

3-5 gCubik+iによるバーチャル3Dアクアリウム：手に持てる3Dディスプレイとテーブルトップディスプレイとが連携した自然なインタフェース

3-5 gCubik+i Virtual 3D Aquarium: Interfacing a Graspable 3D Display with a Tabletop Display

Roberto Lopez-Gulliver 吉田俊介 牧野真緒 矢野澄男 安藤広志

Roberto Lopez-Gulliver, YOSHIDA Shunsuke, MAKINO Mao, YANO Sumio, and ANDO Hiroshi

要旨

筆者らは、複数人での協調作業をサポートするコミュニケーションツールとして、箱型で、手に取ることができ、メガネなしの立体ディスプレイ、“gCubik”を提案し、開発した。このディスプレイは、正確な視点依存性の水平・垂直運動視差を伴う立体映像を多くのユーザに提供する。

この論文では、現行のgCubikの6面を持つ試作機およびその設計コンセプトを提示する。最初に、以下の技術的貢献の詳細を示す。a) 広い視野角度のインテグラルフォトグラフィ、b) インテグラルフォトグラフィのための実時間レンダリング、およびc) アプリケーション開発のための実時間アニメーションサポートアーキテクチャである。最後にgCubik+iを、立体ディスプレイをテーブルトップディスプレイと自然に接続する、新しいインタラクティブなプラットフォームとして提案する。また、提案するプラットフォームの機能およびそのインタラクティブ性の可能性を示す、バーチャル3Dアクアリウム・アプリケーションを例として紹介する。

We have proposed, and developed, the "gCubik", a cubic-shaped, graspable and glasses-free 3D display, as a communication tool to support group collaboration. The display provides multiple users with correct viewpoint-dependent full parallax 3D images.

This paper presents the current gCubik's 6-face prototype and its design concept. First, details of the following technical contributions are presented: a) wide field-of-view Integral Photography; b) real-time rendering for integral photography; and c) real-time animation support architecture for application development. Finally, we proposed the gCubik+i as a new interactive platform that naturally interfaces a 3D display with a tabletop display. A virtual 3D aquarium application that showcases the proposed platform's capabilities and its interactivity potential is presented.

【キーワード】

テーブルトップインタラクション, 立体ディスプレイ, 裸眼立体ディスプレイ, インテグラルフォトグラフィ, gCubik

Tabletop interaction, 3D display, Auto-stereoscopic display, Integral photography, gCubik

1 はじめに

自然な対面コミュニケーションを実現するには、視覚、嗅覚、触覚、および聴覚など、さまざまな

感覚のデータの伝達に関する基礎的な研究が必要である[1]。対面での協調作業の場合、ユーザはアイデアについての討議を後押しするため、往々としてテーブル上の実物体を動かすことに頼る。コ

ンピュータ支援の協調作業では、小型の手持ち式入出力デバイスを使用して、インタラクティブ性をテーブル上面に追加し、手で触れられるバーチャルな物体を導入することにより、ユーザ同士の議論を促進できる。そのためには、テーブルトップディスプレイと手で触れられるバーチャル物体との間の自然なインタフェースが必要となる。

ここでは、立体ディスプレイをテーブルトップディスプレイに自然に接続する新しいインタラクティブプラットフォームとして、gCubik+iを発案する。そのインタラクティブ性の可能性を例示する、バーチャル3Dアクアリウム・アプリケーションを図1に示す。

立体ディスプレイとテーブルトップディスプレイ双方により実現される実時間インタラクティブ性は、テーブルを囲む多数のユーザが、静止した平面画像の魚を、テーブルから自分の手に自然に取り上げ、水平・垂直運動視差を伴うインタラクティブな立体映像の魚に変換して見ることを可能にする。手に取った後は、ディスプレイを指差したり他のユーザに手渡したりすることにより、討議をサポートする。また、実時間アニメーションによる立体の魚を共有および操作することができる。

gCubik+iプラットフォームにより、以下に挙げ

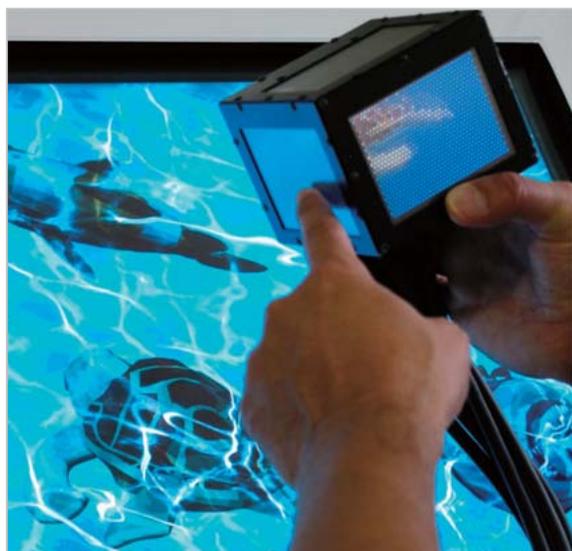


図1 gCubik+iプラットフォームを使用したインタラクティブなバーチャル3Dアクアリウム

る2つの新しいインタラクションパラダイムが、既存のテーブルトップディスプレイのアプリケーションに導入される。1) テーブル上の共有作業スペースとユーザの手の間で自然に切り替えを行うことにより、両方のインタラクション形式を効果的に組み合わせられること。さらに2) 静止した平面画像から、実物を手にしているかのように見たり動かしたりできる、インタラクティブ立体映像に切り替えること。

この論文では、まずgCubik+iプラットフォームを構成するgCubik立体ディスプレイおよびその技術的貢献の構成要素を説明する。a) 広い視野角度のインテグラルフォトグラフィ、b) インテグラルフォトグラフィのための実時間レンダリング、およびc) アプリケーション開発のための実時間アニメーションのサポートアーキテクチャである。次いで、gCubik+iプラットフォームをベースとした、インタラクティブなバーチャル3Dアクアリウム・アプリケーションの実装を提示し、複数のユーザ間の協調作業をどのようにサポートするかを論じる。最後に、そのコンセプトデザイン、背景、そして既存の関連研究との相違点の概要を示す。

2 gCubik+iプラットフォーム

2.1 システム構成

gCubik+iプラットフォームの貢献点は、gCubik立体ディスプレイを強化し[2]、ケース表面に直接触れることによる実時間インタラクティブ性を提供し、それをテーブルトップディスプレイに接続することである。またこのプラットフォームは、実時間レンダリングおよびアニメーションソフトウェアモジュールも提供し、容易なアプリケーション開発を可能にする。

図2にgCubik+i試作機の写真および図式化したシステムの概要を示す。

このシステムは、すべての面にタッチセンサの付いたgCubik立体ディスプレイ、赤外線(IR)センサ付きテーブルトップ32インチLCDディスプレイ、画像データおよびセンサ信号の入力および出力を処理する制御ボックス、画像レンダリングおよび信号処理のためのPCコンピュータで構成されている。

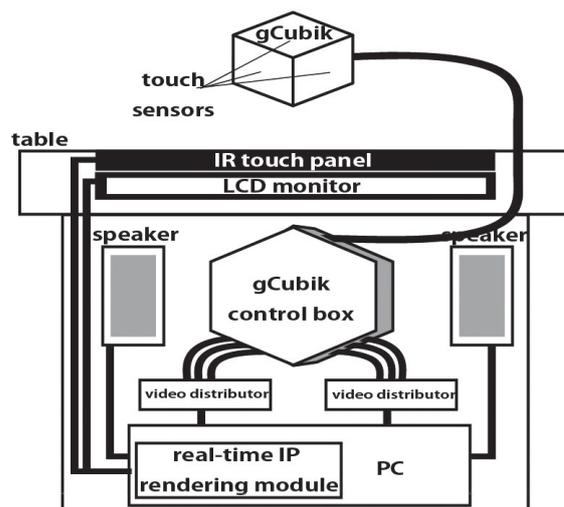


図2 gCubik+iプラットフォームの試作機

gCubik 立体ディスプレイは、LCD用VGAケーブルおよびタッチセンサ用USBケーブルを保持するケーブルを使って、制御ボックスに接続されている。ケーブルの長さは約1mで、ユーザがディスプレイを動かし、操作するのに十分なゆとりを持たせている。レンダリング用PCは、VGA解像度の映像を6系統出力し、表示のため、映像分配機を通して実時間でgCubikへと送出する。テーブルトップディスプレイは、IRタッチセンサによって、インタラクション時の立体箱型ディスプレイとの接近が検出される。

続く項目では、gCubik+iプラットフォームのハードウェアおよびソフトウェアの詳細について説明する。

2.2 gCubik: メガネなしの立体ディスプレイ

筆者らは、複数のユーザが特殊なメガネなしで立体映像を見たり共有したりするのを可能にする、手に取ることのできる箱型立体ディスプレイ、gCubik^[2]を発案した。このディスプレイは、立体的な水平・垂直運動視差のある画像を提供し、正確な視点依存の視野を与え、どの方向からでも見ることができる。ユーザは、ディスプレイ内の立体的なバーチャル物体を、自分の手に取って動かすことが可能である。gCubikは、後ほど項目4.3で説明する、複数人で共有する立体ディスプレイの必要条件である“4つのg”を実現するよう

設計されている。

このディスプレイは一辺が10cmの立方体で、重量はおよそ950gである。ディスプレイの各面は、LCDパネル、マイクロレンズアレイプレート、およびタッチセンサから構成されており、その配置を図3に示す。このマイクロレンズアレイにより、インテグラルフォトグラフィ(IP)^{[3][4]}技法をベースとした裸眼立体観察が可能になる。

2.2.1 広い視野角度のIP

上述の箱型ディスプレイをどの方向からでも見ることができるようにするには、各IPレンズは、図4の左部分に示されているように、光線群を少なくとも 2θ の角度で調整可能でなければならない。ここで、ディスプレイの3面を同時に観察する場合に、最も困難な状況が生じる。観察距離を D とすると、視点は $e = \frac{D}{\sqrt{3}}(1,1,1)$ となる。また1面の大きさを B 、法線 $n = (0, 0, 1)$ を持つ上面 F の中心を $e = (0, 0, \frac{B}{2})$ とすると、上記 θ は、観察のベクトル $v = e - c$ と法線 n 間の角度となる。 $D = 400\text{ mm}$ および $B = 72\text{ mm}$ なので、 θ は59.2度となる。そのため、開発する箱型ディスプレイは、最低でも視野角度120度のIPレンズを必要とする。

IPで一般に使用されるレンズアレイは、図4の右に示したとおり、数個の平凸レンズをピッチサイズ p で隙間なく並べた平面アレイとみなすことができる。市販のIPレンズでは、視野角度 2θ が40度にすぎないため、今回の目的には適合しな

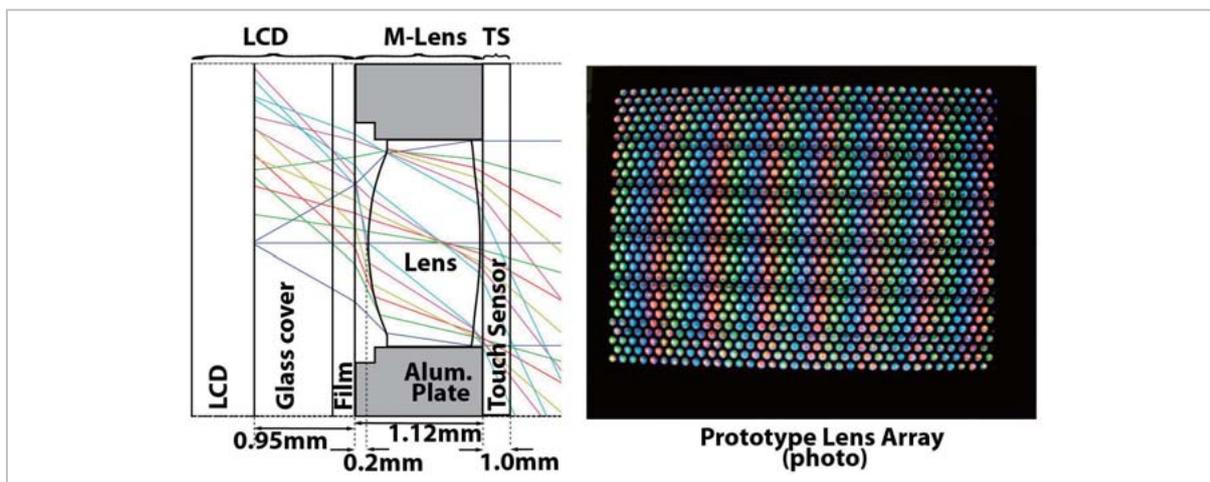


図3 IPレンズアレイの試作品

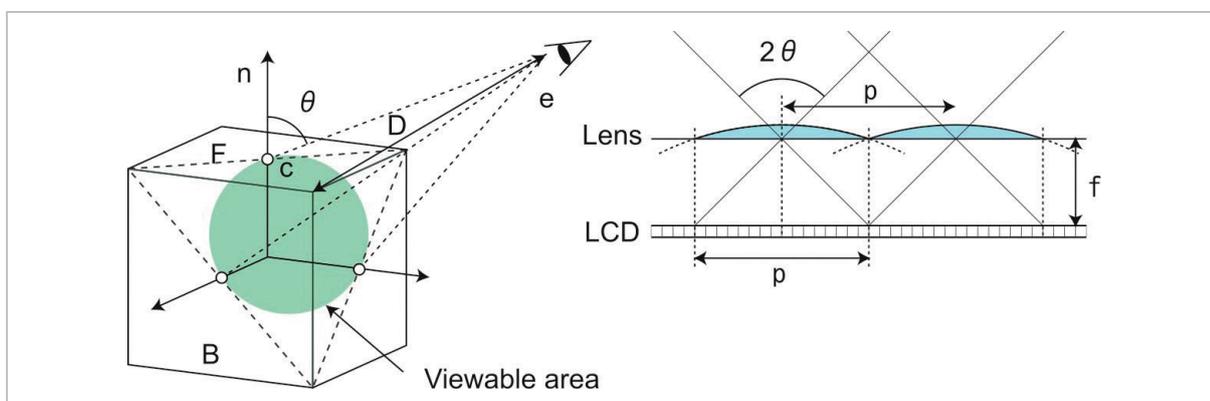


図4 IPレンズの視野角度の要件

い。

そのため、筆者らは視野角度 120 度の IP レンズアレイを設計し実装した。各 IP レンズは両凸レンズであり、図 3 に示したとおり、左の LCD の前に配列される。IP レンズは、黒色に塗装された 1.12 mm 厚のアルミニウムプレートに開けられた穴の中に装着される。各プレートに 1065 個ずつレンズを取り付ける。穴は半径 2.0 mm で、最適充填するためにハチの巣状の並びに配置されている。IP レンズ間の距離は、今回の実験で使用する LCD ディスプレイの 18×18 ピクセルの面積を覆うよう各レンズを設置することにより、2.025 mm に固定されている。IP の焦点距離 f 、有効口径および他のパラメータは画質のために最適化されており、LCD のガラスとフィルムも計算に含まれている。

2.2.2 抵抗膜方式タッチセンサ

gCubik の各面の表面には、タッチセンサが追加されており、図 3 に示すとおり、直接触れることによるインタラクティブ性が備わっている。ここでは市販の選択肢の中から、静電容量方式のものではなく、抵抗膜方式のセンサを選んだ。抵抗膜方式のセンサは、ユーザが直接のインタラクションのため意図的に指の爪を使って初めて、タッチイベントを始動させるためである。一方、静電容量方式のセンサは、ユーザが片手でディスプレイを持っただけでタッチイベントを始動させてしまう。

抵抗膜方式タッチセンサは、非常に薄い 2 層の金属導電層を持つ。これらの導電層は、タッチセンサの透過率に影響を及ぼす。通常約 80 % に減光されるため、IP 映像の輝度を若干減衰させる。またこれらの層は、光をわずかに拡散することが

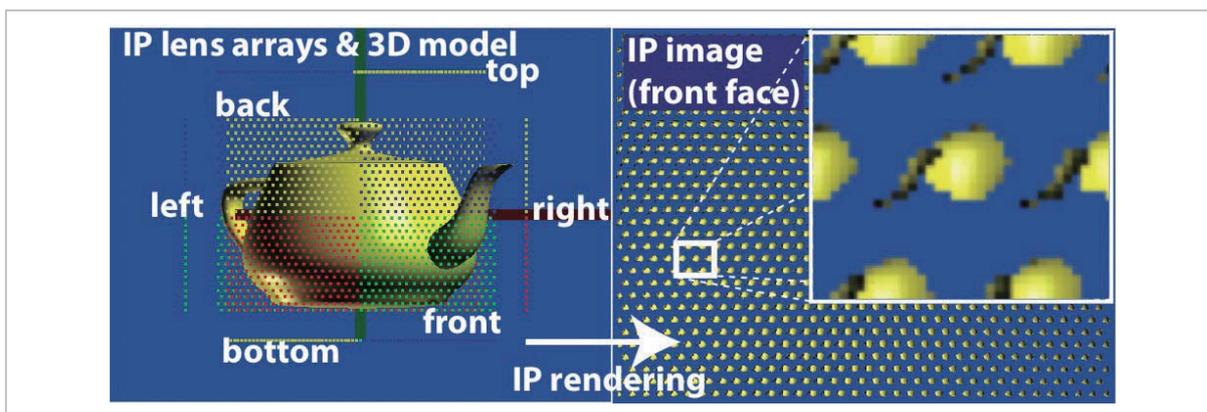


図5 IP レンズアレイおよび立体モデルの相対的な位置(左)。前面に表示された IP 映像と、要素画像の細部を示した拡大挿入図(右)

あり、IP 映像の両眼立体視に影響を及ぼす可能性が高い。結果として得られる IP 映像の定量的測定および必要な修正は、今後の課題としたい。

2.3 IP のための実時間レンダリング

レンダリングアルゴリズムには、フレームバッファオブジェクト (FBO) を用いた OpenGL [5] オフスクリーンレンダリングを使用する。このアルゴリズムは、文献 [6] におけるアルゴリズム、および文献 [7] からのアイデアの強化版である。FBO はメインメモリからビデオメモリへの転送とコンテキストスイッチを回避し、処理性能を向上させる。同時に、スクリーンの大きさはフレームバッファオブジェクトの大きさに制限されない。今回の実装では、立方体の 6 つの各面に、 $(640 \times 2) \times (480 \times 2)$ ピクセル大の FBO を確保し、アップサンプリングしてエイリアシングによるアーチファクトを回避する。次いで、立体シーンを上述の FBO にレンダリングし、1065 個の各 IP レンズの位置から、視野角度 120 度の仮想カメラを使って、各要素画像に対応する $(18 \times 2) \times (18 \times 2)$ ピクセルの表示域に描画する。その際、ステンシルマスクを使用し、隣接するレンズの位置に伴う表示域のオーバーラップを防止する。その後は、ダウンサンプルした 640×480 ピクセルの FBO にストアされたレンダリング結果を方形ポリゴンにテクスチャとして貼り付け、このウィンドウシステムの提供するフレームバッファ上に描画すればよい。試作機のレンズアレイに含まれる 1 面当たり 1065 の IP レンズ数により、ディスプレイの立体

解像度は約 36×30 立体ドットに制限される。

図 5 の左部分に、箱型ディスプレイの 6 つの面に対応する、立体モデルおよび 6 つの IP レンズアレイの相対的な位置を示す。図のドット群は、レンズアレイ内の各レンズの位置を表す。同じ図の右部分に示したのは、箱型ディスプレイの前面に描画された IP 映像である。挿入拡大図には、生成された要素画像の細部が示されている。今回の試作機では LCD ディスプレイの前面が上下逆さになっているため、要素画像も転倒している。図 6 に、gCubik に表示した立体ティーポットの同時多面観察を示す。この gCubik は、ここで説明した今回発案する広視野角度 IP レンズを使用している。

アルゴリズム 1 に発案したアルゴリズムを示す。初期化の間、各スクリーンに対して、カラーバッファおよび深度バッファを伴う FBO を画像として割り当てる。この FBO で要素画像が生成される。レンダリングループは、ディスプレイの全スクリーンおよび各スクリーンの全要素レンズに対して動作し、各レンズ位置に仮想カメラを移動させる。次いで、このカメラを使用した立体シーンのレンダリングによって、IP 要素画像が生成される。

FBO 上のレンダリング対象領域の位置を設定するには、特別な注意、すなわち、ビューポートを適切に設定することが必要である。また、他の要素画像に上書きするのを避けるため、シザーテストも求められる。要素画像の形が矩形でない場合、要素画像のオーバーラップを回避するため、

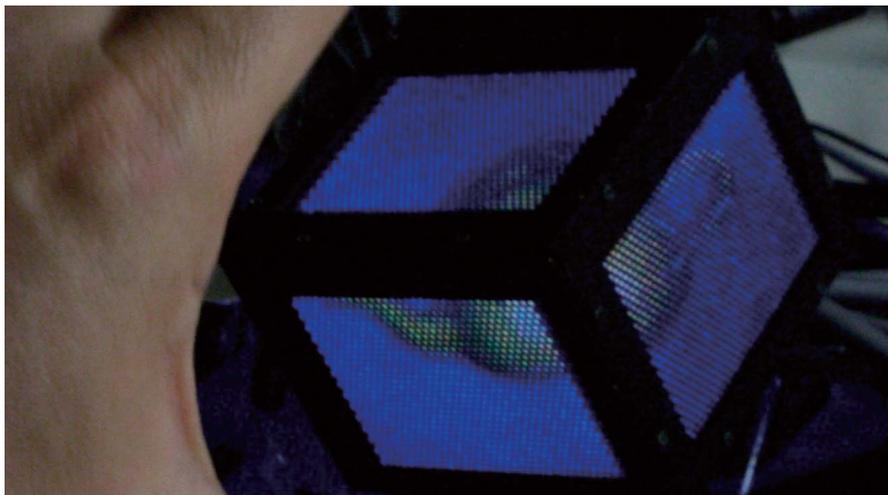


図6 インテグラルフォトグラフィ(ティーポット)の同時多面観察

アルゴリズム 1 FBO を用いた IP 映像のレンダリングアルゴリズム

```

Init Program
Initialize 3D Scene and sensors ## initGL()
Initialize FBO for each screen
...
Rendering Loop
update animation and sensors ## tickGL()
  for each screen in the cube display
    bind screen's FBO as rendering target
    for each elemental lens in the screen
      move camera to lens' position
      lookat inside the cube
      set camera projection to perspective
      set FBO's target rendering area ...
        ... according to lens position
      set circular/hexagonal mask
      render 3D scene to FBO ## drawGL()
    release screen's FBO as rendering target
  down-sample IP image to screen size
  display IP image on screen
cleanup 3D scene and sensors ## closeGL()
End
    
```

ステンシルマスクを使用しなければならない。各画面の IP 映像が生成された後、FBO にそれらの画像が取められるが、アルゴリズムは画面のフレームバッファ上に FBO をテクスチャ処理した方形ポリゴンを描画する。その際、テクスチャマッピングによる、必要に応じたテクスチャ縮小機能、

アンチエイリアシングを使用し、IP 映像をダウンサンプルする。その後、レンダリングループは上述の各段階を停止されるまで繰り返す。

2.3.1 性能結果

今回のテストでは、複数のマテリアルが設定され、テクスチャが付与されていない、3500 頂点、

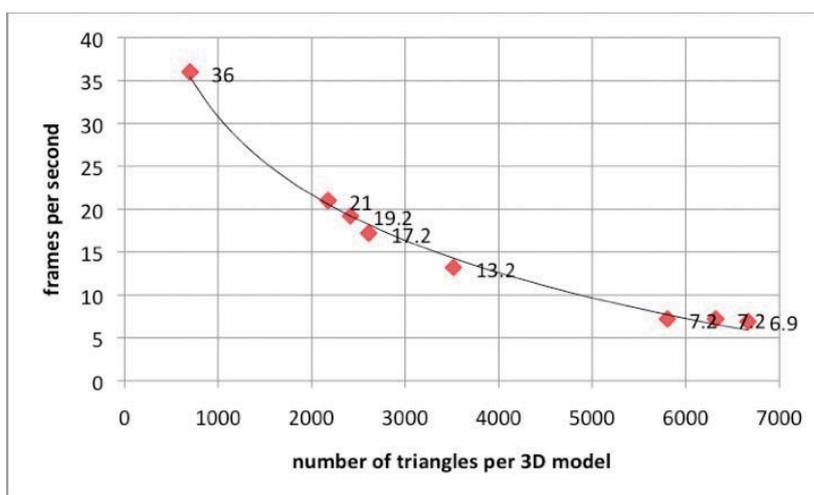


図7 発案したアルゴリズムの性能

6500 トライアングルの、シェーディングされた立体ティーポットモデルの表示において、2.66 GHz の Intel Core2 Quad CPU と、NVIDIA GeForce 8800 GT グラフィックスカード1枚を使用して、最大 12 fps (1 秒当たり 12 フレーム) を達成できた。

さまざまな数のポリゴンを伴う立体モデルに対する、発案したアルゴリズムの性能を図7に示す。

2.3.2 エイリアシングに関する考察

コンピュータで生成した IP レンダリングアルゴリズムについては、多くの場合、エイリアシングの問題を考慮する必要がある。エイリアシングは通常、要素画像の解像度が低いことに起因する。解決策の1つは、要素画像をより高い解像度でレンダリングした後、表示された画像を、アンチエイリアシングフィルタを使ってダウンサンプリングすることである。だが、IP 映像に含まれる個々のピクセルすべてが有効な場合、生じる運動視差はアンチエイリアシング後も失われないことに留意すべきである。

今回の実験では、拡大係数 2 (mf = 2) を使用したため、まず各要素画像を 36 × 36 ピクセルでレンダリングし、次いでバイキュービックフィルタを使って最終的に 18 × 18 ピクセルの解像度までダウンサンプリングする。

図8に、今回得ることのできたアンチエイリアシング効果の一部を示す。画像(a)は、36 × 36 ピクセルの高解像度でレンダリングされた要素画像

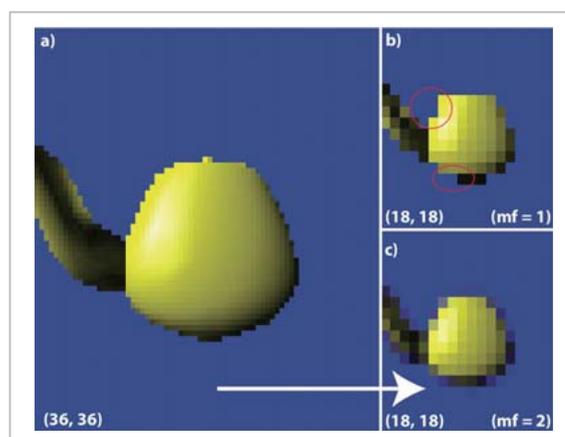


図8 要素画像のエイリアシング問題

(b)は拡大していない(mf = 1)ぎざぎざの辺縁。(a)は拡大係数 2 (mf = 2) を使用してレンダリングした画像で、バイキュービックフィルタを用いたダウンサンプリングによるアンチエイリアス画像(c)の作成に使用した。

である。画像(b)には、18 × 18 ピクセルでレンダリングされた要素画像を示した。丸で囲った部分のぎざぎざの辺縁(エイリアシング)に注目できる。この部分が、最終的な gCubik ディスプレイでの見た目に、オリジナルの形状とは異なる立体オブジェクトの外観を決定付ける。画像(c)は、画像(a)のダウンサンプリング後に表示された 18 × 18 ピクセルの要素画像である。ぎざぎざの辺縁が滑らかになり、ディスプレイに表示される再構成された立体映像は、オリジナルの形状により近いように見える。

アンチエイリアシングは、使用可能な VRAM により制限される FBO のリソースを余分に使用することに加えて、ダウンサンプリングのための余分な演算処理も必要とする。ダウンサンプリングまたはアップサンプリングのアルゴリズムが、多くの OpenGL のドライバでは相当に最適化されているにもかかわらず、その濫用は性能に影響する場合がある。

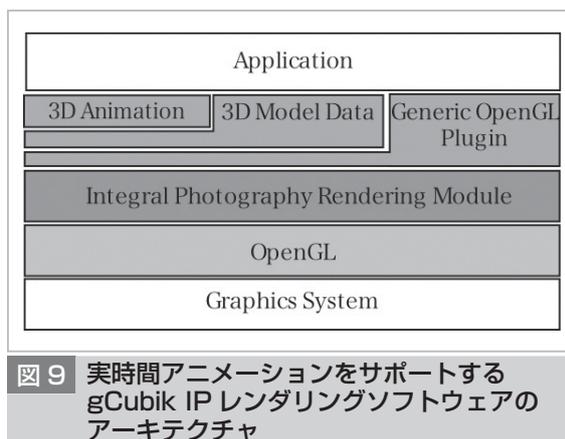
さらに、異なる拡大係数 4、8、および 16 を要素画像のレンダリングに使用して、gCubik に表示される最終的な立体 IP 映像の外観に影響するかどうかを試みた。その結果、最初に使用した $mf = 2$ に対する大幅な相違は見られなかった。実際に $mf = 4, 8, 16$ の各画像の $mf = 2$ の画像に対する類似性を定量化したが、ほとんど差がないことがわかった。2つの画像の差の2乗平均平方根 (RMS) を使用し、その差を正規化して、黒い画像を参照画像とを比較した場合に類似性が 0%、2つの画像が同一の場合には類似性が 100% となるようにした。 $mf = 4, 8, 16$ の画像はほぼ同等であり、 $mf = 2$ の画像に対して約 98% の類似性を示した。従って、 $mf = 2$ が今回の目的に十分になっていることが確認された。

2.4 実時間アニメーションのソフトウェアアーキテクチャ

前述した IP のための実時間レンダリングアルゴリズムにより、gCubik 立体ディスプレイに、実時間アニメーションおよびインタラクティブ性を効果的に提供することが可能になる。

gCubik 立体ディスプレイのためのアプリケーション開発を容易にするため、図 9 に示すとおり、プラグインアーキテクチャを実装した。また前述した IP レンダリングアルゴリズムを、OpenGL グラフィックスライブラリ [5] の最上位のモジュールに要約した。その結果、アプリケーション開発者は、標準 OpenGL プラグイン、立体モデルデータまたは立体モデルアニメーションのいずれかを通して、自分の必要および専門技術に応じ、実時間コンテンツを追加する柔軟性を得る。それらすべては IP レンダリングモジュールに送達され、gCubik ディスプレイのために必要な画像が生成される。

標準 OpenGL プラグインは、経験豊富なプログ



ラマが OpenGL コマンドを直接送出して、アプリケーションのバーチャルな立体世界、その中の立体オブジェクトおよびその動作を記述することを可能にする。開発者の API は、これもアルゴリズム 1 に示されているが、4つの機能から成る。“*initGL*” および “*closeGL*” はアプリケーションの処理中一度のみ呼び出され、主にグラフィックスコンテキストの初期化または消去、立体モデルデータの読み込み、および必要な他のセンサの初期化に使用される。“*tickGL*” は IP レンダリング処理のループごとに一度呼び出され、主にバーチャル物体の位置および動作をセンサデータの入力に応じて更新するために使用される。“*drawGL*” は、立体シーンの要素画像が生成されるごとに、IP レンズの数と同じ回数、gCubik ディスプレイの場合は 6×1065 回呼び出される。そのため、どのような性能の最適化も、これらの機能の最適化から始める必要がある。

立体オブジェクトを異なる形式で容易に読み込み表示するため、立体モデルデータモジュールを使用できる。現在の実装では、Alias Wavefront OBJ 形式のみをサポートするが、他の形式も容易に追加可能である。グラフィックデザイナーはこのモジュールを使って、gCubik ディスプレイに自分の立体オブジェクトを容易に表示することができる。

立体アニメーションモジュールにより、グラフィックデザイナーおよび経験豊富な立体アニメータは、自分の選ぶ立体ソフトウェアでアニメーションを開発することができる。このモジュールは標準で Quake MD2 動画形式ファイルをサポート

トしている。とはいえ Maya アニメーションファイルも、レンダリングのための Quake MD2 アニメーションファイルにオフラインで変換可能である。

3 実装と考察

3.1 バーチャル 3D アクアリウム・アプリケーション

gCubik+i プラットフォームの本来の性能を具体的に示すため、インタラクティブなバーチャル 3D アクアリウムを、コンセプト応用の実証例として開発した。ユーザは、インタラクティブな立体の魚を同時に観察し、共有し、他の人に手渡すことができ、結果として複数人での協調作業をよりよく支持することが可能になる。このアプリケーションは、文献[8]で説明されている類似の製品を、複数人で共有するインタラクティブな立体映像の追加によって強化する。

手に取ることでできる箱型立体ディスプレイ gCubik を使って、ユーザは魚の静止平面画像をテーブル上のデジタル絵本から自然に取り上げ、立体の魚に変換して観察することができる。ディスプレイ上の立体の魚は、実時間で操作し、動かすことが可能である。画像はどの方向からでも、特殊なメガネなしで立体的に観察できる。

ディスプレイの側面で指をドラッグさせて、

ユーザはさまざまな観察角度で魚を調査できる。また箱の面を繰り返し叩いて魚を追い払うこともできる。魚をテーブル上の平面デジタルブックに戻すには、元の場所に gCubik で触れるだけでよい。このインタラクションにおける各段階の流れを図 10 に示す。現在の実装では、テーブル上に 6 匹の魚が表示される。

3.2 ユーザのインタラクション体験

gCubik+i プラットフォームおよびそのバーチャル 3D アクアリウム・アプリケーションを、いくつかの大規模な会場で展示した[9][10]。以下の検討は、前述の展示中[9]の、システムと対話操作するユーザによるビデオ録画された会合の分析に基づいている。1日8時間で4日間の展示中、1000人を超えるユーザがシステムを利用した。

3.2.1 複数人での共有

図 11 に、システムを対話操作しているユーザの典型的な様子を示す。筆者らは、4.2 の項目で検討した複数人での共有行動を繰り返し観察した。つまり、1) テーブルの周囲に集まり、2) 同時に指差し、3) より近くで観察できるように他の人にディスプレイを手渡し、4) ディスプレイから他のユーザのコメントへと注意を切り替えるときに自然に目を合わせる、といった行動である。

テーブルの周囲に集まり (1)、同時に指差すこと (2) は、立体映像で、またどの方向からでも正確

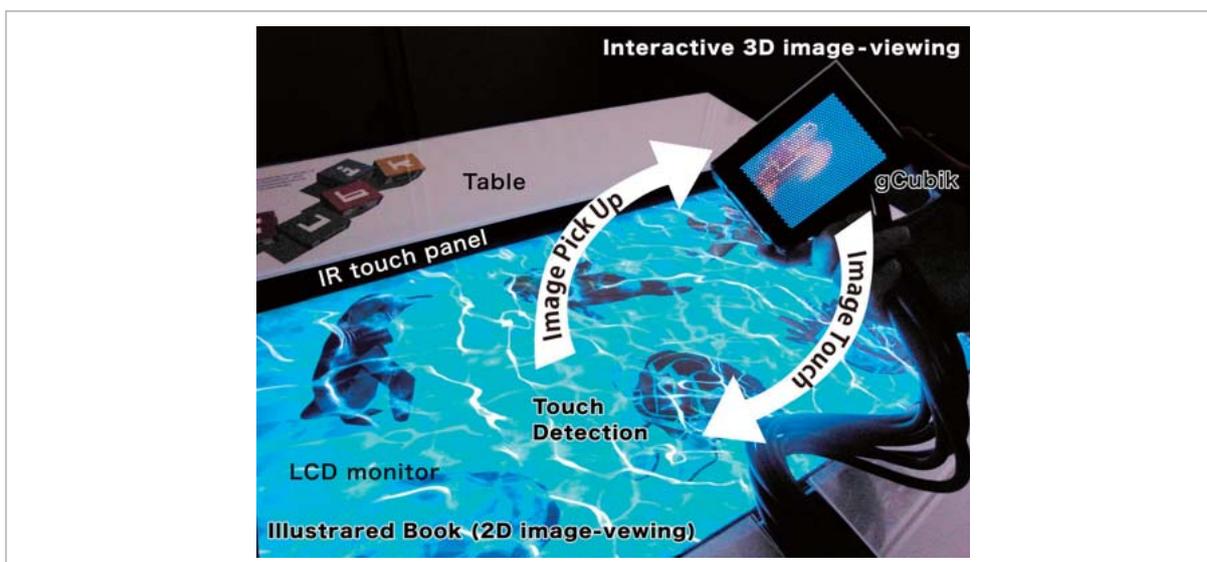


図 10 gCubik とデジタル絵本との間のインタラクション過程および画像切り替えの流れ



図 11 バーチャル 3D アクアリウムと対話操作するユーザ

な視野で、どのような視点でも展示されたディスプレイを観察できる場合に可能となる。ユーザは実物を手に持ち、見ているように感じるだろう。

より近くで観察できるようディスプレイを他のユーザに手渡し(3)、自然に目を合わせること(4)は、展示されたディスプレイが小型で手に取ることができるので可能となった。従来のテーブルトップディスプレイのように、共有する平面スクリーンをユーザが目を凝らして見る代わりに、gCubik のユーザは、観察のためにディスプレイを引き寄せたり、必要であれば他の人に手渡したりする。

gCubik+i プラットフォームは、ユーザ間の話者交替がインタラクションの流れを妨げるような状況での協調作業に申し分なく適している。このプラットフォームは、上述の複数人での共調作業の4つの要件を効果的に統合している。

3.2.2 平面 / 立体ディスプレイの自然なインタフェース

ほとんどのユーザのコメントは、立体ディスプレイとテーブルトップディスプレイのインタフェースが、どれほど自然で、直接的および直観的かという点に関係している。gCubik を使ってテーブルから魚を取り出すことで、実際に釣りを楽しんでいるようにユーザが感じたり、gCubik を近づけたときに魚が本当に飛び出てくるように感じたりすることがある。人とコンピュータ間のインタラクションを実際に体験したユーザでも、テーブル上の IR タッチセンサが唯一のセンサで、gCubik に

特別なセンサは付いていないことを理解するまでに、いくらか時間がかかった。これはインタラクションに含まれる以下の要素のためと考えられる。gCubik が唯一の可動式取り出しデバイスであること。テーブルから gCubik に魚を取り出し、また元に戻す手の動きが自然であること。さらに、魚を単にコピーするのではなく、効果的にテーブルから魚を削除して gCubik ディスプレイに転送することによって、ユーザの注意を gCubik にそらす[11]。これにより、この後の項目 4.3 で検討する gCubik+i プラットフォームのコンセプトへの期待が強化された。テーブル上のバーチャル物体を取り出したり戻したりするための自然なデバイスとしての、手に取ることでできる立体ディスプレイを使用するコンセプトである。

4 デザインコンセプト

4.1 複数人で共有する立体ディスプレイ (4g+i)

複数人での討議の一部として自然に扱えるよう、実物体の置き換えになるツールを gCubik は目指している。今回試作した gCubik は、次の概念で実装を試みた。g1) 複数人での共有：複数のユーザが、自分の位置にかかわらず正確な視野で同時に観察できること。g2) 手に取ることが可能：容易に片手で持ち、他の人に手渡せること。g3) メガネなし：特殊なメガネなしで立体観察できること。g4) 物体を取り込んだ展示ケース：立体的な実物体が透明なケースの中にあるような印象を与えること。さらに i) インタラクティブ：手または指の動きだけで、自然な実時間インタラクションが可能であること。

図 12 は、そのような立体ディスプレイが、討議で共有する物体を提供し、複数のユーザが自分の位置にかかわらず同時にディスプレイを観察できるようにすることを示している。サイズが小型なので、物体を容易に手渡すことができることに加えて、討議の間、ユーザ間で自然な目の接触を保つことも可能である。

4.2 背景：テーブルトップでの協調作業

コンピュータ支援協調作業(CSCW)および人とコンピュータ間のインタラクション(HCI)の分野

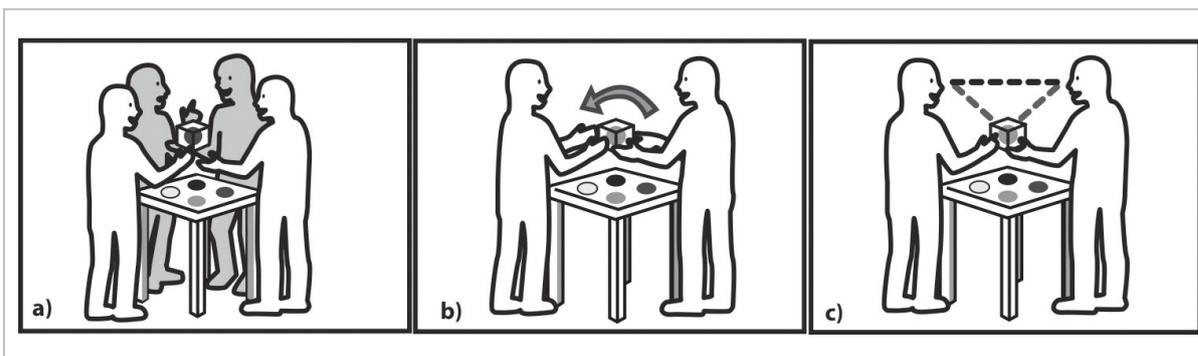


図 12 複数人で共有する立体ディスプレイの特徴となる要件

a) ユーザの位置にかかわらず同時に観察できる。b) 物体を自然に指差し、容易に手渡すことができる。c) 自然に目を合わせることができる。

で、複数の人がテーブルを囲んで議論し協調作業する伝統的な方法を円滑にすると共に強化する仕方について、多くの研究が行われてきた。ここでは検討を、a) タンジブルユーザインタフェース (TUI)、b) 複数のユーザによるテーブルトップインタラクション、および c) 立体 (3D) ディスプレイの領域に絞る。

TUI (a) は、デジタル情報の表示または制御手段としての物理的な人工物の使用により、オブジェクトを自然に動かす今回開発した技術の活用を確実にする。実物体は、ディスプレイとデータのビットに対するインタフェースのどちらにもなるため、インタラクションを直接的および直観的なものとし、“直接関与”を可能にする [12]。例えば、小さな複数の立方体を、立体モデルデータをコンピュータに入力する入力インタフェースとしての構造体に組み立てること [13][14]、または本物の植物に触れて、さまざまなパラメータを入力し、バーチャル 3D 植物を生成することなどが挙げられる [15]。

テーブルトップインタラクティブディスプレイ (b) は、一般に複数人での協調作業をサポートするために使用される。特に関心の的となるのは、複数のユーザが、素手でディスプレイに触れることにより、同時にデジタル情報と対話操作することを可能にする技術である [16]–[18]。複数のディスプレイを接続し、簡潔で直観的なピックアップドロップのメタファーを用いて、平面ディスプレイ間で転送することにより、複数のユーザがバーチャル物体を共有できるようにする多くの技術を、

文献 [19][20]に見出すことができる。

立体ディスプレイ (c) は、インタラクティブシステムの視覚的体験の充実を保証する [21]。特殊なメガネを使用する立体ディスプレイ [22] から、裸眼立体ディスプレイやボリュームディスプレイまで、さまざまな実例がある [23]–[25]。しかしながら、これらは重量またはサイズが大きいため、直接的インタラクションのために、自由に動かすことも触れることもできない。

またインテグラルフォトグラフィ (IP) は、立体ディスプレイのために用いられる技術の 1 つである [3]。マイクロレンズアレイは、現実のシーンに含まれる複数の視点依存な視野を記録および表示するために使用される。特殊なメガネは必要ない。両眼立体視および水平・垂直運動視差を伴う技術が容易に使用可能である。IP の動画に対する実時間での拡張は、医学的応用 [26] および実写でライブストリーミングのために発案されてきた [27][28]。これらのシステムは強化された視野角を備えているが、依然として単一スクリーンでの正面からの観察のために設計されている。

4.3 テーブルトップと立体ディスプレイ間の自然なインタフェース

次のシナリオを考えてみたい。複数の人が携帯電話の新しいモデルについて討議している。状況が許すなら、誰かがすぐにでも自分の携帯電話をポケットから取り出して、テーブルの上に置き、新しいモデルの特徴を説明しながら、その携帯電話のいくつかの部分を指差し始めることだろう。

その人は携帯電話を手にとって、より近くで観察できるように、他の人に手渡すかもしれない。こうした方法によって、討議はより具体的になり、話題に関する参加者の理解も容易になる。このシナリオは、複数人での対面による協調作業において、ごくありふれたものである。

gCubik+iプラットフォームは、立体ディスプレイをテーブルトップディスプレイに自然に接続することにより、複数のユーザが立体映像を自然に共有し対話操作することを可能にし、複数人による協調作業をサポートすることを目的とする。この立体ディスプレイが実物体をインタラクティブなバーチャル物体に置き換える一方、テーブルトップディスプレイは、さまざまなバーチャル物体の中から選択することを可能にする。図12に、今回のデザインコンセプトを示すインタラクションシナリオを示す。

インタラクションは、さまざまな物体をそのまま自分の手でつかんでテーブルから取り出し、討議のため複数人の中心に持ってくるかのように、自然でなければならない。理想的には、立体ディスプレイが表示用デバイスとして機能するだけでなく、テーブルトップディスプレイからバーチャル物体を取り出したり戻したりするためのデバイスとしても機能する必要がある。このように、共有するテーブル上の作業スペースとユーザの手との間で滑らかに切り替えを行うことにより、両者のインタラクション形式を効果的に組み合わせ、

協調作業を充実させることができる。

図13に、立体ディスプレイそのものを、テーブル上のバーチャル物体を取り出したり戻したりするためのデバイスとして用いるべきことを示した。

4.4 関連研究

この項目では、今回発案するインタラクションプラットフォームに深く関連した既存研究を振り返り、検討する。ここでは主に、手に取ることのできる立体ディスプレイと、複数のユーザで使用するテーブルトップシステムにフォーカスする。

これまでにも、手に取ることができ、インタラクティブな箱型立体ディスプレイがいくつか発案された。だが、あるものは立体効果を得るのに特殊なメガネを必要とし[22]、前述のg3の特徴に欠けていた。他の発案されたディスプレイ[29]-[32]は特殊なメガネを必要としないが、3Dの運動視差を得るためにユーザの頭を追跡しなければならず、単一ユーザを前提としていた。これらのディスプレイは、前述のg1およびg3を同時に満たすことができない。

複数のユーザ向けの機能を持つ、いくつものインタラクティブテーブルトップディスプレイも発案されてきた。例えば、文献[33]で言及された製品は、ユーザの頭を追跡することにより、最大4名のユーザが、同時に立体運動視差を伴う立体映像を観察および共有することを可能にした。この製品は、立体ディスプレイと、中央に穴を開けたディスプレイマスクで構成されている。しかしながら、ユーザは特殊なメガネをかける必要がある。さらに、ユーザはバーチャル物体を自然に指差すことはできるが、直接動かすために手に取ることができない。このシステムは前述のg2およびg3に欠けている。また文献[34]では、いくらか関連したシステムが提案されており、特別に設計された光学スクリーンを使用して、複数のユーザにそれぞれの視点を持つ画像を提供する。この製品には、インタラクティブな小型の実物体が含まれており、さまざまな物体を表示する小型スクリーンとして機能する。ところが現行の実装でサポートされているのは、固定位置での2人のユーザのみである。このシステムには、前述の項目で扱われた要件すべてが実装されているが、ユーザの数が制限されておりg1、オブジェクトの操作はテーブ

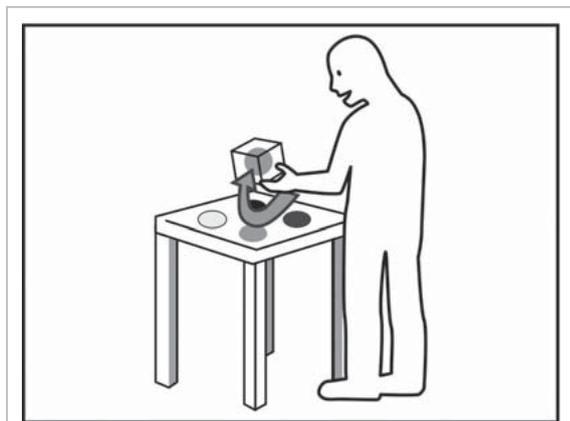


図13 テーブルからバーチャル物体を取り出したり戻したりするためのデバイスとして働く、手に取ることのできる立体ディスプレイ

ルの上面のみで行えるため g2、部分的にすぎない。また、テーブルトップ装置上でインタラクティブを実現する、IP を使用したメガネなしの立体ディスプレイが文献^[35]で紹介されている。複数のユーザが立体で水平・垂直運動視差を伴う表示を見ることが可能だが、すべてのインタラクションは、テーブルの上面で単一の IP スクリーンを通してのみ生じる。

今回発案した gCubik+i プラットフォームは、これまでに検討した“4g+i”の要件すべての効果的な統合を確実にする。

5 おわりに

本論文では、立体ディスプレイをテーブルトップディスプレイに自然に接続する、複数での協調作業に適した、新しいインタラクティブプラットフォームとして、gCubik+i を提示した。また、gCubik+i プラットフォームのデザインコンセプトに加えて、このプラットフォームに基づく、インタラクティブなバーチャル3Dアクアリウム・アプリケーションの実装に関する概要を示した。こ

のシステムと対話操作したユーザとの予備実験では、インタラクションは自然および直観的で、複数のユーザが立体的なバーチャル物体を実物体として観察および操作できることにより、複数人での協調作業がサポートされることが示唆された。

筆者らは、gCubik+i プラットフォームを使用して、立体映像情報の共有で協調作業をサポートできる分野で、複数ユーザ用のアプリケーションを開発することを計画している。開発可能な多くのアプリケーションには、ゲーム、エデュテイメントおよびネットショッピング広告も含まれる。また、gCubik+i プラットフォームの使用によって発展する新しいインタラクションのパラダイムに関連した研究と共に、他のタイプのインタラクションと比較したその効果性の評価実験を実施することに主な関心を持っている。さらに、gCubik+i とレンダリング用 PC 間に無線画像転送システムを統合し、自由な操作を容易にすることを計画中である。また、複数の gCubik によるインタラクションのパラダイムについての研究にも関心を抱いている。

参考文献

- 1 K. Enami, "Research on ultra-realistic communications," in Proceedings of SPIE, Vol. 7329, p. 732902, 2009.
- 2 S. Yoshida, R. Lopez-Gulliver, S. Yano, H. Ando, and N. Inoue, "gcubik: Implementation of a graspable cubic auto-stereoscopic display for multi-user environments," The Institute of Image Information and Television Engineers, Vol. 64, No. 4, pp. 118–124, 2010.
- 3 G. Lippmann, "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief," Journal de Physique Theorique et Appliquee, Vol. 7, No. 1, pp. 821–825, 1908.
- 4 J. Arai, H. Kawai, and F. Okano, "Microlens arrays for integral imaging system," Applied optics, Vol. 45, No. 36, pp. 9066–9078, 2006.
- 5 D. Shreiner, M. Woo, J. Neider, and T. Davis, OpenGL (R) Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL (R), Version 2 (5th Edition). Addison-Wesley Professional, Aug. 2005.
- 6 M. Halle, "Multiple viewpoint rendering," in SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 243–254, ACM, 1998.
- 7 F. de Sorbier, V. Nozick, and V. Biri, "Gpu rendering for autostereoscopic displays," in 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2008.
- 8 C. Sommerer and L. Mignonneau, "'A-Volve' an evolutionary artificial life environment," in Artificial life V: proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, p. 167, The MIT Press, 1997.

- 9 R. Lopez-Gulliver, S. Yoshida, S. Yano, and N. Inoue, "gcubik: real-time integral image rendering for a cubic 3d display," in SIGGRAPH '09: ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies, ACM, 2009.
- 10 CEATEC, "<http://www.ceatec.com/>," 2009.
- 11 N. Suzuki, T. Kamiya, S. Yoshida, and S. Yano, "A Basic Study of Sensory Characteristics toward Interaction with a Box-Shaped Interface," in Proceedings of the 13th International Conference on Human-Computer Interaction. Part II: Novel Interaction Methods and Techniques, p.522, Springer, 2009.
- 12 H. Ishii and B. Ullmer, "Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms," in CHI '97: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 234–241, ACM, 1997.
- 13 Y. Kitamura, Y. Itoh, and F. Kishino, "Real-time 3d interaction with activecube," in CHI '01: CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems, pp. 355–356, ACM, 2001.
- 14 J. G. Sheridan, B. W. Short, K. V. Laerhoven, N. Villar, and G. Kortuem, "Exploring cube affordance: Towards a classification of non-verbal dynamics of physical interfaces for wearable computing," in In Proceedings of the IEE Eurowearable 2003; ISBN 0-85296-282-7; IEE, pp. 113–118, Press, 2003.
- 15 C. Sommerer and L. Mignonneau, "Interactive plant growing," *Ars Electronica*, pp. 408–414, 1993.
- 16 J. Rekimoto, "Smartskin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces," in CHI '02: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 113–120, ACM, 2002.
- 17 P. Dietz and D. Leigh, "Diamondtouch: a multi-user touch technology," in UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 219–226, ACM, 2001.
- 18 H. Koike and M. Kobayashi, "Enhanceddesk: Integrating paper documents and digital documents," in APCHI '98: Proceedings of the Third Asian Pacific Computer and Human Interaction, (Washington, DC, USA), p. 57, IEEE Computer Society, 1998.
- 19 J. Rekimoto, "Multiple-computer user interfaces: "beyond the desktop" direct manipulation environments," in CHI '00: CHI '00 extended abstracts on Human factors in computing systems, pp. 6–7, ACM, 2000.
- 20 M. A. Nacenta, D. Aliakseyeu, S. Subramanian, and C. Gutwin, "A comparison of techniques for multi-display reaching," in CHI '05: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 371–380, 2005.
- 21 T. Okoshi, *Three-Dimensional Imaging Techniques*. 1976.
- 22 H. Hua, L. D. Brown, and C. Gao, "System and interface framework for scape as a collaborative infrastructure," *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, Vol. 13, No. 2, pp. 234–250, 2004.
- 23 H. Kimura, T. Uchiyama, and H. Yoshikawa, "Laser produced 3d display in the air," in SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies, p. 20, ACM, 2006.
- 24 A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, and P. Debevec, "An interactive 360 light field display," in SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, p. 13, ACM, 2007.
- 25 J. Clar, "<http://www.jamesclar.com/>," 2002.
- 26 H. Liao, S. Nakajima, M. Iwahara, E. Kobayashi, I. Sakuma, N. Yahagi, and T. Dohi, "Intra-operative real-time 3-d information display system based on integral videography," *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 2208*, pp. 392–400, 2001.

- 27 Y. Taguchi, T. Koike, K. Takahashi, and T. Naemura, "Transcaip: A live 3d tv system using a camera array and an integral photography display with interactive control of viewing parameters," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 15, No. 5, pp. 841–852, 2009.
- 28 T. Koike, K. Utsugi, M. Oikawa, M. Kobayashi, and M. Yamasaki, "Interactive autostereoscopic display with 60 ray directions," in SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Research posters, p. 147, ACM, 2006.
- 29 N. Kawakami, M. Inami, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi, "Study and implementation of the object oriented display," IPSJ SIG Notes, Vol. 98, No. 9, pp. 79–84, 1998.
- 30 B. Lam, I. Stavness, R. Barr, and S. Fels, "Interacting with a personal cubic 3d display," in MM '09: Proceedings of the seventeen ACM international conference on Multimedia, pp. 959–960, ACM, 2009.
- 31 I. Stavness, F. Vogt, and S. Fels, "Cubee: a cubic 3d display for physics-based interaction," in SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Sketches, p. 165, ACM, 2006.
- 32 J. Djajadiningrat, G. Smets, and C. Overbeeke, "Cubby: a multiscreen movement parallax display for direct manual manipulation," Displays, Vol. 17, pp. 191–197, 1997.
- 33 Y. Kitamura, T. Konishi, S. Yamamoto, and F. Kishino, "Interactive stereoscopic display for three or more users," in SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 231–240, ACM, 2001.
- 34 Y. Kakehi, M. Iida, and T. Naemura, "Tablescape plus: supstanding tiny displays on tabletop display," in SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Sketches, p. 12, ACM, 2006.
- 35 M. Kobayashi, M. Oikawa, T. Koike, K. Utsugi, M. Yamasaki, and S. Kitagawa, "Character interaction system with autostereoscopic display and range sensor," in IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 2007. 3DUI '07, 2007.



Roberto Lopez-Gulliver
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(工学)
立体映像メディアと提示技術



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



牧野真緒
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
力覚コンテンツ制作支援イン
ターフェース



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



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
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