両眼がある場合、異なる網膜像が得られて立体視ができる。

3.3 指向性を有する光学素子による光線群の再現

提案する再生原理に必要な光線群を生成するための手段として、ここではテーブル面下に配置する柱体あるいは錐体形状の光学素子(スクリーン)と、複数のプロジェクタを用いた手法を提案する。

プロジェクタの光源から発せられる光は、LCDなどの空間光変調器を通過することによって異なる光の量を与えられる。これは、投影中心からある色と輝度で放射状に光線が飛散する状態と近似できる。プロジェクタは図6に示すようにテーブル面下方の円周上に複数配置し、スクリーン(図の例は円錐型)の側面に像を投影する。このスクリーンには、通過する光線を稜線方向には拡散さ

せ、円周方向には拡散せず直進させる指向性のある光学性能を付与する。これにより、次のような手順によって図5の光線状態が再現される。

図5左と同様にX-Y面に鉛直に交わる平面にて考えた場合、プロジェクタにより作られる光線群は、スクリーン通過後にある一定の角度に拡散する光として射出される。この時、各拡散光のうち視点に向かう光のみが観察される。

X-Y面にて考えた場合、スクリーンは円周方向へは光線を通過させる性能を持つため、円状に並べられたプロジェクタより投影される光線群は、スクリーンを通過後もそのまま直進することになる。結果的に、ある視点に届く光線群は、複数のプロジェクタから発せられた光線の集まりとなる(図6右)。

十分密な間隔でプロジェクタが存在し、各光線に適切な光の量が与えられているとすれば、光線像再生方式の原理に基づき立体映像が知覚されると考えられる。

4 原理検証のための試作と実験

4.1 光学素子の試作

上述の性能を有する光学素子として、円錐体の側面に糸状のレンズを貼付する方式によりスクリーンを試作した。これは以下の考えに基づく。まず、糸状のレンズの断面は円でボールレンズと同様の光学効果が得られ、入射光線群は焦点を通

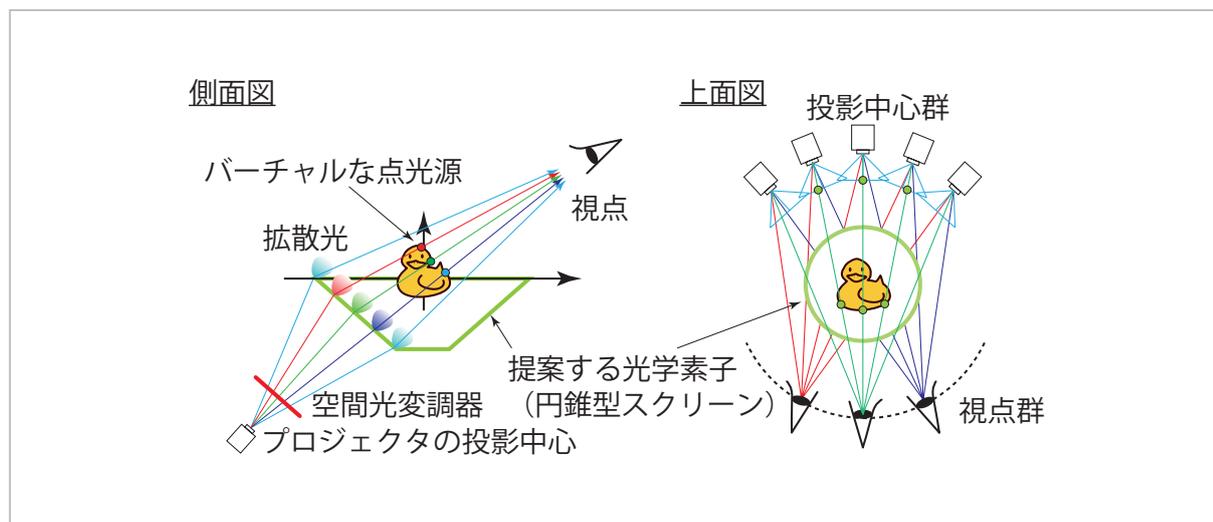


図6 提案する光線群の生成手法

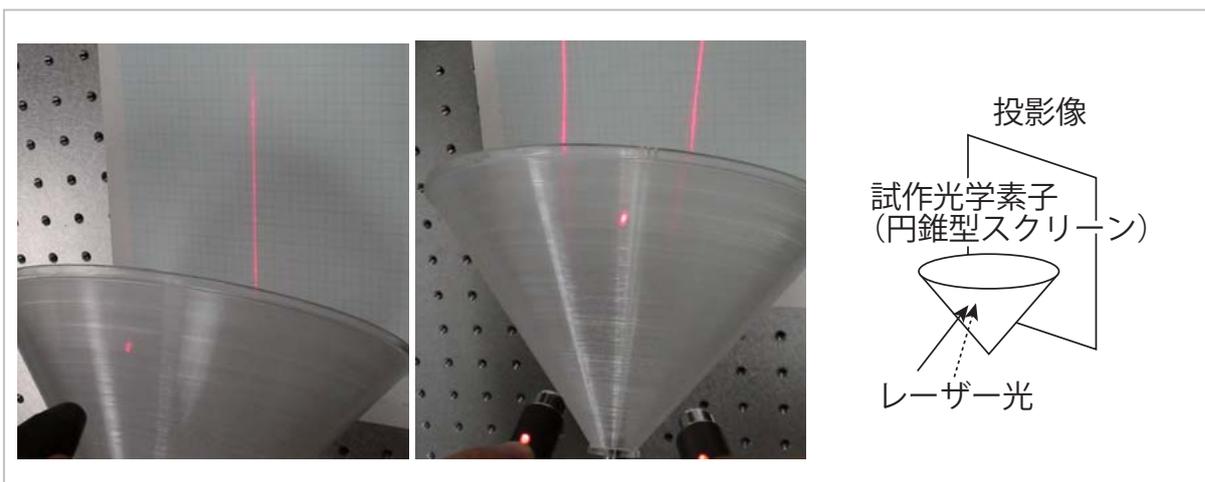


図7 試作スクリーンの光学性能(左: 拡散性、右: 直進性)

過して放射状に射出すると考えられる。また、長手方向の断面では一定厚の透明体と見なせ、入射光線は2度屈折して並進するだけであり、レンズ内の通過経路が短い場合にはほぼ直進すると見なすことができる。

本試作では、ナイロン製の釣り糸(テグス)を糸状レンズの代わりに用いた。アクリルブロックより削り出した円錐(上底 200 mm、下底 20 mm、高さ 110 mm、側面の厚み 2 mm)側面に紫外線硬化樹脂を塗布し、テグス(直径 0.4 mm)を巻き付けつつ紫外線により接着させた。

試作したスクリーンに直径 1 mm のレーザー光を入射させ、射出光をシートに投影した結果を図 7 に示す。1 本のレーザー光を入射させた結果、稜線方向に約 60°、円周方向に約 1° 拡散させる性能が確認された。また、2 本のレーザー光を異なる方向から同一の点に入射した結果では、円周方向では光が拡散されずにほぼ直進して射出される性能を確認した。

4.2 像の再生結果

試作したスクリーンと、円状に並べられた 96 台の小型 LCD プロジェクタ(解像度 VGA、輝度 8 lm)を用い、提案した光線像再生方式により立体映像を表示した結果を図 8 に示す。上段からティーポット、おもちゃのアヒル、ウサギを再生した例であり、ウサギには参照用に実物体である折り鶴を手前に置いてある。

ここでのプロジェクタの間隔は 15 mm、原点 O

からの位置は半径で 676 mm、下方に 535 mm である。

円環状視域はテーブル中央からの高さ e_h が 340 mm、距離 e_d が 500 mm である。

各プロジェクタの投影画像は、光線追跡アルゴリズムにより作成した。まず、プロジェクタの光学中心から空間光変調器の各画素へ向かう光線を求め、その延長線上のスクリーンとの交点を求めた。次に、スクリーン上の交点から水平方向には直進し、鉛直方向には円環状視域へ向かう直線を求め、その直線と想定する物体表面との最も視点に近い側の交点を求めた。そして空間光変調器の画素に与える光の量として、交点位置にあるバーチャルな点光源がその直線の方に再現すべき色や輝度を与えた。

各組 3 枚の写真は、円環状視域の 50° ずつ異なる位置からテーブル中央にカメラを向けて撮影したものである。それぞれの組より、異なる視点からの観察結果が得られていることから、水平面において視差が得られていることを確認した。

5 おわりに

本稿では、テーブルトップ作業に適した裸眼立体ディスプレイ「fVisiOn」の提案と試作について述べた。光線像再生方式にてテーブルの周囲上方に円環状の視域を定義する手法を提案し、必要な機能を持つ光学素子の作製方法を提案した。さらに、試作した光学素子を用いて立体映像を再生

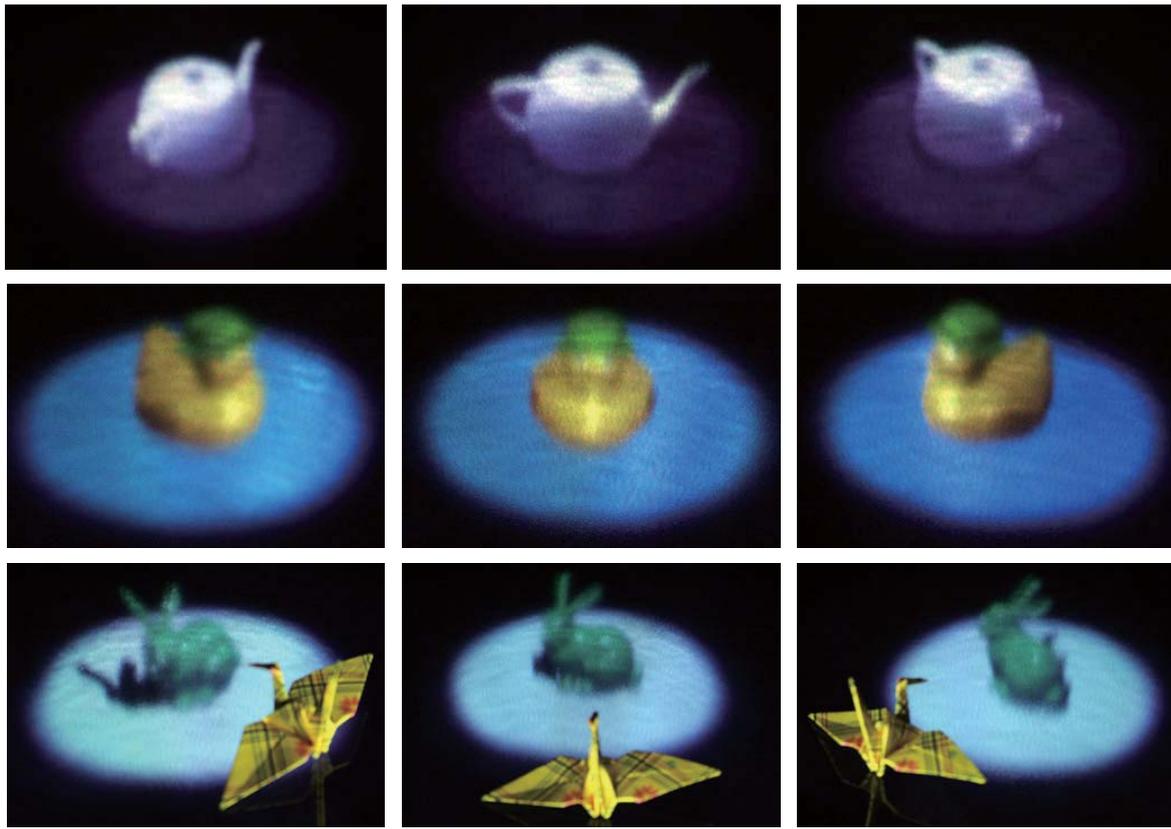


図8 再生像の異なる視点からの観察結果

し、円環状視域より立体視が可能であることを確認した。本方式は、視域がテーブルの周囲上方で円環状に配置されることを特徴とし、円周方向に視差が得られるものである。

今回の実装では、周囲 360° の 1/3 程度、120° から観察可能なシステムが構築できたが、原理的

に全周からの観察へ対応することは可能である。また、本実験環境で得られた像はまだ不鮮明であるが、これは試作した光学系の性能不足や、像を再生する光線群の飛行方向が演算上の理論値に対して誤差を含むことに起因すると考えられる。再生像の画質向上も今後の課題である。

参考文献

- 1 吉田ら：テーブルトップ作業に適した裸眼立体ディスプレイの基礎検討，日本 VR 学大会 2009，3A4-4，2009.
- 2 吉田ら：テーブルトップ作業を目的とした裸眼立体ディスプレイの試作，映像情報メディア学技報，33(42)，3DIT2009-72，pp. 33-36，2009.
- 3 吉田ら：全周囲より観察可能なテーブル型裸眼立体ディスプレイ表示原理と初期実装に関する検討，日本 VR 学論，15(2)，pp. 121-124，2010.
- 4 Yoshida, et al.: Prototyping of Glasses-free Tablestyle 3D Display for Tabletop Tasks, SID2010, pp. 211-214, 2010.
- 5 吉田ら：周囲から観察可能な光線野再生型テーブル様裸眼立体ディスプレイ，3D 画像コンファレンス 2010, pp. 51-54, 2010.

- 6 Yoshida, et al.: Implementation of a Table-style 3-D Display Based on Light Field Reproduction, ACM SIGGRAPH2010, Poster 45B, 2010.
- 7 Koike, et al.: Enhanced Table, PCM2004, pp. 97-104, 2004.
- 8 Kakehi, et al.: Lumisight Talbe, IEEE CG&A, 25(1), pp. 48-53, 2005.
- 9 Actuality Systems, Inc.: Perspecta Spatial 3-D System, <http://actuality-medical.com/>, 2002.
- 10 Otsuka, et al.: Transpost: all-around display system for 3D solid image, VRST'04, pp. 187-194, 2004.
- 11 Jones, et al.: An interactive 360° light field display, SIGGRAPH2007 E-Tech, p. 13, 2007.
- 12 Ito, et al.: 360-degree Autostereoscopic Display, SIGGRAPH2010 E-Tech, 2010.
- 13 石川光学造形研究所: ILLUSION THEATER 等, <http://www.holoart.co.jp/>, 2009.
- 14 前川ら: 空間映像による対面型コミュニケーション, 3D 画像コンファレンス 2009, pp. 149-152, 2009.
- 15 和田ら: FloasionTable: 複合現実展示のための多方向から鑑賞可能な空間立像ディスプレイ, 信学技報, MVE2009-135, pp. 29-34, 2010.
- 16 Kimura, et al.: Laser produced 3D display in the air, SIGGRAPH2006 E-Tech, p. 20, 2006.
- 17 IO2Technology: Heliodisplay, <http://www.io2technology.com/>, 2009.
- 18 北村ら: 偏光フィルタを用いた多人数共有型立体表示装置, 信学論 D, J90-D (10), pp. 2893-2902, 2007.
- 19 三科ら: 超高精細液晶パネルを用いた電子ホログラフィーによる立体カラー映像再生, ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 30(2), pp. 12-17, 2010.
- 20 Arai, et al.: Microlens arrays for integral imaging system, Applied Optics, 45(36), pp. 9066-9078, 2006.
- 21 坂井ら: ミニプロジェクタレイの重畳投影技術を用いた大画面インテグラルフォトグラフィディスプレイ, 3D コン 2009, pp. 165-168, 2009.
- 22 福島ら: 観賞者参加型の 3 次元映像ディスプレイ, 情処論, 47(4), pp. 368-373, 2006.



よし だ しゅん すけ
吉田俊介

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループ専攻研究員
博士(学術)
立体映像メディアと提示技術



や の すみ お
矢野澄男

NHK 放送技術研究所テレビ方式研究
部主任研究員 工学博士
放送方式、視覚情報処理



あ ん どう ひろ し
安藤広志

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感システムグループグループ
リーダー 博士(計算神経科学)
認知脳科学、多感覚認知メカニズム、
多感覚インタフェース